

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 (110)

Нижний Новгород 2015

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева /
НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2015. № 3 (110). – 341 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.Е. 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. Алексеева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

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

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. Математики, Университет Мак Мастера,
Хамилтон, 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

Воротынцев

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

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

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. Алексеева, 2015

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.E. ALEXEEV

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

№ 3 (110)

Nizhni Novgorod 2015

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.E. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhaleenko,
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)

Shiriaev

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
Абубакиров Б.А., Когтева Л.В., Львов А.Е., Панков С.В., Шишков Г.И. Коаксиальные нагрузки в радиоизмерительной технике.....	11
Садков В.Д., Лопаткин А.В. Определение распределения электрического сопротивления в токопроводящей пленке методом томографии.....	22
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	34
Мазова Р.Х., Колчина Е.А., Овчинникова Е.А., Ремизов И.В. Оценка цунамиопасности черноморского побережья в районах планируемых вариантов прокладки нового газопровода Россия-Турция.....	34
Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье-Стокса полностью неявным методом.....	51
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	70
Дербасов М.О., Лаптев, Филяков А. А., Гай В. Е. Речевое управление робототехнической системой с позиции теории активного восприятия.....	70
Сорокоумова Д.А., Корелин О.Н., Сорокоумов А.В. Построение и обучение нейронной сети для решения задачи распознавания речи.....	77
Шагалова П.А. Реализация системы распознавания образов на базе нейросетевого подхода для анализа временных рядов.....	85
Безыкорнов Д.С., Тюрин А.И., Степаненко М.А., Соколова Э.С. Анализ эффективности алгоритмов поиска ключевых точек на лице в условиях недостаточной графической информации.....	91
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	98
Баевский А.А. RFID-технология и её перспективы в России.....	98
Кочин А.Н., Желонкин М.В., Головин А.А. Влияние регулярного микрорельефа на эксплуатационные показатели деталей машин.....	104
Москвичев А. А. Кварталов А.Р. Тенденции экологически безвредного «сухого резания» металлов.....	110
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	117
Бородин С.С., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Полозкова Е.Н., Солдаткин О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования течения теплоносителя в активной зоне реактора плавучего энергоблока.....	117
Назаров А.В., Попов Е.А., Рожкова М.С. Исследование влияния параметров заполнения на дисперсионные и поляризационные свойства основной волны круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода.....	127
Варенцов А.В., Доронков Д.В., Илютина Е.М., Каратушина И.В., Сорокин В.Д.,	

Хробостов А.Е. Особенности течения теплоносителя в твс-квадрат реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов.....	
Фарафонов В.А., Зинин А.В., Семёнова Е.И., Комаров А.В. Расчет тепловой мощности кольцевых ТВЭЛ для реакторов ВВЭР. Сравнение тепловой мощности активной зоны при использовании кольцевых и стержневых топливных элементов.....	134
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	144
	156
Колотилин В.Е., Михеев А.В., Береснев П.О., Беляев А.М., Папунин А.В. Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях.....	156
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	156
	209
Болотин А.А. Применение метода дискретных вихрей для исследования подводных крыльев.....	209
Конурин Д.В., Пичков С.Н., Шишулин Д.Н. Оценка влияния температурного воздействия на показания приклеиваемых тензорезисторов для испытаний при 300°С....	209
Уваров А.И. Влияние механических характеристик материала на применимость геометрически линейных расчётных схем для пластин, нагруженных поперечной нагрузкой.....	214
	219
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	226
	226
Ваняев В.В., Ивановичев К.Н., Карпов Я.А., Коротков С.А. Расчет элементов резонансного контура DC – DC преобразователя с последовательным АИР.....	226
Дарьенков А.Б., Бадугин Д.А., Бычков Е.В., Мельников В.Л., Соколов В.В., Смирнов Е.О., Комраков Д.А. Исследования системы управления частотой вращения вала дизель-генератора гибридной ветроэлектростанции.....	232
Кралин А.А., Тюриков М.П. Моделирование трехстержневого трансформатора в SIMULINK.....	238
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	243
	243
Балан С.А., Ульянов В.А., Шигин В.Е. Виброимпульсное воздействие на расплавы чугунов.....	243
Жеребцов С.Н., Лобов Е.В., Чернышов Е.А. Повышение эффективности воздействия модификаторов за счет применения технологии высокотемпературной обработки расплава в процессе электрошлакового кокильного литья.....	247
Мальцев И. М. Материаловедение порошкового электропроката.....	255
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	268
	268
Долгов А.Н. Применение микроконтроллеров в интегральных датчиках.....	268
Миркин Б.А., Денисов Р.А. Анализ взаимосвязи коэффициента динамичности виброизоляторов и их динамической жесткости.....	273
Волков В.Л., Жидкова Н.В. Обработка информации в системе ориентации на основе МЭМС.....	273

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	279
Крюкова Т.М. Технологические уклады как основа развития общественного производства и инновационной деятельности путем реализации промышленной политики в современных условиях хозяйствования и управления.....	287
Колесов К.И., Ганкевич К.А., Плеханова А.Ф., Иванов А.А., Каракушьян А.Г. Об актуальности своевременной диагностики технического состояния протяженных замкнутых объектов.....	287
Егорова Н.И., Митякова О.И. Экологические инновации и устойчивое развитие.....	295
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	299
Смирницкий А.Е. Реформы Дэн Сяопина в отечественной историографии периода «перестройки»: проблемы социального управления.....	306
Казакова В.И. Артефакт как концепт современной социальной науки.....	306
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	312
Громов Е.М., Тюгин В.В. Квазисолитоны в рамках уравнения Кортевега-де-Вриза при учете потерь и неоднородности.....	317
Галкина Е.Д., Лешева С.В., Лукичев Н.С., Рыков В.Е. Некоторые оценки параметров распределения коши.....	317
Мошкова А.Н., Корягин А.С., Ерлыкина Е.И., Мохнина Н.В., Козлова Я.Ю., Царапкина Ю.И., Ерёмина Ю.Д., Дыдыкина В.Н. Статистический анализ количественных отношений глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей при терапии наноструктурированными препаратами.....	322
	326

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Abubakirov B.A., Kogteva L.V., Lvov A.E., Pankov S.V., Shishkov G.I. Coaxial terminations in measuring technique.....	11
Sadkov V.D., Lopatkin A.V. Determining the distribution of electrical resistance in the conductive film by a method of tomography.....	22
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	34
Mazova R.Kh., Kolchina E.A., Ovchinnikova E.A., Remizov I.V. Estimation of tsunami danger of Black sea coast in regions of planned variants of trace of new gas pipeline Russia-Turkey.....	34
Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovski E.N. A modeling of a body falling into the water under different conditions based on the numerical solution of the Navier-Tokes equations fully implicit method.....	51
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	70
Derbasov M. O., Laptev A. A., Filyakov A. A., V. E. Gai. Voice control of robots from the standpoint of the theory of active perception.....	70
Sorokoumova D., Korelin O., Sorokoumov A. Development and training of the neural network for voice recognition solution.....	77
Shagalova P.A. Implementation of the pattern recognition system for time series analysis based on the artificial neural network.....	85
Bezykornov D.S., Tyurin A.I., Stepanenko M.A, Sokolova E.S. Key points search algorithms efficiency analysis in a lack of graphical information.....	91
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	98
Baevskiy A. A. RFID-technology and its perspectives in Russia.....	98
Kochin A. N., Zhelonkin M. V., Golovin A. A. Effect of regular microrelief on performance machine parts.....	104
Moskvichev A. A. Kvartalov A.R. Tendencies ecologically harmless "dry cutting" of metals	110
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS.....	117
Borodin S.S., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Polozkova E.N., Soldatkin O.B., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Design and experimental investigation of the flow of coolant in the reactor core floating power.....	117
Nazarov A.V., Popov E.A., Rozhkova M.S. Research of the influence of the filling parameters to the desperssion and polarization characteristics of fundamental mode of an open circular layered ferrite-delectric waveguide.....	127
Varentsov A. V., Ilutina E. M., Caratushina I. V., Doronkov D.V., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Features of the flow inside tvs-kvadrat pwr reactor with staged mixing spacer	134

deci-current with various types of baffles.....	
Farafonov V. A., Zinin, A. V., Semenov E. I., Komarov A. V. Determination of thermal power annular fuel elements. comparison of the thermal power of the core using the annular and rod fuel elements.....	144
	156
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	
Kolotilin V. E., Miheev A. V., Beresnev P. O., Belyaev A. M., Papunen A. V., Zezyulin D.V., Makarov V.S., Belyakov V.V., Kurkin A. A. Statistical model of selection geometric parameters, mass- inertia and power characteristics of transport- technological machines with rotary-screw propellers.....	156
	209
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	209
Bolotin A.A. The use of discrete vortices method for the hydrofoils research.....	
Konurin D.V., Pichkov S.N., Shishulin D.N. Assessment of the temperature at the effects indications glued strain gages for tests at 300 °C.....	214
Uvarov A.I. The influence of the mechanical characteristics of the material on the applicability of the geometrically linear calculation schemes for plates loaded by transverse loads.	219
	226
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	
Vaniaev V.V., Ivanichev K. N., Karpov Y. A., Korotkov S. A. Calculation of the elements of the resonant circuit dc-dc converter with serial resonant inverter.....	231
Dar'enkov A. B., Badugin D. A., Bychkov E. V., Mel'nikov V. L., Sokolov V. V., Smirnov E. O., Komrakov D. A. Research of control system of frequency of rotation of the shaft diesel generator hybrid wind farm.....	232
	238
Kralin A.A., Turikov M.P. Simulation of transformers in conversion dedices.....	243
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	243
Balan S.A., Ulyanov V.A., Shigin V.E. Vibroimpulsive affecting fusions of cast-irons.....	
Zherebtsov S.N., E.V. Lobov, Chernyshov E.A. Improving the efficiency of the impact modifier, through the use of technology of high-temperature treatment of the melt in the process of electroslag chill casting	247
	255
Mal'tsev I.M. Metal science of electrical rolling of a metal powder in roll electrodes with a high-density current.....	268
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	268
Dolgov A.N. The use of microcontrollers in integrated sensors.....	273
Mirkin B., Denisov R. Analysis of dependence of vibroinsulators dynamic quality coefficient and their dynamic inflexibility.....	279
Volkov V.L., Zhidkova N.V. Information processing in system of orientation, based on mems.....	287
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	
Kryukova T.M. Technological structures as a basis for the development of social production and innovation through the implementation of industrial policy in the current economic	287

conditions and management.....	295
Kolesov K.I., Gankevich K.A., Plekhanova A.F., Ivanov A.A, Karakushyan A.G. About the relevance of timely diagnosis technical state extended closed objects	299
Egorova N.I., Mityakova O.I. Environmental innovation and sustainable development.....	306
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	306
Smirnitskiy A.E. Deng Xiaoping reforms in native historiography of restructuring period: social steering problems.....	316
Kazakova V.I. Artifact as contemporary social science concept.....	317
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	317
Gromov E.M., Tyutin V.V. Quasi solitons in the Kortevveg-de-Vrise equation frame with taking into account the loss and heterogeneity.....	322
Galkina E.D., Leshcheva S.V., Lukichev N.S., Rykov V.E. Some estimates of cauchy distribution parameters.....	
Moshkova A.N., Koryagin A.S., Erlykina E.I., Mohnina N.V., Kozlova YA.U., Tsarapkina U.I., Eremina U.D., Dydyikina V.N. Statistical analysis of quantitative relations of blood glucose and lactate in tumor-bearing animals with the terapia of nanostructured preparations.....	326

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372

Б.А. Абубакиров¹, Л.В. Когтева², А.Е. Львов¹, С.В. Панков¹, Г.И. Шишков²

КОАКСИАЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ В РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» им. А.П. Горшкова¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Объект исследования: коаксиальные нагрузки.

Цель: Описать принципы работы и конструкции современных коаксиальных нагрузок, в том числе эталонных, показать их применение в радиоизмерительной технике.

Результаты: Приведены технические характеристики коаксиальных нагрузок различного назначения.

Область применения: Коаксиальные нагрузки применяются как меры волнового сопротивления, эталоны коэффициентов отражения и передачи при настройке и контроле различных узлов (направленных ответвителей, переходов и др.), для проверки технических характеристик анализаторов цепей.

Ключевые слова: нагрузка, тонкопленочный резистор, объемный поглотитель, коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны напряжения.

Введение

Под нагрузками для линий передачи ВЧ-, СВЧ- и КВЧ-диапазонов волн понимают оконечные устройства радиотехнических трактов (коаксиальных, волноводных, полосковых), служащие для полного или частичного поглощения энергии электромагнитных волн.

Коаксиальные нагрузки в радиоизмерительной технике характеризуются широкой рабочей полосой частот, высокими техническими характеристиками, малым уровнем (не более 1 Вт) поглощаемой энергии.

В Нижегородском научно-исследовательском приборостроительном институте (ННИПИ «Кварц») разработаны нагрузки для коаксиальных линий сечениями 7/3,04; 3,5/1,52 и 2,4/1,042 мм с волновым сопротивлением 50 Ом, по своим техническим характеристикам соответствующие международному уровню.

Разработанные нагрузки соответствуют стандарту [1], присоединительные размеры коаксиальных разъемов выполнены по стандарту [2].

По назначению коаксиальные нагрузки можно подразделить на четыре основные группы:

- нагрузки согласованные фиксированные, используемые как оконечные устройства в измерительных системах, где важно обеспечение малых отражений, и в качестве образцовых мер для калибровки и поверки анализаторов цепей;
- нагрузки рассогласованные с фиксированными значениями коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН), являющиеся эталонами отражения и используемые для контроля и поверки измерителей параметров цепей;
- нагрузки подвижные с переменной фазой коэффициента отражения, служащие эталонами волнового сопротивления;

- нагрузки короткозамкнутые, которые используются как образцовые меры модуля и фазы коэффициента отражения.

Согласованные фиксированные нагрузки

Основными конструкциями коаксиальных согласованных нагрузок являются:

- конструкции на базе цилиндрических резисторов с однородным тонким (меньше толщины скин-слоя) поглощающим покрытием (рис. 1, а, б);
- конструкции с применением объемных поглотителей (рис. 1, в).

Для объемных поглотителей выбирается материал, поглощающий высокочастотную энергию и одновременно легко поддающийся механической обработке [3].

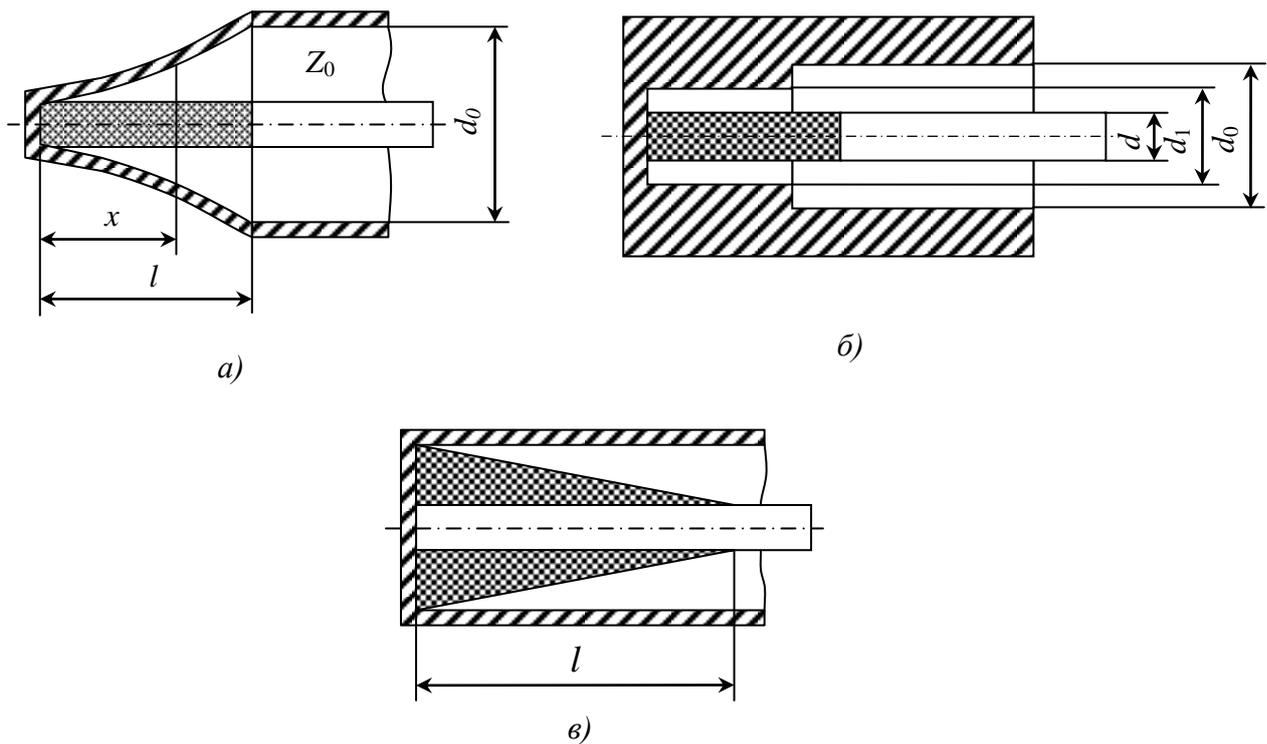


Рис. 1. Конструкции коаксиальных согласованных нагрузок

Нагрузки согласованные фиксированные на цилиндрических резисторах, расположенных на продолжении центральных проводников коаксиальных линий и внутри внешних проводников (экранов) линий экспоненциальной формы (рис. 1, а).

В таких нагрузках в каждом поперечном сечении на расстоянии x от плоскости замыкания резистивного слоя на корпус внешнего проводника обеспечивается равенство волнового сопротивления коаксиальной линии омическому сопротивлению резистора (рис. 1, а).

Зависимость диаметра внешнего проводника от положения плоскости замыкания определяется соотношением [4]

$$d_x = d_0 e^{\left[-\frac{Z_0}{60} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right]}. \quad (1)$$

Величина КСВН нагрузок с экспоненциальным экраном составляет 1,05 в диапазоне от постоянного тока до частот порядка 3 ГГц и не более 1,35 до частоты 18 ГГц для коаксиальной линии сечением 7/3,04 мм.

В расчетах по формуле (1) предполагается, что резистивный слой равномерно распределен по поверхности резистора, что на практике не всегда осуществимо.

Лучшие результаты по согласованию нагрузки достигаются при использовании внешнего проводника (экрана), профиль которого задан выражением [5]

$$d_x = \frac{d_0}{1 + 1,3 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2}. \quad (2)$$

В отличие от экспоненциального согласующего экрана в этой конструкции обеспечивается плавная трансформация волнового фронта при переходе от коаксиальной линии к поглощающей части нагрузки, однако при этом нарушается условие равенства омического сопротивления резистора волновому сопротивлению в каждом сечении в соответствии с (1). Поэтому в согласующую камеру устанавливаются регулировочные винты, с помощью которых достигается равенство входного сопротивления резистора волновому сопротивлению и его независимость от частоты. Благодаря плавному профилю согласующего экрана уменьшается влияние разброса величины поверхностного сопротивления резисторов по длине резистивного слоя и достигается значительное снижение влияния неравномерности резистивного слоя на согласование нагрузок в диапазоне частот. Были достигнуты величины КСВН нагрузок не более 1,015 до 3 ГГц и 1,15 до 18 ГГц для коаксиальной линии сечением 7/3,04 мм.

Коаксиальные нагрузки с КСВН не более 1,015 в диапазоне до 3 ГГц становятся образцовыми мерами волнового сопротивления. Измерение и аттестация нагрузок с КСВН менее 1,05 возможны с помощью панорамных измерителей КСВН и отрезка прецизионной коаксиальной линии, создающего переменный фазовый сдвиг между измеряемой нагрузкой и рефлектометром в панорамном режиме работы прибора [5]. Происходит интерференция двух сигналов Γ_n (коэффициент отражения нагрузки) и Γ_p (коэффициент отражения рефлектометра). Выходной сигнал рефлектометра меняется от максимального $\Gamma_{\max} = |\Gamma_p + \Gamma_n|$ до минимального $\Gamma_{\min} = |\Gamma_p - \Gamma_n|$, при $\Gamma_p > \Gamma_n$ $\Gamma_n = 0,5(\Gamma_{\max} - \Gamma_{\min})$.

Измерение коэффициента отражения нагрузки осуществляется относительно волнового сопротивления отрезка коаксиальной линии и погрешность измерения КСВН определяется не величиной направленности рефлектометра, а импедансными характеристиками отрезка линии. В результате возможно уменьшение погрешности измерения в 10-15 раз. Импедансные характеристики отрезка коаксиальной линии зависят от точности его изготовления и качества измерительного соединителя, к которому подключается исследуемая нагрузка.

Изготовление внешнего проводника нагрузки в соответствии с (1), (2) требует специального инструмента или изготовления на токарных станках с программным управлением.

С появлением *малогабаритных тонкопленочных цилиндрических резисторов* для решения многих задач радиоизмерительной техники стало возможным создание согласованных нагрузок, для которых выполняется условие $l/\lambda \ll 1$, где l – длина резистивного слоя, λ – рабочая длина волны, на которой должно обеспечиваться согласование нагрузки (рис. 1, б).

Для коаксиальной линии с потерями в [4] получено соотношение

$$\frac{Z_{ax}}{R_0} = 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{y^2} \left(\frac{R_0}{Z_0}\right)^2 + j \frac{1}{y} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{Z_0}\right)^2\right], \quad (3)$$

где R_0 – омическое сопротивление линии поглощающего участка линии; Z_0 – волновое сопротивление линии; $y = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{l} \cdot \frac{R_0}{Z_0}$; λ_0 – длина волны; Z_{ax} – волновое сопротивление линии с потерями.

Выполняя условие согласования, т.е. приравнивая реактивную составляющую в (3) нулю, получаем

$$Z_0 = \frac{R_0}{\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Для обеспечения согласования нагрузки необходимо выбрать резистор с номиналом сопротивления, равным волновому сопротивлению линии, и диаметром d , вычислить диа-

метр d_1 цилиндрической линии с потерями с использованием формулы $138 \lg \frac{d_1}{d} = \frac{Z_0}{\sqrt{3}}$ и обеспечить необходимое согласование двух отрезков линии изменением диаметра внешнего проводника [6].

Согласованные коаксиальные нагрузки с малогабаритными резисторами обеспечивают величину КСВН не более 1,1 на частотах до 3 ГГц.

Нагрузки согласованные фиксированные на объемных поглотителях

Особенностью таких нагрузок является снижение коэффициента отражения от поглотителя с увеличением рабочей частоты, и они используются в верхней части СВЧ и в КВЧ диапазонах.

Общий вид конструкции коаксиальной согласованной нагрузки с объемным поглотителем показан на рис. 1, в.

Материалом для изготовления поглотителя служит смесь карбонильного железа в виде мелкого порошка с диэлектриками, в качестве которых могут быть использованы полиэтилен, полистирол, полипропилен. Широкое применение нашел полиэтилен из-за возможности его использования при низких температурах. Объемный поглотитель производится методом литья с использованием специальных пресс-форм либо может быть изготовлен на токарном и фрезерном станках из брикета, полученного литьем без применения специальных пресс-форм.

Для коаксиальных согласованных нагрузок поглотитель выполняется в виде конуса. Его размеры выбираются с учетом получения согласования нагрузки (чем длиннее поглотитель, тем лучше согласование) и удобства встраивания в линию. Экспериментально установлено, что длина поглотителя должна быть порядка $2\lambda_{\max}$ (λ_{\max} – наибольшая рабочая длина волны для данной коаксиальной нагрузки).

В поглотителе выполняется дополнительный скос, обеспечивающий плавность перехода от линии без потерь к линии с поглотителем [6]. Конструкция поглотителя показана на рис. 2.

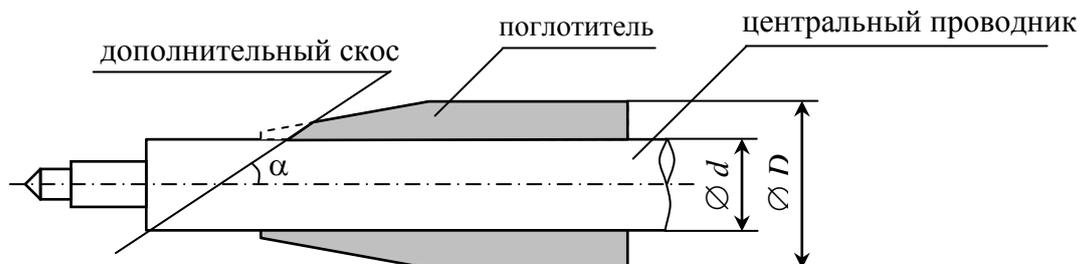


Рис. 2. Конструкция коаксиального поглотителя со скосом

В коаксиальных нагрузках с объемными поглотителями для уменьшения коэффициента отражения на входе нагрузок не ставится опорная шайба, а центральный проводник делается подвижным в пределах 3-5 мм. В этом случае при сочленении соединителей центральный проводник досылается до упора с гнездовым центральным контактом ответного соединителя.

Величина КСВН фиксированных нагрузок с объемным поглотителем составляет не более 1,1 в диапазоне частот 2-18 ГГц на коаксиальных линиях сечениями 7/3,04 мм, 3,5/1,52 мм и не более 1,1-1,05 в диапазоне частот 10-50 ГГц на коаксиальной линии сечением 2,4/1,042 мм в зависимости от поддиапазона частот.

На рис. 3 показан внешний вид коаксиальных согласованных фиксированных нагрузок на тонкопленочных резисторах (сечение линии 7/3,04 мм).



Рис. 3. Фиксированная коаксиальная согласованная нагрузка

В табл. 1 приведены технические характеристики коаксиальных согласованных фиксированных нагрузок [7].

Таблица 1

Технические характеристики фиксированных коаксиальных нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	КСВН	Рассеиваемая мощность, Вт	Тип соединителей	Габариты, мм	Масса, кг
2.243.970	0-18	1,05 (0-2 ГГц) 1,1 (2-7 ГГц) 1,25(7-12 ГГц) 1,35 (12-18 ГГц)	0,5	Ш В	Ø 23×40	0,1
2.260.145	0-18	1,2	0,25	IX В	Ø 10×27	0,025
468.549.002	0-36	1,2 (0-18 ГГц) 1,3 (18-36 ГГц)	0,25	IX В	Ø 10×27	0,025
2.260.179 2.260.179-02	0-2	1,015	0,5	Ш В Ш Р	Ø 23×60	0,1
2.260.184 2.260.184-02	0-3	1,015	0,25	IX В IX Р	Ø 13×60	0,1
2.260.180	2-18	1,1	0,5	Ш В	Ø 23×200	0,25
2.260.185	3-18	1,1	0,25	IX В	Ø 13×160	0,15
2.243.985	3-26,5	1,1	0,2	IX В	Ø 13×115	0,15
468.548.004 468.548.004-01	4-18	1,1	0,1	IV IP	Ø 13×124 Ø 13×120	0,15
468.548.004-02 468.548.004-03	10-50	1,1 (10-15 ГГц) 1,05 (15-50 ГГц)	0,1	IV IP	Ø 13×92,8 Ø 13×88,8	0,1

Примечание: диапазон частот нагрузок, выполненных на резисторах, указывается от постоянного тока.

Нагрузки рассогласованные с фиксированными значениями КСВН

Такие нагрузки используются в тех случаях, когда требуется обеспечить коэффициент отражения (или величину КСВН) с высокой точностью в широком диапазоне частот, например, при калибровке и поверке измерителей коэффициентов отражения и передачи. На практике обычно применяются рассогласованные нагрузки с номинальными величинами КСВН 1,4 или 2,0. При этом нагрузки аттестуются не только по модулю, но и по фазе коэффициента отражения.

В диапазоне частот до 2-3 ГГц используются рассогласованные нагрузки с тонкопленочными резисторами – нагрузки резистивного типа. Величины омического сопротивления резисторов выбираются из соотношения $R = Z_0/2$ или $R = 2Z_0$ для нагрузок с КСВН = 2 и $R = Z_0/1,4$ или $R = 1,4Z_0$ для нагрузок с КСВН = 1,4. Внутренний диаметр внешнего про-

водника (экрана) рассчитывается по методике, изложенной в [4]. В зависимости от значения фазы коэффициента отражения нагрузки бывают двух видов: фаза коэффициента отражения близка к 180^0 – при $R < Z_0$; фаза коэффициента отражения близка к 0^0 – при $R > Z_0$.

Нагрузки аттестуются на фиксированных частотах с помощью направленных ответвителей, имеющих направленность более 40 дБ с обязательной проверкой присоединительных размеров соединителей нагрузок и ответвителей. При аттестации нагрузок по фазе коэффициента отражения в качестве калибровочной меры измерительного прибора используется короткозамкнутая нагрузка, для которой фаза коэффициента отражения в плоскости короткого замыкания равна 180^0 .

Рассогласованные нагрузки со скачком волнового сопротивления

Рассогласованные нагрузки с расчетными значениями модуля и фазы коэффициента отражения выполняются со «скачком» волнового сопротивления. Их называют ступенчатыми по характеру изменения диаметра центрального проводника. Такие рассогласованные нагрузки наиболее точны и широко распространены. Для ступенчатых нагрузок характерны: относительная простота конструкции, практическая независимость коэффициента отражения от частоты и, самое главное, возможность строгого расчета и аттестации нагрузок по модулю и фазе коэффициента отражения, исходя из геометрических размеров передающих коаксиальных линий.

На рис. 4 показаны конструкция коаксиальной нагрузки со ступенчатым изменением центрального проводника линии (рис. 4, а) и эквивалентная электрическая схема (рис. 4, б) ступенчатого изменения диаметра центрального проводника.

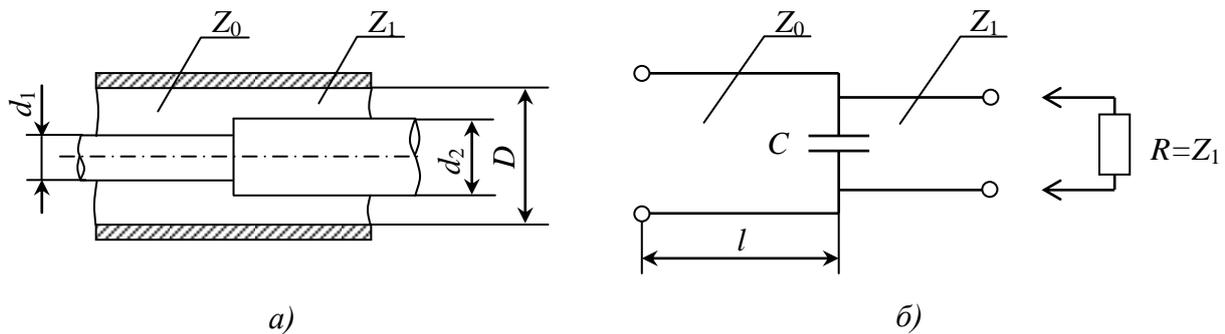


Рис. 4. Ступенчатое изменение диаметра центрального проводника коаксиальной линии:

а – конструкция; б – эквивалентная схема

Без учета проводимости электрической емкости, которая образуется в плоскости изменения диаметра центрального проводника линии, величина КСВН такой неоднородности ориентировочно определяется величиной

$$\text{КСВН} = \frac{Z_0}{Z_1}. \quad (5)$$

Расчет коэффициента отражения (КО) рассматриваемой неоднородности в квазистатическом приближении [8] проводится по формуле

$$\Gamma = \frac{\sqrt{(Z_0 - Z_1)^2 + (\omega CZ_0 Z_1)^2}}{\sqrt{(Z_0 + Z_1)^2 + (\omega CZ_0 Z_1)^2}}, \quad (6)$$

где ω – циклическая частота. Величина емкости C определяется параметрами D , d_1 , d_2 (рис. 4).

Влияние электрической емкости на частотную зависимость коэффициента отражения мало, и величина коэффициента отражения остается практически постоянной во всем рабочем диапазоне частот. Этот вывод действителен в том случае, если коаксиальная линия с волновым сопротивлением Z_1 (например, 25 Ом для получения КСВН = 2) нагружена на идеально согласованную нагрузку.

Фаза коэффициента отражения в плоскости входного разъема определяется длиной отрезка l и емкостью C [8] по формуле

$$\theta = \arctg\left(\frac{Z_1 Z_0}{Z_0 - Z_1} \omega C\right) - \arctg\left(\frac{Z_1 Z_0}{Z_0 + Z_1} \omega C\right). \quad (7)$$

Например, для нагрузок с КСВН = 2 в коаксиальной линии сечением 7/3,04 мм значение θ достигает величины 7° на частоте 18 ГГц.

Наибольшее распространение в радиоизмерительной технике получили рассогласованные нагрузки с фиксированным КСВН на основе объемных поглотителей (рис. 5).

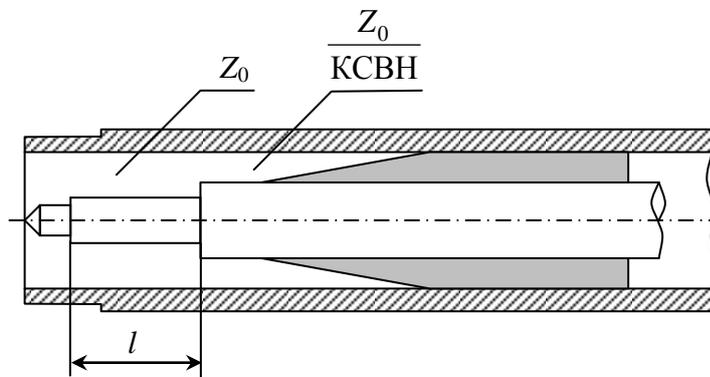


Рис. 5. Рассогласованная коаксиальная нагрузка с объемным поглотителем

Если в коаксиальной рассогласованной нагрузке, имеющей ступенчатый центральный проводник, предусмотрено перемещение объемного поглотителя, область использования нагрузок существенно расширяется. Возможность перемещения объемного поглотителя в пределах более половины максимальной рабочей длины волны позволяет измерить максимальное K_{\max} и минимальное K_{\min} значения КСВН нагрузки. Величина КСВН нагрузки, измеренная проверяемым прибором (например, с помощью измерительной линии или на панорамном измерителе КСВН и ослабления), будет определяться выражением [9]

$$КСВН = \sqrt{\frac{K_{\max}}{K_{\min}}},$$

где K_{\max} , K_{\min} – максимальное и минимальное измеренные значения КСВН.

В этом случае коэффициент отражения поглотителя исключается и точность измерения КСВН нагрузки будет определяться только точностью механического изготовления коаксиальной линии и используемых соединителей.

Все рассмотренные рассогласованные нагрузки на фиксированной частоте имеют практически постоянное значение фазы коэффициента отражения, в том числе и с подвижным поглотителем.

Нагрузки со скачком волнового сопротивления обеспечивают постоянство модуля коэффициента отражения в пределах $\pm 1,0\%$ в диапазоне частот 2-18 ГГц.

В табл. 2 приведены технические характеристики коаксиальных рассогласованных нагрузок – эталонов отражения [7].

Таблица 2

Технические характеристики коаксиальных рассогласованных нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	КСВН	Рассеиваемая мощность, Вт	Тип соединителей	Погрешность, %	Габариты, мм	Масса, кг
2.260.182	0-2,3	1,4±0,1 (R=37,5 Ом)	0,25	Ш В	1,5	∅ 23×71,5	0,1
2.260.182-01	0-2,3	1,4±0,1 (R=69,8 Ом)	0,25	Ш В	1,5	∅ 23×71,5	0,1
2.260.182-02	0-2,3	2,0±0,1 (R=24,9 Ом)	0,25	Ш В	2,0	∅ 23×71,5	0,1
2.260.182-03	0-2,3	2,0±0,1 (R=100 Ом)	0,25	Ш В	2,0	∅ 23×71,5	0,1
2.260.187	0-3	1,4±0,1 (R=37,5 Ом)	0,125	IX В	1,5	∅ 14×72	0,06
2.260.187-01	0-3	1,4±0,1 (R=69,8 Ом)	0,125	IX В	1,5	∅ 14×72	0,06
2.260.187-02	0-3	2,0±0,1 (R=24,9 Ом)	0,125	IX В	2,0	∅ 14×72	0,06
2.260.187-03	0-3	2,0±0,1 (R=100 Ом)	0,125	IX В	2,0	∅ 14×72	0,06
2.260.183	2-18	1,4+0,05	0,125	Ш В	1,5	∅ 22×409	0,5
2.260.183-01	2-18	2,0+0,05	0,125	Ш В	2,0	∅ 22×409	0,5
2.260.188	3-18	1,4+0,05	0,125	IX В	1,5	∅ 16×294	0,15
2.260.188-01	3-18	2,0+0,05	0,125	IX В	2,0	∅ 16×294	0,15

Коаксиальные рассогласованные нагрузки с переменной фазой коэффициента отражения

На практике при измерении направленности ответвителей, согласованных переходов и в ряде других случаев широкое распространение получили рассогласованные нагрузки с КСВН = 1,2 и переменным значением фазы коэффициента отражения на фиксированной частоте. На рис. 6 показана конструкция нагрузки с подвижным рассогласованным поглотителем [6], а в табл. 3 – технические характеристики коаксиальных нагрузок с подвижным поглотителем [7].

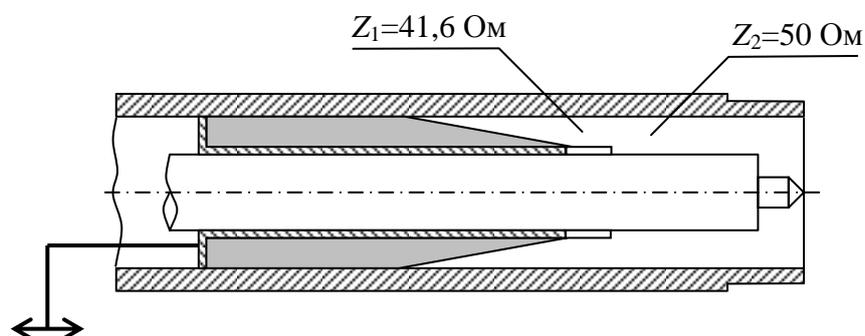


Рис. 6. Нагрузка коаксиальная с подвижным рассогласованным поглотителем

Приведенные в табл. 3 характеристики нагрузок выполнены на коаксиальных линиях сечениями 7/3,04 мм; 3,5/1,52 мм и 2,4/1,042 мм. Эти нагрузки являются мерами волнового сопротивления. На рис. 7 показан внешний вид нагрузки подвижной с переменной фазой коэффициента отражения – эталона волнового сопротивления.

Таблица 3

**Технические характеристики коаксиальных нагрузок
с подвижным поглотителем**

Модель	Диапазон частот, ГГц	КСВН воздушного канала	КСВН поглотителя	Тип соединителя	Габариты, мм	Масса, кг
2.260.181	2-18	1,01	1,1	Ш В	∅ 23×400	0,2
2.260.181-01	2-18	1,01	1,1	Ш Р	∅ 23×400	0,2
2.260.203	2-18	1,01	1,2	Ш В	∅ 23×400	0,2
2.260.186	3-18	1,01	1,1	IX В	∅ 16×280	0,15
2.260.186-01	3-18	1,01	1,1	IX Р	∅ 16×280	0,15
2.260.204	3-18	1,01	1,2	IX В	∅ 16×280	0,15
468.548.003	4-18	1,01	1,1	IV	∅ 14×165	0,1
468.548.003-01	4-18	1,01	1,1	IP	∅ 14×105	0,1
468.548.003-02	10-50	1,01	1,1	IV	∅ 14×105	0,075
468.548.003-03	10-50	1,01	1,1	IP	∅ 14×105	0,075
468.548.005-02	17,44-37,5	1,01	1,2	IV	∅ 14×105	0,075
468.548.005-03	17,44-37,5	1,01	1,2	IP	∅ 14×105	0,075



Рис. 7. Коаксиальная подвижная рассогласованная нагрузка

Коаксиальные короткозамкнутые нагрузки

Нагрузки коаксиальные короткозамкнутые (КЗ) определяют плоскость отсчета фазы и являются образцовыми мерами модуля и фазы коэффициента отражения, обеспечивающими модуль коэффициента отражения, равный единице, и фазу в плоскости короткого замыкания, равную 180^0 . Короткозамкнутые нагрузки применяются при калибровке измерителей комплексных коэффициентов отражения и передачи.

Конструктивно короткозамкнутые фиксированные нагрузки представляют собой коаксиальный разъем с замкнутыми внешним и внутренним проводниками (рис. 8).

Коаксиальные короткозамкнутые нагрузки могут быть изготовлены с подвижным короткозамыкателем, выполненным на пружинных контактах. Положение замыкателя отсчитывается с помощью нониусного механизма.

На рис. 8 показаны две конструкции КЗ нагрузок для коаксиальных линий с волновым сопротивлением 50 Ом для двух стандартных сечений 16/6,96 мм и 7/3,04 мм. ГОСТ [10] определяет месторасположение плоскости А-А короткого замыкания нагрузки. Для коаксиальной линии сечением 7/3,04 мм плоскость А-А совпадает с присоединительным размером $A = 5,28$ мм разъема типа Ш «Вилка» по ГОСТ [2]. Аналогично выполнены короткозамыкатели для линий сечениями 3,5/1,52 мм и 2,4/1,042 мм. Для линии сечением 16/6,96 мм плоскость А-А не совпадает с присоединительными размерами из-за конусности внешнего проводника. Это обстоятельство необходимо учитывать при измерении комплексных импедансов.

Если при работе с измерительными линиями достаточно иметь КСВН КЗ нагрузки не менее 30 ($\Gamma \approx 0,93$), то для калибровки анализаторов цепей желательно иметь нагрузки с КСВН ≈ 200 ($\Gamma \approx 0,99$). Измерение больших значений КСВН проводится методом «удвоен-

ного» минимума [11, 12]. Значение модуля коэффициента отражения 0,98 удовлетворяет практически всем видам измерений.

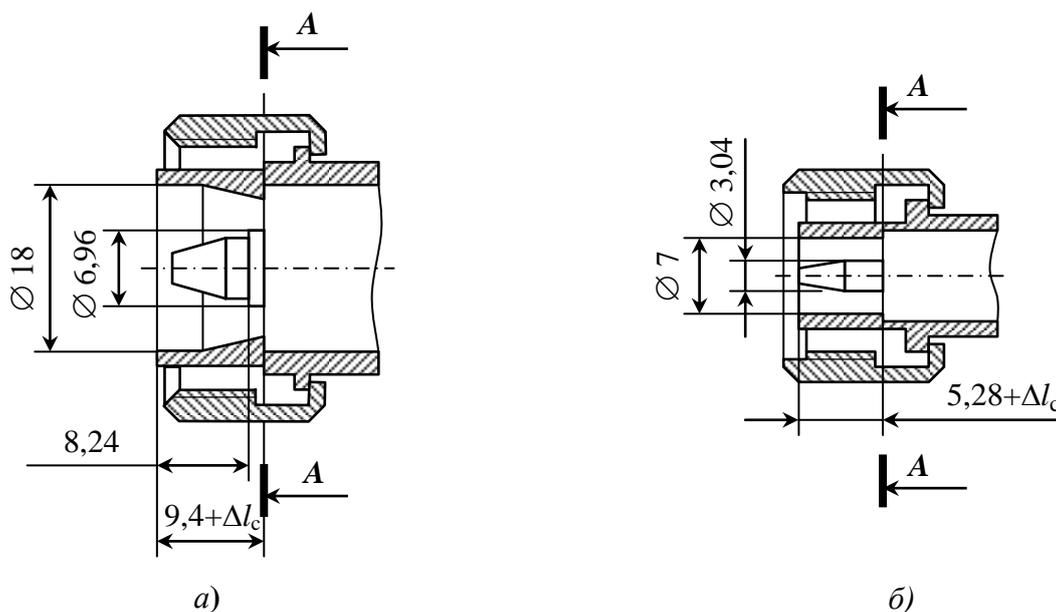


Рис. 8. Конструкции короткозамкнутых коаксиальных нагрузок



Рис. 9. КЗ нагрузка с соединителями «Вилка», «Розетка»

Для удобства эксплуатации КЗ нагрузки могут выполняться в одном корпусе. На рис. 9 показана одна из таких нагрузок. В табл. 4 приведены технические характеристики коаксиальных короткозамыкателей.

Таблица 4

Технические характеристики коаксиальных короткозамкнутых нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	Длина фазосдвигающего отрезка, мм	Тип соединителя	Габариты, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5	6
2.260.205	0-18	0	III (B, P)	∅ 23×78	0,1
2.260.206	8-18	7,5	III (B, P)	∅ 23×80	0,1
2.260.206-01	4-8	12,5	III (B, P)	∅ 23×80	0,1
2.260.206-02	2-4	25	III (B, P)	∅ 23×80	0,1
2.260.207	0-18	0	IX P	∅ 14×50	0,05
2.260.229	0-18	0	IX B	∅ 8,6×36	0,05
2.260.193	2-18	4	IX (B, P)	∅ 14×68	0,1
2.260.193-01	8-18	7,5	IX (B, P)	∅ 14×68	0,1
2.260.193-02	4-8	12,5	IX (B, P)	∅ 14×68	0,1

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6
2.260.193-03	2-4	25	IX (B, P)	∅ 14×68	0,1
468.548.007	0-50	0	I B	∅ 10×26	0,025
468.548.008	0-50	0	I P	∅ 10×26	0,025

Библиографический список

- ГОСТ 13364-90. Нагрузки коаксиальные. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Гос.комитет по стандартам, 1990.
- ГОСТ РВ 51914-2002. Элементы соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов. Присоединительные размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2002.
- ОСТ 107.460007.006-92. Отраслевой стандарт. Материалы для объемных поглотителей высокочастотной энергии. – М.: Изд-во ВНИИ, 1992.
- Тишер, Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: справочное руководство: [пер. с нем. А.В.Львова] / Ф. Тишер; под ред. В.Н. Сретенского. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.
- Львов, А.Е. Сверхширокополосные коаксиальные нагрузки на новых резисторах / А.Е.Львов // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1980. Вып. 6 (31). С. 112–119.
- Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы: монография / А.М. Кудрявцев [и др.]; под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
- Коаксиальные, волноводные и оптические устройства // Каталог ННИПИ «Кварц». – Н.Новгород, 2014. – 61 с.
- Абубакиров, Б.А. Универсальная образцовая коаксиальная нагрузка / Б.А. Абубакиров, В.Н. Суворов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1967. Вып.4. С. 46–50.
- РД 50-272-81. Методические указания. Нагрузки коаксиальные с расчетными параметрами. Методы и средства поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
- ГОСТ 8.365-79. Нагрузки коаксиальные. Методы и средства поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1980.
- Абубакиров, Б.А. Короткозамкнутые нагрузки и методы измерения их параметров на СВЧ и КВЧ / Б.А. Абубакиров [и др.] // Радиоизмерения и электроника. 2009. №15.
- Перспективы совершенствования радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона / О.П. Павловский [и др.]. – М.: Радиотехника, 2012. – 272 с.

Дата поступления
в редакцию 02.07.2015

В.А. Abubakirov¹, L.V. Kogteva², А.Е. Lvov¹, S.V. Pankov¹, G.I. Shishkov²

COAXIAL TERMINATIONS IN MEASURING TECHNIQUE

Institute of electronic measurements KVARZ n.a. A.P.Gogshkov¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Subject: Coaxial terminations.

Purpose: To describe the operation and constructions of modern coaxial terminations (including reference terminations), to specify their application in measuring technique.

Results: Technical characteristics of different coaxial terminations are presented.

Field of application: Coaxial terminations are used as standards of impedance and reflection and transmission coefficients while adjusting the operation and control of different devices (directional coupler, transition and so on). Coaxial terminations are used for technical characteristics control of network analyzer.

Key words: termination, thin-film resistor, absorbing material, reflection coefficient, voltage standing-wave ratio.

УДК 517.54

В.Д. Садков, А.В. Лопаткин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКЕ МЕТОДОМ ТОМОГРАФИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена методика определения распределения электрического сопротивления в токопроводящей пленке, учитывающая нелинейность траекторий линий тока и их зависимость от искомого распределения. Методика базируется на совместном использовании конечно-разностного метода, определяющего и уточняющего траектории линий тока, и алгоритма реконструкции, выявляющего распределение электрического сопротивления вдоль этих линий. Методика пригодна (в силу аналогии) и для решения задач о распределении диэлектрической проницаемости и коэффициента теплопроводности в многомерных областях.

Ключевые слова: импедансная томография, токопроводящая пленка, распределение электрического сопротивления.

Введение

Предложенный в работе [1] алгоритм определения зависимости электрического сопротивления токопроводящей пленки от координат базируется на методе томографии [2-5], учитывающем конкретные свойства рентгеновских лучей. Линии тока в токопроводящей среде принципиально отличаются по своим свойствам от рентгеновских лучей: их траектории не прямолинейны (в том числе и в однородном диске с контактами по периметру, выбранном в [1]), зависят от неизвестного распределения электрического сопротивления и не могут быть установлены до эксперимента; величина сопротивления $R_{i,j}$ определяется всей совокупностью линий тока, протекающих между контактами i и j (трубкой тока), и несет информацию о распределении электрического сопротивления пленки вдоль плоской фигуры, образуемой трубкой тока с ненулевой шириной δ в любом поперечном сечении (при $\delta = 0$ контакты i и j точечные и $R_{i,j}$ бесконечно велико). Перечисленные особенности не учтены в [1]. Задача (даже без учета необходимости ее постановки в произвольной двумерной области) не может быть решена предложенным алгоритмом, ибо в определении нуждаются не только распределение электрического сопротивления вдоль совокупности траекторий, но и сами траектории, зависящие от этого неизвестного распределения.

Математическая постановка задачи

Задача в данном случае заключается в определении гладкой или кусочно-гладкой неотрицательной функции $\rho(x,y)$, удовлетворяющей в токопроводящей области (рис. 1) следующей системе внутренних обратных (инверсных) краевых задач [6, 7]:

$$\nabla \left[\frac{1}{\rho(x,y)} \nabla U(x,y) \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{G_{k,i}} = E_i, & i = 1, 2, \dots, n \\ U_{G_{k,j}} = 0, & j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n' \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n_G} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_i} \int_{l_{k,i}} \frac{1}{\rho(x,y)} \frac{\partial U}{\partial n} dl = \frac{I_{i,j}}{E_i} = \frac{1}{R_{i,j}}, \quad (4)$$

где $\rho(x, y)$ – искомое распределение электрического сопротивления; n – число позиций контактов или зондов по периметру исследуемой области; m – число контактов ($2 \leq m \leq n$), устанавливаемых на n позиций; $G_{k,i}$ и $l_{k,i}$ – участок границы, занимаемый i -м контактом, и его длина; G – граница области, свободная от контактов; $E_{i,j}$ – разность потенциалов между контактами i и j ; $R_{i,j}$ – сопротивление между контактами i и j , вычисленное по измеренному току $I_{i,j}$.

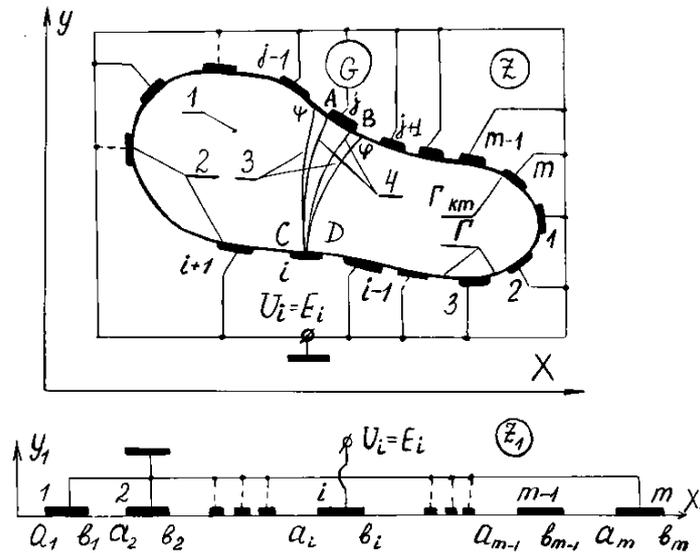


Рис. 1

Минимальная размерность системы (1) – (4) $L=n-1$ имеет место при $m=n$, максимальная – $L=n(n-1)/2$ при $m=2$. Рост размерности L с уменьшением m сопровождается снижением сложности каждой отдельной задачи системы. Отметим, что при любом количестве контактов $2 \leq m \leq n$ общее количество независимых измерений сопротивлений $R_{i,j}$ равно $n(n-1)/2$ (при $m < n$ контакты перемещаются по n выбранным позициям).

Система (1)–(4) внутренних обратных краевых задач отличается от известных нетрадиционностью постановки: в качестве исходных данных задаются не значения потенциалов поля [6, 7], а потоки поля через участки границы с контактами. Методы решения таких систем в литературе не рассмотрены.

Система (1)–(4) может быть решена конечно-разностным методом путем варьирования параметров $\rho_{k,l}$ ($k=1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, N; 10^2 \leq M \cdot N \leq 10^4$) электрического сопротивления ячеек сетки для удовлетворения условий (4) [5]. Алгоритм такого варьирования, последовательно приближающий параметры среды к искомому распределению, построим на базе алгебраического алгоритма реконструкции [2], устойчивого к малым изменениям входных данных:

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \rho_{k,l} (n_{k,l} h_{i,j})^{i,j} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \rho_{k,l} n_{k,l}^{i,j}, \quad (5)$$

где M, N – количество элементов изображения (элизов) по координате x и y соответственно; $\rho_{k,l}$ – электрическое сопротивление элиза с индексом $k, l; i=1, 2, \dots, n$ и $j=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ (с учетом $R_{i,j} = R_{j,i}$ достаточно ограничиться значениями $j = i+1, i+2, \dots, n$); $h_{i,j}$ – весовая функция для i, j измерения, заменяющая реальную трубку эквивалентной с равномерным распределением тока по сечению путем задания значений $h_{i,j} = 1$ и $h_{i,j} = 0$ внутри и вне трубки; $n_{k,l}^{i,j}$ – коэффициент формы участка эквивалентной трубки в элизе k, l при i, j измерении.

Представление величины $R_{i,j}$ в форме (5) возможно лишь при условии, что ширина эквивалентной трубки тока δ меньше размера элиза H вблизи контакта $\delta \approx l_k$ и, значит, $l_k < H$. В случае узких ($\delta \ll H$) трубок тока можно считать $n_{k,l}^{i,j} = d_{k,l}^{i,j}$ (длина траектории линии тока в трубке с условной единичной шириной в элизе k, l при i, j измерении) и

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \rho_{k,l} d_{k,l}^{i,j}, \quad (6)$$

Методика решения системы (1) – (4) заключается в следующем:

1. Исследуемую область разделяем на элизы равномерной сеткой с шагом H .
2. Проводим, в соответствии с рис. 1, $n=(n-1)/2$ измерений и формируем матрицу \bar{R} сопротивлений $R_{i,j}$.
3. В приближении однородной среды с помощью конечно-разностного метода для каждой из L краевых задач системы (1) – (4) находим структуру поля потенциалов, формируем исходную проекционную матрицу электрических сопротивлений в элизах $\bar{\rho}^{(0)}$.
4. Определяем геометрию эквивалентных трубок тока. Формируем исходную матрицу коэффициентов формы $\bar{n}^{(0)}$ или (для узких трубок) длин траекторий $\bar{d}^{(0)}$.
5. Проводим цикл реконструкции по указанным в [1, 2] формулам ((30),(31) настоящей работы), используя соотношения (5) или (6). При этом не стремимся к получению результата с высокой точностью (проводим цикл из 3–5 итераций), учитывая повторение (после уточнения свойств среды в п.6) циклов реконструкции.
6. Проверяем выполнение условия окончания процесса

$$\left| \rho_{k,l}^p - \rho_{k,l}^{p-1} \right| \leq \varepsilon, \quad k=1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

где $\rho_{k,l}^p, \rho_{k,l}^{p-1}$ – электрическое сопротивление элиза k, l на $p-1$ и p циклах реконструкции; ε – малая величина, имеющая порядок точности измерений токов $I_{i,j}$.

При выполнении неравенства (7) система (1) – (4) считается решенной, а полученное распределение $\rho_{k,l}$ – искомым решением. В противном случае с помощью конечно-разностного метода уточняем структуру поля потенциалов в изменившейся среде (малые изменения параметров среды приводят к малым изменениям структуры поля и траекторий линий тока [8]) и переходим к п. 4. Отметим, что использование в п.3 вместо конечно-разностного метода методов теории функций комплексного переменного позволяет не только сократить почти в 10^4 раз затраты памяти и машинного времени, но и найти аналитические решения для полей потенциалов всех L краевых задач (начальные приближения для конечно-разностного метода), определить среднее значение ρ_0 электрического сопротивления (начальное приближение для проекционной матрицы $\bar{\rho}^{(0)}$) и коэффициенты формы трубок тока (тесты для анализа качества замены реальных трубок эквивалентными) в исследуемой области, получить оценку степени ее неоднородности, установить связь разрешающей способности метода с количеством позиций n , числом контактов m и их длиной l_k . Рассмотрим особенности перечисленных этапов.

Выбор схемы построения системы сеточных уравнений

Для построения системы сеточных уравнений в среде, свойства которой в каждой ячейке сетки могут быть различны (рис. 2), используем уравнение для поля в интегральной форме [8]. Для всех внутренних узлов области (нумерация слева направо и сверху вниз) получаем однотипные уравнения с погрешностью порядка $O(h^2)$:

$$U_{p,q+1}k_{p,q+1} + U_{p-1,q}k_{p-1,q} + U_{p,q-1}k_{p,q-1} + U_{p+1,q}k_{p+1,q} - U_{p,q}(k_{p,q+1} + k_{p-1,q} + k_{p,q-1} + k_{p+1,q}) = 0, \quad (8)$$

$$k_{p-1,q} = (\sigma_{p,q-1} + \sigma_{p,q})/2; \quad k_{p,q-1} = (\sigma_{p,q-1} + \sigma_{p+1,q-1})/2; \quad k_{p,q+1} = (\sigma_{p+1,q} + \sigma_{p,q})/2;$$

$$\sigma_{i,j} = 1/\rho_{i,j}; \quad \sigma_{p,q} = 1/\rho_{pq}; \quad k_{p+1,q} = (\sigma_{p+1,q-1} + \sigma_{p+1,q})/2.$$

Погрешность порядка $O(h^3)$ обеспечивается решением задачи на последовательности сеток с шагами $h_1 = H/4$ и $h_2 = H/8$ (H – размер элиза). При этом не исключается возможность использования неравномерных сеток. Краевое условие (3) реализуется введением “фиктивных” точек вне исследуемой области на расстоянии h от ее границы и приравниванием потенциалов “фиктивных” точек потенциалам соседних граничных точек. Система сеточных уравнений решается методом верхней релаксации.

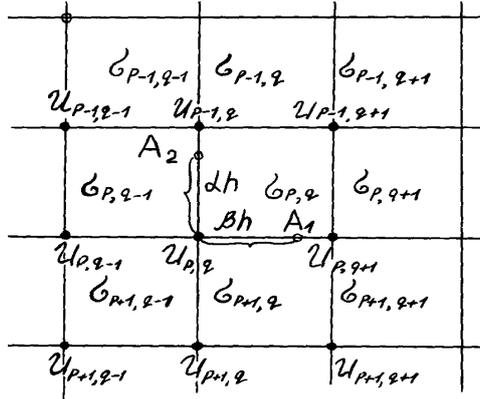


Рис. 2

Получение начального приближения для поля потенциалов

Аналитическое начальное приближение в предположении однородной среды для поля потенциалов двумерной области (рис. 1) с минимальными затратами памяти и машинного времени получаем методом теории функций комплексного переменного путем отображения исследуемой области в плоскости Z на верхнюю полуплоскость Z_1 , поле потенциалов в которой для каждой из L краевых задач $U_L(x_1, y_1)$ находится так [9]:

$$U_L(x_1, y_1) = \text{Re} \int_0^{z_1} \left[\prod_{i=1}^m (t - a_i)(t - b_i) \right]^{-0.5} \sum_{i=1}^{m-1} A_i t^{(m-1)-i} dt + A_m, \quad (9)$$

где a_i, b_i – координаты начал и концов контактов в плоскости Z_1 ; m – общее число контактов.

Задача отображения многоугольной области решается с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца, односвязной или двухсвязной области произвольной формы – методом тригонометрической интерполяции [10]. Постоянные A_k ($k=1, 2, \dots, m-1$) в (9) определяются из удовлетворения краевых условий (2) на контактах. Получающаяся система разрешима и приводится к виду

$$\overline{F} \cdot \overline{A} = \overline{V}, \quad (10)$$

где

$$\overline{F} = \begin{bmatrix} F_{1,m-2} & F_{1,m-3} & \dots & F_{1,0} \\ F_{2,m-2} & F_{2,m-3} & \dots & F_{2,0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{m-1,m-2} & F_{m-1,m-3} & \dots & F_{m-1,0} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

\overline{A} – вектор-столбец коэффициентов $[A_1, A_2, \dots, A_{m-1}]$; \overline{V} – вектор-столбец разностей потенциалов контактов $[U_2 - U_1, U_3 - U_2, \dots, U_m - U_{m-1}]$.

Элементы $F_{k,l}$ матрицы \overline{F} – гиперэллиптические интегралы вида

$$F_{k,l} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \left[\prod_{i=1}^m (t-a_i)(t-b_i) \right]^{-0,5} t^l dt \quad , \quad (12)$$

вычисляемые с использованием квадратурных формул наивысшей степени точности после приведения интервала интегрирования к стандартному $(-1,1)$ и выделения особенностей вида $(1-x^2)^{-0,5}$ в весовую функцию [11]. Константа A_m находится по (9) при $U_L(x_1, y_1)=U_k$ и интегрировании в пределах от 0 до a_k для любого k . По соотношениям (9) определяем начальное приближение $\overline{U}^{(0)}$ для потенциалов сеточных узлов в исходной плоскости Z после вычисления их координат в верхней полуплоскости Z_1 .

Получение начального приближения для проекционной матрицы

По известной структуре поля потенциалов (9), полученной в предположении однородной среды, рассчитываем коэффициенты формы $n_{i,jr}$ сопротивлений $R_{i,j}$ [12]:

$$n_{k,lr} = x_{k,l}, \quad n_{k,pr} = (x_{k,p} - x_{k,p-1}), \quad n_{k,mr} = x_{k,m-1}, \quad x_{k,q} = \det[\overline{F}] / \det[\overline{E}_{k,q}], \quad (13)$$

где $k=1, 2, \dots, m; p=2, 3, \dots, m-1; q=1, 2, \dots, m; m$ – число контактов по периметру структуры; $\det[\overline{F}]$ – определитель матрицы \overline{F} , описанной в (11), (12); $\det[\overline{E}_{k,q}]$ – определитель матрицы $\overline{E}_{k,q}$, получаемой из матрицы \overline{F} путем замены ее q -й строки $(F_{q,m-2}, F_{q,m-2}, \dots, F_{q,0})$ строкой с элементами $(E_{k,m-2}, E_{k,m-2}, \dots, E_{k,0})$.

Элементы $E_{k,l}$ имеют вид

$$E_{k,l} = (-1)^{k-1} \int_{a_k}^{b_k} \left[\prod_{i=1}^m (t-a_i)(t-b_i) \right]^{-0,5} t^l dt \quad , \quad (14)$$

и вычисляется аналогично элементам $F_{k,l}$ (12).

Начальное приближение ρ_0 для проекционной матрицы $\overline{\rho}^{(0)}$ получаем следующим образом. В предположении однородности среды в пределах трубок тока определяем удельные сопротивления $\rho_{i,j}$ для каждой из $n(n-1)/2$ трубок :

$$\rho_{i,j} = R_{i,j} / n_{i,j} \quad . \quad (15)$$

Значение ρ_0 получаем усреднением величин $\rho_{i,j}$ по (15):

$$\rho_0 = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \rho_{i,j} \quad . \quad (16)$$

Очевидно $\rho_{i,jmin} < \rho_0 < \rho_{i,jmax}$, где $\rho_{i,jmin}$, $\rho_{i,jmax}$ – минимальное и максимальное из значений $\rho_{i,j}$ по (15).

Разрешающая способность и чувствительность

По-видимому, необходимо ввести понятия предельной и реальной разрешающих способностей. Предельная разрешающая способность определяется средней шириной δ трубок тока и зависит от геометрии области, количества, взаимного расположения и длины контактов l_k . Для заданной области, при выбранном способе расположения контактов известной длины по ее периметру, параметр δ зависит только от количества контактов и легко вычисляется по соотношениям (12) – (15) через усредненный коэффициент формы n_s :

$$\delta = l_{i,jmax} / n_s \quad , \quad n_s = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n-1} n_{i,jr} \quad , \quad (17)$$

где $l_{i,j\max}$ – наибольшее расстояние между контактами i и j .

Например, для прямоугольной структуры площадью $S=7,5 \times 11,25 \text{ мм}^2$ с 30 контактами ($n=m=30$) длиной $l_k=0,2$ мм, равномерно расположенными по периметру, $n_s=232$, $l_{i,j\max}=21,6$ мм и $\delta=0,1$ мм. Реальная разрешающая способность всегда ниже и определяется минимальным размером элиза $H_{\min}=(S/(MN))^{0,5}=0,4$ мм, где $MN \leq n(n-1)/2=435$. Размер $H=0,75$ мм $> H_{\min}$, соответствующий целым M и N (при равномерном расположении контактов $M/N=7,5/11,25$ мм, $N=1,5M$, $MN=1,5M^2$) получаем с учетом неравенств $H > \delta$ и $H \geq (3...4)l_k$. Для прямоугольной структуры площадью $S=5 \times 10 \text{ мм}^2$ с $m=2$, $n=30$ и $l_k=0,5$ мм учет простейшего условия $H_{\min} \geq (3...4)l_k = 1,25$ мм ($M \times N = 4 \times 8 = 32$) показывает, что проведение полного цикла из $n(n-1)/2=435$ измерений бесполезно. Предварительный анализ сразу выявляет низкую разрешающую способность ($n_s=2,4$, $l_{i,j\max}=11,7$ мм) и из условия $H_{\min} > \delta = 4,9$ следует, что в структуре может быть не более двух элизов.

В этих условиях необходимо увеличить предельную разрешающую способность, что, как показывают соотношения (12) – (15), возможно только за счет увеличения количества контактов m . Отметим, что снизить трудоемкость решения задачи, обеспечив одновременно высокую разрешающую способность, по крайней мере, в некоторой зоне области (особенно при повторном решении задачи с целью уточнения результата), возможно только при уменьшении общего количества элизов до приемлемой величины ($10^2 < MN < 10^4$) за счет использования неравномерной сетки.

При среднем значении сопротивления между контактами $i, j R_{i,j} = n_s \cdot \rho_0$ изменение сопротивления $\Delta R_{i,j}$, определяющее требования к точности (чувствительности) измерительных приборов, связано с изменением удельного сопротивления $\Delta \rho_{k,l}$ в элизе k, l следующим образом: $\Delta R_{i,j} = \Delta \rho_{k,l} \times H / \delta$.

Оценка степени неоднородности структуры

Гарантированную оценку $\rho(x, y)$ сверху (ρ_{\max}) и снизу (ρ_{\min}) находим для наихудшего случая (при оценке ρ_{\max} считаем, что пленка с $\rho = \rho_{\max}$ занимает только один из элизов, через которые проходит i, j – трубка; в остальных элизах – пленка с $\rho = \rho_0$):

$$\begin{aligned} [1 - (l_{i,j} / \alpha H)(1 - \rho_{i,j\min} / \rho_0)] = \rho_{\min} < \rho(x, y) < \rho_{\max} = \\ = \rho_0 [1 + (l_{i,j} / H)(\rho_{i,j\max} / \rho_0 - 1)], \end{aligned} \quad (18)$$

где $\rho_{i,j\min}$, $\rho_{i,j\max}$ – минимальное и максимальное значения $\rho_{i,j}$ по (15); $l_{i,j}$ – расстояние между контактами i и j в структуре; $\alpha \geq 1$ – количество элизов с $\rho = \rho_{\min}$, выбираемое из условия положительности квадратных скобок в (18).

Определение геометрии эквивалентных трубок тока

Для решения задачи (рис. 1) достаточно определить по известному на равномерной сетке с шагом h полю потенциалов граничные траектории линий тока. Конечными токами этих траекторий (для трубки между контактами i и j) являются точки A и B контакта j ; направление траекторий в целом – на контакт i , в каждой ячейке сетки – в сторону градиента потенциала. В таких границах протекает практически весь ток реальной трубки, граничные линии которой (в отличие от эквивалентной трубки) идут из точек A и B вдоль границы структуры в сторону роста потенциала до точек φ и ψ с наибольшим потенциалом на участках между контактами $j, j+1$ и $\gamma, \gamma-1$ соответственно.

Для получения компактных и удобных для реализации на ЭВМ соотношений примем, что для траекторий, идущих в ячейке p, q сетки соответственно вверх или вниз (вправо или влево), вертикальная (горизонтальная) координата точки траектории A определяется относи-

тельно нижележащего или вышележащего (лежащего правее или левее) узла сетки с той же горизонтальной (вертикальной) координатой (рис.2). Положение последующей точки A' в масштабе сеточной ячейки через координаты точки A определяется соотношениями:

$$A^{\odot} = (A_h^{\odot}, A_v^{\odot}) = \begin{cases} [A_h \pm (1 - \alpha)(1 - \beta)h, A_v \pm (1 - \alpha)(1 - \beta)h], \Delta U_h = \Delta U_v = 0 \\ [A_h, A_v \pm (1 - \alpha)h], \Delta U_h = 0, \Delta U_v \neq 0 \\ [A_h \pm (1 - \beta)h, A_v], \Delta U_h \neq 0, \Delta U_v = 0 \\ [A_h \pm (1 - \alpha)h\sigma\xi, A_v \pm (1 - \alpha)h], \sigma\xi \leq 1 - \beta, \sigma\xi \leq 1/(1 - \alpha) \\ [A_h \pm (1 - \beta)h, A_v \pm (1 - \beta)h/(\sigma\xi)], \sigma\xi > 1 - \beta, \sigma\xi > 1/(1 - \alpha), \end{cases} \quad (19)$$

где $\xi = \Delta U_h/\Delta U_v$ – отношение горизонтального и вертикального приращений потенциала в ячейке p, q сетки, через которую проходит траектория; σ – параметр, определяемый через проводимости соседних с p, q ячеек сетки.

В приведенных формулах знак “+” для $A'_h(A'_v)$ ставится при движении траектории в сторону роста индекса p (q) сеточных узлов. Параметр σ для траекторий с растущим индексом p и падающим q ($p \uparrow, q \downarrow$), с ($p \downarrow, q \downarrow$), ($p \downarrow, q \uparrow$) и ($p \uparrow, q \uparrow$) определяется (рис. 2) соответственно так:

$$\sigma = \begin{cases} (\sigma_{p,q} + \sigma_{p+1,q})/(\sigma_{p,q} + \sigma_{p,q-1}) & (20) \\ (\sigma_{p,q} + \sigma_{p+1,q})/(\sigma_{p,q} + \sigma_{p,q+1}) & (21) \\ (\sigma_{p,q} + \sigma_{p-1,q})/(\sigma_{p,q} + \sigma_{p,q+1}) & (22) \\ (\sigma_{p,q} + \sigma_{p-1,q})/(\sigma_{p,q} + \sigma_{p,q-1}). & (23) \end{cases}$$

Если исходная точка A принадлежит горизонтальному нижнему (верхнему) участку границы, то $\alpha=0$ в (19) и $\sigma_{p+1,q}=0$ в (20), (21) ($\sigma_{p-1,q}=0$ в (22), (23)). Если же точка A принадлежит вертикальному левому (правому) участку границы, то $\beta=0$ в (19) и $\sigma_{p,q-1}=0$ в (21), (23) ($\sigma_{p,q+1}=0$ в (21), (22)). Аналогичным образом находим направление и ячейку сетки, через которую проходит траектория из точки A' в точку A'' (координаты точки A'' находим по соотношениям (19) – (23), заменяя в них A на A' и A' на A''). После определения траекторий граничных линий тока из точек A и B контакта j (их конечными точками являются соответственно точки C и D контакта i), геометрию трубки тока между контактами i и j считаем известной. Отметим, что при $m = n$ для контакта i ($i=1, 2, \dots, n-1$) определяется геометрия $(n-i)$ трубок тока.

Работоспособность методики в приближении однородной среды проверялась на сетках с шагом h , равным $H/2, H/4, H/8$; потенциалы в узлах определялись методом теории функций комплексного переменного по формулам (9) – (12). Вычисления показали достаточность шага $h=H/4-H/8$ для полного выявления геометрии трубок тока.

Определение коэффициента формы

Коэффициент формы $n_{k,l}^{i,j}$ определяется следующим образом. Участок трубки тока, описываемый в пределах элиза k, l ломаными линиями (рис. 3), разбивается на N элементарных прямоугольных элементов с неоднородным полем (рис. 4, а) высотой Δx_m и поперечными координатами $y_{m,l}, y_{m,r}$, задаваемыми относительно оси симметрии сечения трубки на нижней, ближайшей к контакту источника, стороне элиза.

Результирующее сопротивление участка трубки тока в элизе k, l при i, j -измерении

находим суммированием сопротивлений r_m всех аппроксимирующих элементов $r_{k,l}^{i,j} = \sum_{m=1}^N r_m$.

Для получения малой (<0,01%) погрешности определения $r_{k,l}^{i,j}$ необходимо, чтобы $y_m / \Delta x_m \geq 7$. Из обобщенной структуры аппроксимирующего элемента (рис. 4, а) с верхним 1 и нижним 2 условными контактами, рассчитываемого методом теории функций комплексного переменного, в зависимости от характера поведения граничных траекторий трубки выявим четыре упрощенных варианта и приведем для них расчетные соотношения.

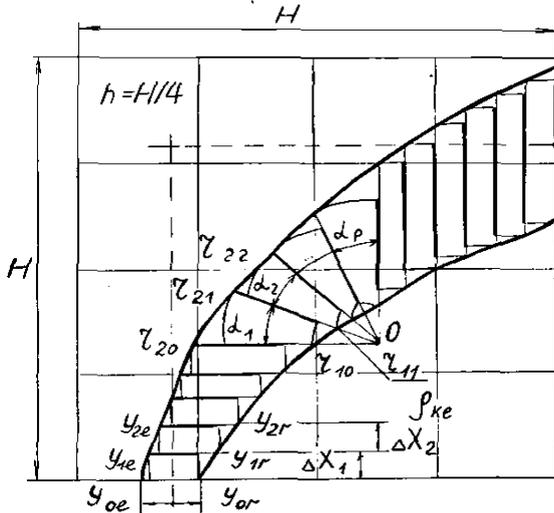


Рис. 3

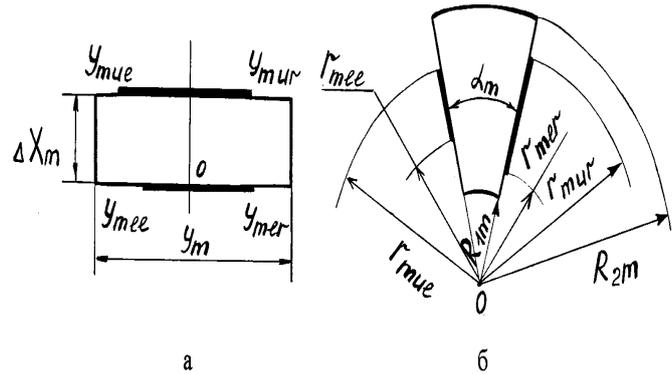


Рис. 4

В случае $y_{m,l} \geq y_{m-1,l}$, $y_{m,r} \geq y_{m-1,r}$ (рис. 3) координаты контакта 2 m -го элемента $y_{m,ul} = y_{m,ul} = y_m/2$, длина прямоугольника $y_m = y_{m-1,l} + y_{m-1,r}$, координаты контакта 1 $y_{m,lr} = y_{m-1,l} - y_{cm}$, $y_{cm} = (y_{m-1,l} - y_{m-1,r})/2$, $y_{m,lr} = y_{m-1,r} + y_{cm}$, сопротивление r_m

$$r_m = \rho_{k,l} (\pi/2) / \{ \ln 4 + \alpha\beta - 0,5 \exp[-2\alpha(1 - (\beta + \gamma)/2)] [1 + \exp(-2\alpha\gamma)] \}, \quad (24)$$

$$\alpha = \pi y_m / (4 \Delta x_m), \quad \beta = 2(y_{m,lr} + y_{m,ul}) / y_m, \quad \gamma = 2(y_{m,lr} - y_{m,ul}) / y_m.$$

В случае $y_{m,l} < y_{m-1,l}$, $y_{m,r} < y_{m-1,r}$ получаем $y_{m,lr} = y_{m,lr} = y_m/2$, $y_m = y_{m,l} + y_{m,r}$, $y_{cm} = (y_{m,l} - y_{m,r})/2$, $y_{m,ul} = y_{m+1,l} - y_{cm}$, $y_{m,ur} = y_{m+1,r} + y_{cm}$, а величина сопротивления r_m определяется по (24) с заменой в соотношениях для β и γ индекса l на u .

В случае $y_{m,l} < y_{m-1,l}$, $y_{m,r} > y_{m-1,r}$ получаем $y_{m,ur} = y_{m,ul} = y_m/2$, $y_m = y_{m,l} + y_{m-1,r}$, $y_{cm} = (y_{m,l} - y_{m-1,r})/2$, $y_{m,ul} = y_{m+1,l} - y_{cm}$, $y_{m,lr} = y_{m-1,r} + y_{cm}$,

$$r_m = \rho_{k,l} (\pi/2) / \{ \ln 4 + \alpha\beta - 0,5 \exp[-\alpha(\delta - \theta)] [1 - \exp(-2\alpha\theta)] \}, \quad (25)$$

$$\delta = 2(y_{m,lr} + y_{m,ul}) / y_m, \quad \theta = 2(y_{m,lr} - y_{m,ul}) / y_m.$$

Наконец, в случае $y_{m,l} > y_{m-1,l}$, $y_{m,r} < y_{m-1,r}$ получаем $y_{m,ul} = y_{m,lr} = y_m/2$, $y_m = y_{m-1,l} + y_{m,r}$, $y_{cm} = (y_{m-1,l} - y_{m,r})/2$, $y_{m,ur} = y_{m+1,r} + y_{cm}$, $y_{m,lr} = y_{m-1,l} - y_{cm}$, а величина r_m определяется по (25) с заменой в соотношениях для δ и θ индексов l на r .

В случае, когда трубка тока пересекает не противоположные, а соседние стороны эллиза, разбиение на элементарные аппроксимирующие прямоугольники ведется от обоих граничных сечений, расположенных под углом $\pi/2$, и сопровождается выделением в средней области произвольного дугового участка с углом $\pi/2$ и центром в точке O пересечения линий разбиения. Процесс разбиения завершается при достижении точкой O такого положения, при котором для каждого из P элементарных дуговых аппроксимирующих элементов (рис. 4, б),

получаемых из дугового участка с углами $\alpha_m \leq 6^\circ$ ($\sum_{m=1}^P \alpha_m = \pi/2$) и радиусами R_{1m}, R_{2m} ($m=0, 1, \dots, P$), выполняется неравенство $R_{2m} / R_{1m} \geq \exp(5\alpha_m)$. При этом дуговой элемент рис. 4, б общего вида сводится конформным отображением $\xi = (\pi/\alpha_m) \ln[z/(R_{1m}R_{2m})^{1/2}]$ к прямоугольному элементу с параметрами $\Delta x_m=1, y_m=2f(R_{2m}), y_m/\Delta x_m \geq 5$, методика расчета которого изложена выше.

По известным величинам $r_{k,l}^{i,j}, \rho_{k,l}$ и $\Delta U_{k,l}$ (разность потенциалов на границах участка трубки тока в элизе k, l) находим коэффициент формы $n_{k,l}^{i,j} = r_{k,l}^{i,j} / \rho_{k,l}$ и величину тока трубки $I_{i,j} = \Delta U_{k,l} / r_{k,l}^{i,j}$ (погрешность в определении потенциала первого порядка дает погрешность второго порядка при определении величины коэффициента формы). Сравнение найденных и измеренных токов с учетом числа верных знаков в последних позволяет своевременно завершить вычислительный процесс, сохранить корректность постановки задачи [6]. Зная величину $I_{i,j}$ и разности потенциалов на границах участков трубки в других элизах, находим оставшиеся коэффициенты $n_{k,l}^{i,j}$ (коэффициент формы эквивалентной трубки в предположении однородной среды с погрешностью менее 1% совпадает с коэффициентом реальной трубки по (13)). Отметим, что использование аппроксимирующих элементов с однородным полем (условные контакты 1 и 2 по всей длине прямоугольника рис. 4, а и дугового элемента рис. 4, б) не позволит решить поставленную задачу, так как суммарное накопление погрешности с ростом N опережает ее уменьшение за счет сближения истинной и аппроксимирующей фигур [10].

Алгоритм реконструкции изображения

В основе предложенного алгоритма реконструкции лежит соотношение (5), вырождающееся в случае узких ($H \geq 20\delta$) трубок тока в соотношение (6). Задача реконструкции после формирования матрицы \bar{R} измеренных значений, исходной матрицы коэффициентов формы $\bar{n}^{(0)}$ и исходной проекционной матрицы $\bar{\rho}^{(0)}$ решается по соотношению [1, 2]:

$$\bar{R} = \bar{\rho} \cdot \bar{n} + \bar{e}. \quad (28)$$

Работа алгоритма основана на определении величины погрешности \bar{e} по (29) для некоторого значения $R_{i,j}$ и внесении в проекционную матрицу $\bar{\rho}$ поправок, пропорциональных полученному значению погрешности \bar{e} и коэффициенту формы \bar{n} в элизах так, чтобы для новых значений $\bar{\rho}$ погрешность \bar{e} стала равна 0. Новое $m+1$ значение вектора $\bar{\rho}$ в элизах рассчитывается из предыдущего m -го значения по формуле

$$\rho_{k,l}^{(m+1)} = \rho_{k,l}^{(m)} + H^{i,j} \cdot n_{k,l}^{i,j} \quad (29)$$

где k, l – координаты элизов ($k=1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, N$); $H^{i,j}$ – коэффициент поправки для i,j -го измерения; Коэффициент поправки $H^{i,j}$ считается по формуле

$$H^{i,j} = (R_{i,j} - \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \rho_{k,l}^{(m)} \cdot n_{k,l}^{i,j}) / \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N n_{k,l}^{i,j} \cdot n_{k,l}^{i,j}. \quad (30)$$

Последовательность решения задачи

Окончательно задача (1)–(4) решается в следующей последовательности.

1. По заданной точности восстановления зависимости $\rho(x,y)$ определяется минимальный размер элиза H и общее количество элизов MN .

2. По соотношениям (11) – (14) с учетом конструктивно-технологических ограничений на длину l_k контактов, их взаимного расположения и количества позиций n_{\max} проверяется возможность построения измерительной схемы с требуемыми предельной и реальной разрешающими способностями ($H > \delta$, $H > l_k$) при $n(n-1)/2 \geq MN$ и $m \leq n$. Результаты анализа позволяют выбрать измерительную схему (конкретные значения m и n , $n \leq n_{\max}$, $m \leq n$), окончательно определить размер элиза H и количество элизов MN .

3. Проводится дискретизация исследуемой области на элизы с использованием регулярной (реже нерегулярной) сетки, нумерация элизов и позиций контактов.

4. Проводится $n(n-1)/2 \geq MN$ измерений токов I_{ij} ($i=1, 2, \dots, n-1; j=i+1, i+2, \dots, n$) по схеме рис.1 с погрешностью порядка 0,1...0,5%, формируется матрица \bar{R} . Практически R_{ij} можно получить, обработав на ЭВМ результаты $n(n-1)/2$ независимых измерений сопротивлений исследуемой структуры.

5. По соотношениям (11)–(14) получаем начальные приближения для поля потенциалов всех краевых задач, начальные приближения для проекционной матрицы $\bar{\rho}^{(0)}$. Оцениваем степень неоднородности исследуемой структуры.

6. Определяем геометрию эквивалентных трубок тока, вычисляем коэффициенты формы $n_{k,l}^{i,j}$ (для узких трубок – длины траекторий $d_{k,l}^{i,j}$). Формируем исходную матрицу $\bar{n}^{(0)}$ ($\bar{d}^{(0)}$) указанной в [1, 2] формы.

7. Критерием окончания процесса при использовании матрицы \bar{d} является условие (7); при использовании матрицы \bar{n} – достижение равенства (в пределах погрешности измерений) матриц рассчитываемых и измеренных токов $|I_{ijr} - I_{ij}| \leq \epsilon + \nu$, где $\nu = 0,02 \dots 0,03$ – погрешность вычислений. При выполнении критерия поставленная задача считается решенной, а матрица $\bar{\rho}$ – решением. В противном случае переходим к п.8.

8. Осуществляем цикл реконструкции (3–5 итераций) по соотношениям (29)–(30). Уточняем с помощью конечно-разностного метода поля потенциалов всех краевых задач на последовательности сеток с шагами $h_1 = H/4$, $h_2 = H/8$, используя предыдущие значения потенциалов в качестве начального приближения. Уточняем геометрию трубок тока, вычисляем коэффициенты формы $n_{k,l}^{i,j}$ (для узких трубок – длины траекторий $d_{k,l}^{i,j}$). Корректируем содержимое матриц \bar{n} (\bar{d}) и переходим к п. 7. Отметим, что окончательное решение (при известной структуре поля) может быть получено с учетом реального неравномерного распределения тока в трубках.

Экспериментальные результаты

Работоспособность методики проверялась на моделях из резистивной бумаги ЭТБ-2М размерами 300×450 мм с 30 равномерно расположенными по периметру прижимными контактами ($m=n=30$) длиной $l_k = 8$ мм. Размеры элиза $H = 30 \times 30$ мм, количество элизов $10 \times 15 = 150$. Дефекты создавались вклеиванием в исходную бумагу участков бумаг с другими ρ . Погрешность выполнения условия $I_{i,j} = I_{j,i}$ (порядка 3%) при проведении полного цикла из $n(n-1) = 870$ измерений показала достаточное качество контактов модели.

Обработка результатов измерений осуществлялась на ПЭВМ. Минимальный шаг сетки $h_2 = h_1 = H/8 = 3,75$ мм, максимальное количество узлов 9600. Проверена работоспособность всех частных методик: определения среднего значения $\rho = \rho_0$; оценки степени неоднородности; определения поля потенциалов методами теории функций комплексного переменного и конечно-разностным; определения трубок тока и коэффициентов формы.

Заданное распределение $\rho(x,y)$ в модели (размеры дефектов и расстояния между ними

равны или кратны размерам элиза) восстанавливалось с погрешностью, не превышающей 7%, причем значительная доля этой погрешности связана, по-видимому, с неоднородностью и анизотропией бумаги ($\approx 3\%$), качеством контактов модели ($\approx 3\%$), а также погрешностью определения (по величине падения напряжения на дополнительных резисторах $6,2 \text{ Ом} \pm 1\%$) токов между контактами. В случае, когда размеры дефектов оказывались меньше размеров элиза, значение ρ в нем восстанавливалось практически как усредненное по площади элиза. Расчет с использованием матрицы \bar{d} приводит к росту погрешности до 12–15%.

Исследовалась и структура с измерительной схемой, отличающейся низкой разрешающей способностью. Подтверждена целесообразность ее использования для определения среднего значения ρ_0 пленки.

Выводы

1. Предложена и экспериментально проверена методика определения распределения электрического сопротивления в двумерной токопроводящей области, базирующаяся на методе томографии и учитывающая нелинейность траекторий линий тока и их зависимость от искомого распределения. Методика обобщается на трехмерные задачи, в которых конечно-разностный метод полностью вытесняет метод теории функций комплексного переменного, эффективный только в двумерных или сводимых к ним задачах. С учетом аналогии методика применима и для определения распределения диэлектрической проницаемости и коэффициента теплопроводности в двух- и трехмерных областях.

2. Предложена методика решения систем внутренних обратных краевых задач с уравнением вида (1), краевыми условиями (2),(3) и исходными данными в постановке (4). Методика допускает обобщение на системы с уравнением вида $\text{div}[(1/\rho)\text{grad}U] - qU = F$ и краевым условием (вместо (2), (3)) $\alpha U + \beta \partial U / \partial n = v$ ($\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, v – заданные гладкие или кусочно-гладкие функции, $\alpha + \beta > 0$), причем определению (при соответствующем увеличении количества и модификации измерений в (4)) подлежат зависимости $\rho(x,y)$ и $q(x,y)$ или $\rho(x, y, U)$ и $q(x, y, U)$. Такое обобщение предполагается темой самостоятельной статьи.

Библиографический список

1. **Жилинскас, П.Ю.** Определение распределения электрического сопротивления методом реконструктивной томографии // ЖТФ. 1994. Т.64. Вып. 2. С. 83–95.
2. **Хермен, Г.** Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии / Г. Хермен. – М.: Мир, 1983. – 352 с.
3. **Reineke, N.** Visualisation of transient two-phase flows using multielectrode capacitance sensors for electrical tomography / N. Reineke, D. Mewes // Two-Phase Modeling and Experim. 1995. P. 739–750.
4. **Strizzolo, C.N.** Capacitance sensors for measurement of phase volume fraction in two-phase pipelines // IEEE Trans. of Instrum. and Meas. 1993. 42. Т. 3. P. 726–729.
5. **Сушко, И.А.** Визуализация распределений поверхностной проводимости томографического сечения методом зон проводимости // Радиоэлектроника. Изв. вузов. 2013. № 7. С. 60–67.
6. **Мацевитый, Ю.М.** Идентификация теплофизических свойств твердых тел / Ю.М. Мацевитый, С.Ф. Лушпенко. – Киев: Наукова думка, 1990. – 216 с.
7. **Коздоба, Л.А.** Методы решения обратных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Киев: Наукова думка, 1982. – 352 с.
8. **Демирчян, К.С.** Машинные расчеты электромагнитных полей / К.С. Демирчян, В.Л. Чечурин. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
9. **Мухелишвили, Н.И.** Сингулярные интегральные уравнения / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1968. – 511 с.

10. **Лаврик, В.И.** Конформные отображения физико-топологических моделей / В.И. Лаврик, В.П. Фильчакова, А.А. Яшин. – Киев: Наукова думка, 1990. – 376 с.
11. **Крылов, В.И.** Приближенное вычисление интегралов / В.И. Крылов. – М.: Наука, 1967. – 500 с.
12. **Ямпурин, Н.П.** Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений / Н.П. Ямпурин, Л.В. Широков, В.Д. Садков. – Арзамас: АГПИ, 2014. – 209 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.07.2015*

V.D. Sadkov, A.V. Lopatkin

**DETERMINING THE DISTRIBUTION OF ELECTRICAL RESISTANCE
IN THE CONDUCTIVE FILM BY A METHOD OF TOMOGRAPHY**

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

Technique of determining the distribution of electrical resistance in the conductive film, taking into account the nonlinearity of the trajectories of the streamlines and their dependence on the desired distribution. The method is based on the combined use of the finite-difference method, defining and clarifying the trajectory of streamlines, and reconstruction algorithm that detects the distribution of the electrical resistance along these lines. The method is suitable for solving problems on the distribution of permittivity and conductivity in multidimensional domains.

Key words: impedance tomography, conductive film, distribution of electrical resistance.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.465

Р.Х. Мазова, Е.А. Колчина, Е.А. Овчинникова, И.В. Ремизов

ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ В РАЙОНАХ ПЛАНИРУЕМЫХ ВАРИАНТОВ ПРОКЛАДКИ НОВОГО ГАЗОПРОВОДА РОССИЯ-ТУРЦИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Проводится численное моделирование волн цунами в черноморской акватории для оценки возможной цунамиопасности на побережьях в местах входа-выхода газопровода для двух сценариев планируемой прокладки новой линии газопровода «Россия – Турция».

Научный вклад: Теоретическая значимость исследований обусловливается новизной результатов численного моделирования и выявлением зависимости характеристик волнового режима от физических и геометрических параметров задачи. Практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью их непосредственного использования для решения прикладных задач цунамирайонирования побережий.

Результат: Показано, что при возможных умеренных землетрясениях опасности от воздействия волн цунами для реализации рассмотренных направлений прокладки газопроводов не наблюдается. При более сильных землетрясениях опасность разрушения инфраструктуры возможна. В связи с этим, необходимо детальное цунамирайонирование локальных участков побережья в районах входа-выхода планируемых газопроводов.

Новизна: Обусловлена новизной результатов исследования волновых характеристик цунами, порождаемых клавишным сейсмическим механизмом, для анализа реальной задачи оценки цунамиопасности для предполагаемого пути прокладки газопроводов.

Ключевые слова: цунами, сейсмическая и цунамиопасность, цунамигенные землетрясения, волны цунами, численное моделирование, Черноморское побережье.

Введение

Хорошо известно, что безопасность прокладки и эксплуатации подводных газопроводов требует оценки сейсмической и оползневой опасности в районе участков подводных склонов, где эти газопроводы выходят на сушу. Оценка сейсмической и цунамиопасности Черного моря (как российского, так и других побережий данной акватории) является важнейшей задачей последних десятилетий [1–7]. Актуальность таких расчетов до некоторого времени была связана с проблемой эксплуатации морского участка газопровода Россия-Турция (проект «Голубой поток»), соединяющий территории этих стран по дну Черного моря, который функционировал в условиях повышенной сейсмичности и оползневой опасности российского и турецкого склонов Черного моря [8]. На рис. 1 стрелками показано движение материковых плит, создающее напряжение в области разломов. Это обуславливает также и высокую цунамичность этого региона, постепенно возрастающую с запада на восток вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей [9].

В работах [10–18] было проведено численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря и дан прогноз по высотам волн на побережьях. В работах [15–18] авторами было выполнено цунамирайонирование побережий (до пятиметровой изобаты) для ряда сценариев подводных землетрясений от наиболее вероятных, потенциальных сейсмических очагов. В настоящей работе предполагается проведение

подобных расчетов для конкретных участков побережий, где планируются варианты строительства терминалов новых газопроводов по дну Черного моря, в том числе нового российско-турецкого газопровода «Турецкий поток».



Рис. 1. Карта разломов вдоль Черноморского бассейна и окружающих областей [9]

В первом из планируемых сценариев прокладки газопровода подводная трасса газопровода на значительном протяжении совпадает с коридором планировавшегося ранее проекта «Южный поток» и составляет 660 км. Затем газопровод проходит 250 км до турецкого побережья и выходит на сушу в районе населенного пункта пп. Кыйыкей и Ипсала. С российской стороны морской терминал газопровода расположен в районе компрессорной станции «Русская» (вблизи Анапы) на побережье Черного моря. Во втором сценарии Турецкий сухопутный участок начинается в районе г. Самсун терминалом с газоизмерительной станцией «Дурусу», а российский сухопутный участок заканчивается компрессорной станцией «Береговая» (в районе Джубги) Краснодарского края на побережье Черного моря [18]. На рис. 2 приведены некоторые возможные варианты прокладки газопровода.

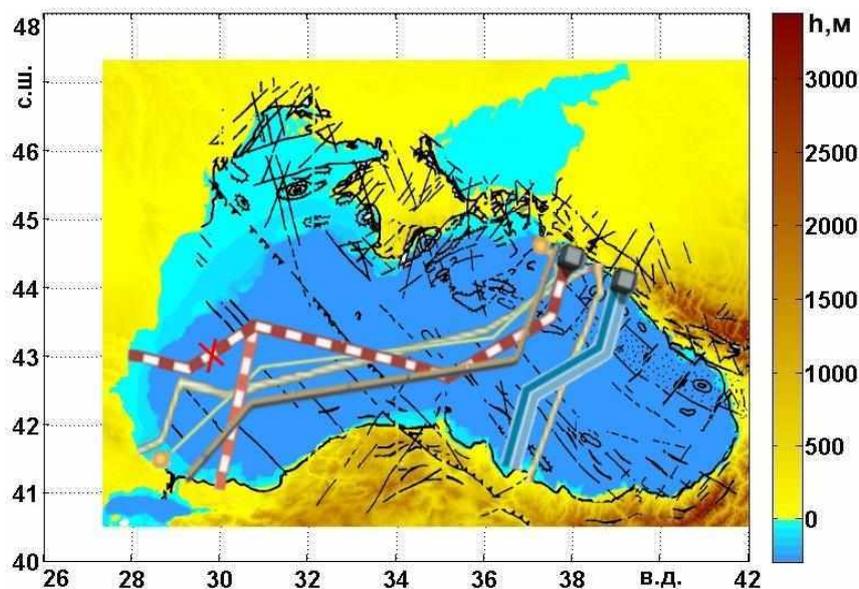


Рис. 2. Варианта расположения трубопроводов по дну акватории Черного моря [19]

Используя информацию о возможных зонах активных разломов и особенностей основных структур различных участков побережья [20, 21], было определено положение возможных сейсмических очагов. На рис. 3 приведена трасса возможного нового российско-

турецкого газопровода «Турецкий поток», который при выходе на турецкое побережье проходит через пп. Кыйыкей и Ипсала [19] (СЦЕНАРИЙ 1). В районах выхода и входа газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги. С турецкой стороны - это очаги под номерами 1, 2 и 3, а с российской – очаг расположен вблизи г. Анапа (4). Вдоль побережья на семиметровой изобате выставлены виртуальные мареографы - вдоль российского побережья № 1- 6, вдоль турецкого № 17-23.

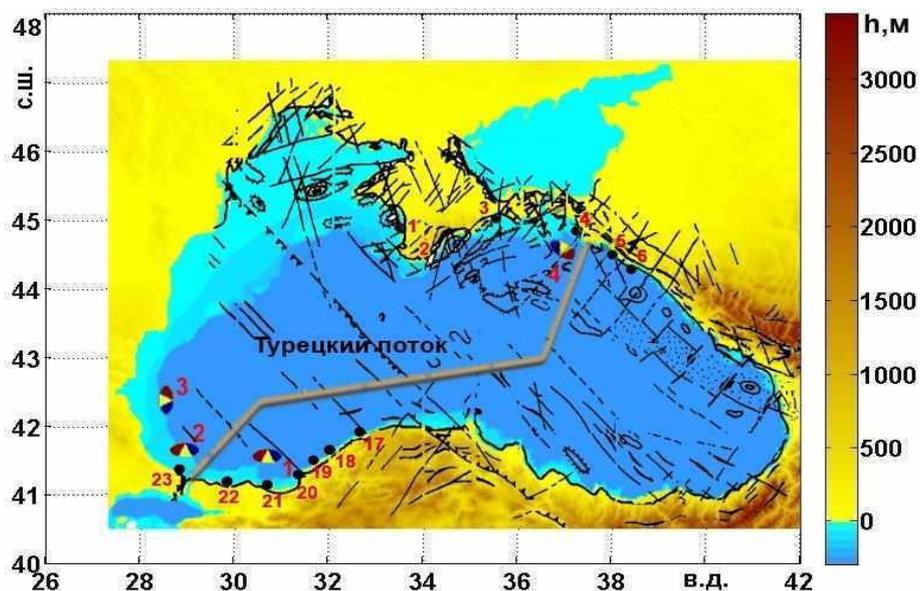


Рис. 3. Модельная трасса газопровода «Турецкий поток» (СЦЕНАРИЙ 1[19])

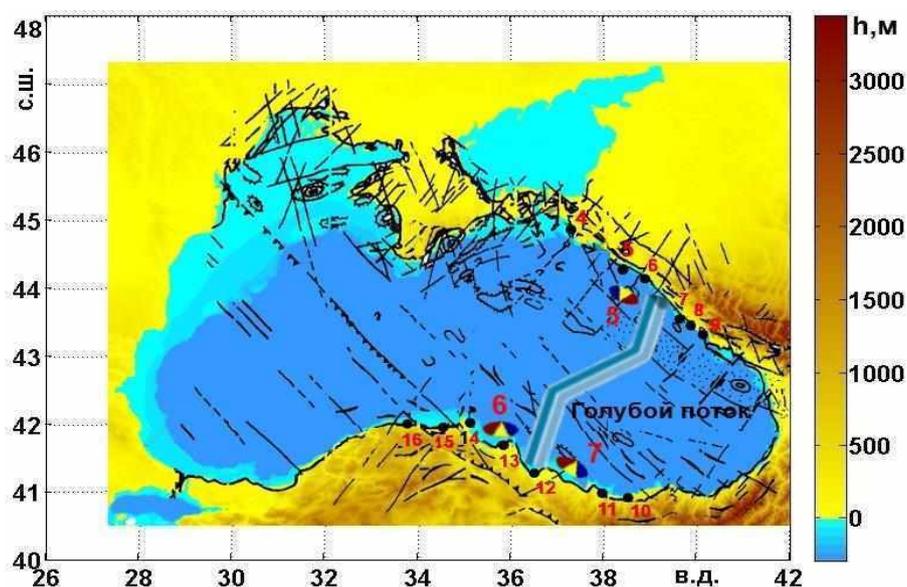


Рис. 4. Трасса газопровода «Новый голубой поток» 2 (СЦЕНАРИЙ 2[19])

На рис. 4 приведена трасса возможного газопровода для «сухопутно-морского» варианта «Нового голубого потока» газопровода в Турцию, который выходит из станции «Береговая» и на турецкое побережье приходит в п. САМСУН (СЦЕНАРИЙ 2). В районах выхода и входа газопровода на побережье расположены расчетные сейсмические очаги. С турецкой стороны это очаги под номерами 6 и 7, а с российской стороны - очаг 5. Вдоль побережья расположены виртуальные мареографы - вдоль российского побережья № 4-9, вдоль турецкого № 10-16. Можно видеть, что очаги для сценария 2, ориентированы так же, как и для первого сценария, разломами к береговой линии. Такое расположение очагов от-

вечает типичному характеру разломов и структур различных участков Черноморского побережья [20, 21].

Поскольку вероятность возникновения волн цунами, даже при умеренных землетрясениях, с магнитудой $M=7$ равна 0,81 [22], были выбраны два варианта возможных землетрясений: $M=7,0$ и $M=7,3$. Для оценки исходных параметров волн цунами, которые могут генерироваться сейсмическим источником, были использованы известные формулы связи магнитуды землетрясения и характерных параметров разрывов в межплитовой границе в зоне субдукции, разработанные для тектонически-активных регионов Земного шара, определяющих сейсмический очаг: протяженность разрыва в очаге, ширина разрыва и возможная высота вертикального смещения морского дна в очаге [22].

$$\begin{aligned} \lg L &= 0,59M - 2,44 \pm 0,16, \\ \lg W &= 0,32M - 1,01 \pm 0,15, \\ \lg \Delta u &= 0,82M - 5,46 \pm 0,42, \end{aligned} \quad (1)$$

где L – протяженность разрыва в очаге, км; W – ширина плоскости разрыва, км; Δu – остаточное смещение в очаге по моментальной магнитуде землетрясения, м. Для магнитуды $M=7$ длина разрыва в очаге (или длина большой оси эллипса) 50 км, ширина разрыва (ширина малой оси эллипса) 17 км. Остаточное смещение в очаге для магнитуд $M=7$ и $M=7,3$ приведены в табл. 3.1. Для магнитуды $M=7,3$ длина разрыва в очаге 74 км, а ширина разрыва 21 км. При генерации волн цунами существенна лишь вертикальная компонента остаточного смещения морского дна, поэтому для ее оценки необходимо знать, кроме магнитуды землетрясения, еще и механизм сейсмического очага. Зная механизм очага, или, задавая его из тектонических соображений и используя формулы (1), можно рассчитать вертикальную компоненту остаточного смещения морского дна в очаге и использовать это значение для моделирования генерации волн цунами [20, 23]. На основе данных работ [15, 16] были сконструированы сейсмические очаги эллипсоидной формы (рис. 3 и рис. 4), разделенные на три части, т.е. три блока-клавиши [15-18]. Согласно типичным зонам разломов [19] и типичной реализации движений клавиш-блоков в сейсмических очагах в ограниченных акваториях, было выбрано движение блоков в сейсмическом очаге, представленное в табл. 1.

Таблица 1

Номер блока (справа налево)	Время, с	Δu , м, $M=7,0$	Δu , м, $M=7,3$
1	30	-1,5	-2,0
2	10	2,1	3,0
3	10	1,8	3,9

Блоки движутся независимо, последовательно один за другим. При первом блоке расчетов для магнитуды землетрясения $M=7$ первый блок опускается вертикально вниз за 30 с на 1,5 м, затем второй блок быстро (за 10 с) поднимается вертикально вверх на 1,75 м и после его остановки третий блок поднимается вертикально вверх на 1 м за 10 с. Схема движения блоков для всех очагов, приведенных на рис. 1 и рис. 2, одинакова. При втором блоке расчетов для магнитуды землетрясения $M=7,3$ движения блоков аналогично, параметры заданы табл. 1.

В данной работе в качестве примера приведены результаты четырех расчетов от четырех сейсмических очагов, два из которых (очаг 1 и очаг 2) расположены в районе выхода на турецкое побережье трубопровода «Турецкий поток» (СЦЕНАРИЙ 1) (рис. 1), а два очага (очаги 6 и 7), расположены в районе выхода на турецкое побережье трубопровода «Новый Голубой поток» (СЦЕНАРИЙ 2) (рис. 2). Детальные расчеты приведены только для умеренного землетрясения с магнитудой $M=7$.

Численное моделирование возможного землетрясения и цунами

Моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса [15], построенного на основе схемы Sielecki [26], используя методы моделирования работы [27]. При моделировании брался временной шаг 200 с, удовлетворяющий условию Куранта. В береговой зоне на изобате 7 м использовались граничные условия (приближение вертикальной стенки) в последних узлах расчетной сетки.

Для рассмотрения процесса генерации волн цунами в клавишной модели сейсмического очага [14-17] и их распространения по акватории применяются уравнения теории мелкой воды. В двумерном случае система нелинейных уравнений мелкой воды запишется в виде [15, 24, 25]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = f_1, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = f_2, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\eta + H - \phi)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\eta + H - \phi)v] = \frac{\partial \phi}{\partial t}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где x, y – пространственные координаты по осям Ox и Oy соответственно; t – время; $u(x, y, t), v(x, y, t)$ – компоненты скорости по осям Ox и Oy ; $\eta(x, y, t)$ – возмущение свободной поверхности относительно ее спокойного уровня; H – максимальная глубина бассейна; $\phi(x, y, t)$ – изменение дна бассейна (учет характеристик динамического сейсмического очага); g – ускорение свободного падения. В зависимости от постановки задачи блоки в очаге могут двигаться последовательно с определенной временной задержкой (или без нее) с разными начальными скоростями. При этом формирование очага цунами занимает некоторое время. Поэтому динамика данного процесса в сейсмическом очаге будет определять формирование волновых фронтов, распространяющихся от очага цунами. Процесс распространения этих волн, их взаимодействие рассматривается с учетом реальной батиметрии. Как известно, в силу несжимаемости жидкости, в случае мгновенной подвижки в очаге смещение воды на поверхности будет точно повторять смещение дна в сейсмическом очаге. Формирование очага цунами будет происходить за время динамических смещений в сейсмическом очаге, в данном случае за время подъема блока t .

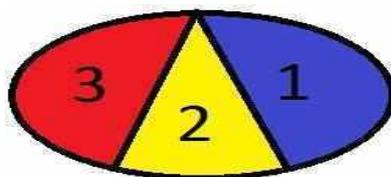


Рис. 5. Модельная геометрия сейсмического очага

СЦЕНАРИЙ 1. «Турецкий поток»

На рис. 6–11 приведены результаты численного моделирования для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 1). На рис. 6 можно видеть формирование очага цунами. Хорошо видно, что в первые 30 с формируется волна понижения, затем вертикальные смещения блоков на дне формируют горб воды на поверхности ($t = 50$ с), который затем начинает расплываться: $t = 80 - 120$ с. Движение на восток предваряется существенной волной понижения, а движение волнового фронта на юг и юго-запад характеризуется положительным горбом, высотой до 2 м. На рис. 6 приведено положение волновых фронтов для данного расчета для шести моментов времени. Как видно из рис. 6, волновой фронт, двигаясь на юго-восток, быстро достигает турецкого побережья в районе выхода газопровода, а, распространяясь по глубокой воде в

северо-запад, достигает морского участка выхода газопровода с российского побережья. Оценки показывают, что время распространения цунами в акватории от южного побережья (от очага *I*) до российского побережья (г. Ялта) составляет 3600 с. Можно видеть, что волна подходит к российскому берегу отрицательной фазой (волна понижения), а затем следует положительный горб воды. Этот эффект легко объясняется ориентацией отрицательного смещение в очаге землетрясения (рис. 6). На рис. 7 (верхняя панель, $t=2200$ с), хорошо виден цуг волн, направляющейся к российскому побережью, в котором первая волна – волна понижения. За ней следует положительный горб волны, сформированный положительными подвижками в очаге. Третья волна в цуге снова волна понижения.

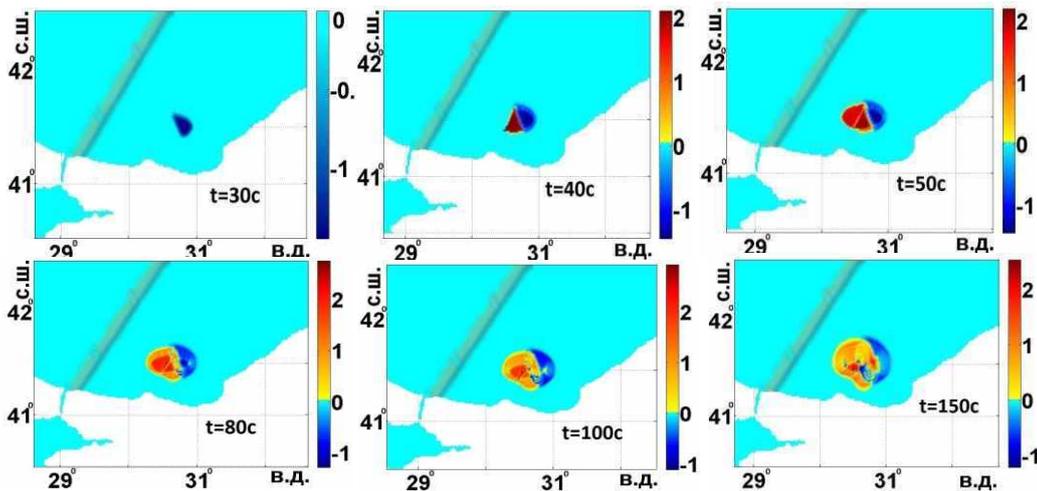


Рис. 6. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг *I*) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 150 с

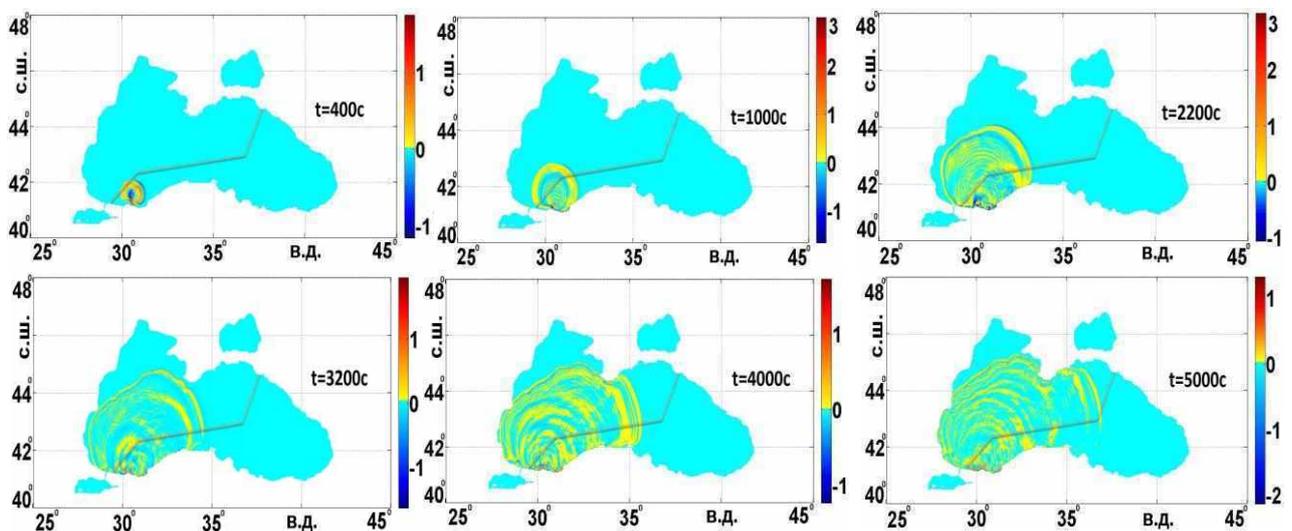


Рис. 7. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг *I*) для моментов времени:
 $t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 36 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 53 \text{ мин } 20 \text{ с};$
 $t = 1 \text{ ч } 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 1 \text{ ч } 23 \text{ мин } 20 \text{ с}$

Анализ мареограмм, полученных с виртуальных мареографов, приведенных на рис. 8, показал, что максимальные высоты волн на интервале с 28° по 32° составляют от 10 см до 1 м. Хорошо видно, что в зависимости от реализации движения подвижек в сейсмическом очаге волны к побережью будут подходить либо положительной фазой (волной наката) – это пп. 21, 22, 23, либо цунами будет начинаться с отхода воды от берега - пп. 20,1,2.

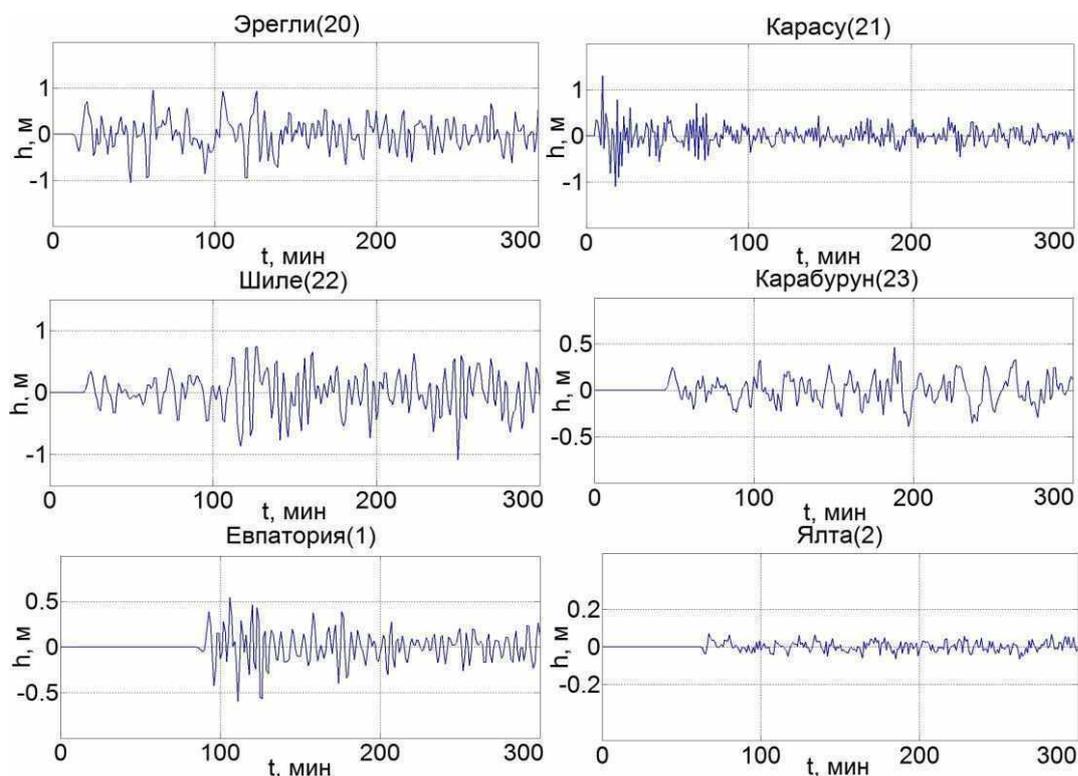


Рис. 8. Расчетные мареграммы при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 1) для четырех пунктов на турецком побережье (20-23) и для двух пунктов на российском (1 и 2)

На турецком побережье максимальная высота волны достигает 1,2 м (п. 21) и уменьшается до 0,3 м по мере приближения к месту выхода газопровода на сушу (п. 23). Наибольшая частота колебаний уровня воды наблюдается в п. 21. На российском побережье максимальная высота дошедшей волны 0,5 м достигается в п. 1, в то время как в п.2 амплитуда колебаний уровня воды только порядка 0,1 м.

Таблица 2

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 1	Максимальные высоты, м	Максимальное понижение уровня воды, м	Время дохода до пункта (ч, мин)	Фаза подхода волны (+) горб, (-) впадина
20	0,98	1,01	13 мин	-
21	1,2	1,05	4 мин	+
22	0,75	0,85	20 мин	+
23	0,47	0,4	45 мин	+
1	0,56	0,6	1 ч 26м	-
2	0,08	0,06	1 ч 02 м	-

Можно отметить, что частота колебаний уровня воды в п. 1 значительно выше, чем в п.2, что, возможно, связано с особенностями шельфовой зоны на каждом из участков. Основные данные расчета для этих пунктов приведены в табл. 2. Хорошо видно, что на симметричной изобате максимальная глубина впадины может превышать максимальную высоту горба.

Для этого же СЦЕНАРИЯ 1 рассмотрим локализацию сейсмического очага к западу от возможного положения газопровода (рис. 3, очаг 2). На рис. 9 приведено формирование очага цунами для этого случая (верхняя панель).

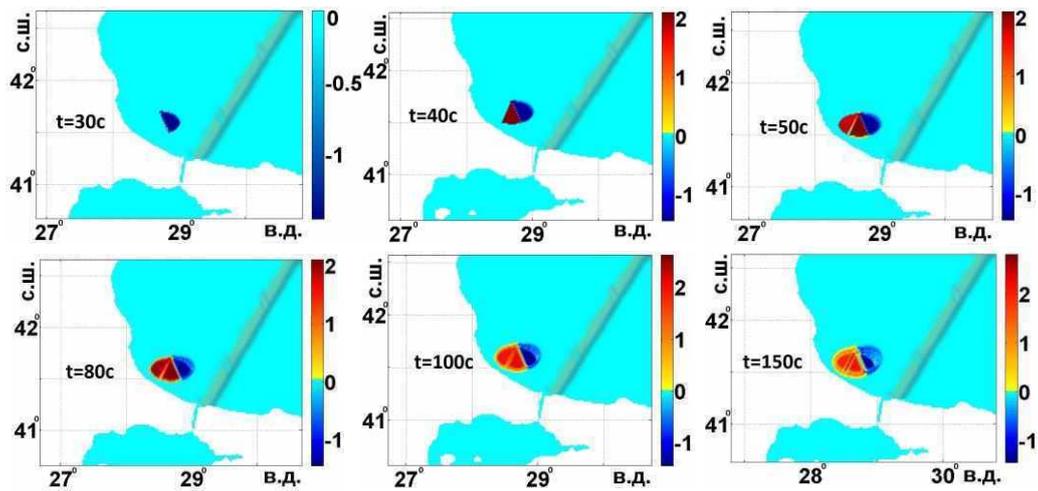


Рис. 9. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 150 с

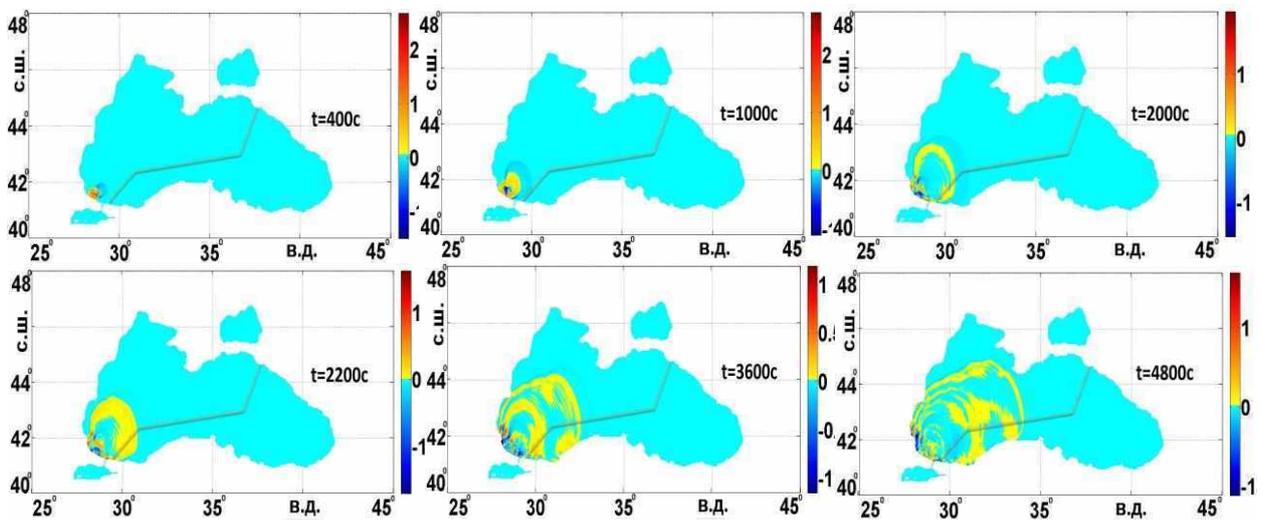


Рис. 10. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) для моментов времени:

$t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 33 \text{ мин } 20 \text{ с}; t = 36 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 1 \text{ час}; t = 1 \text{ ч } 20 \text{ мин}$

Видны хорошо сформированные на поверхности воды впадина и два горба. На рис. 9 приведена дальнейшая эволюция волновых фронтов: четко выражен фронт понижения, направленный на север и северо-восток. При этом сценарии волновой фронт достигает места выхода газопровода на турецком побережье за кратчайшее время после начала процесса. С другой стороны фронта волна по глубокой воде распространяется в северо-восточном направлении с относительно большой скоростью. Хорошо видно, что к месту начала морского участка газопровода на противоположном берегу волна подойдет за время больше 5000 с (рис. 9). На рис. 10 приведены расчетные мареограммы для первого сценария для очага 2 при $M=7,0$, для четырех пунктов на юго-западном побережье Черноморской акватории (20-23) и двух пунктов на российском побережье (1 и 2). В пп. 20, 21, 22 волна подходит к берегу незначительным понижением уровня.

В п. 23 можно отметить относительно большую высоту 1,8 м первого гребня и большую частоту колебаний уровня воды. На российском побережье (пп. 1,2) волны приходят откатом с максимальной высотой до 0,1 м. В табл. 3 приведены данные по максимальным высотам на семиметровой изобате, время дохода волны до определенного виртуального ма-

реографа и фаза подхода волны к берегу. Как следует из таблицы, во всех пунктах, кроме п. 23, волна подходит к берегу впадиной. В п. 23 волна доходит за кратчайшее время (5 мин), и имеет максимальные величины амплитуд наката и отката ~ 2 м. В п.22 волна доходит за 23 мин, и размах колебаний уровня в волне вдвое меньше. Во всех остальных пунктах максимальные значения повышения и понижения уровня воды в волне относительно невелики.

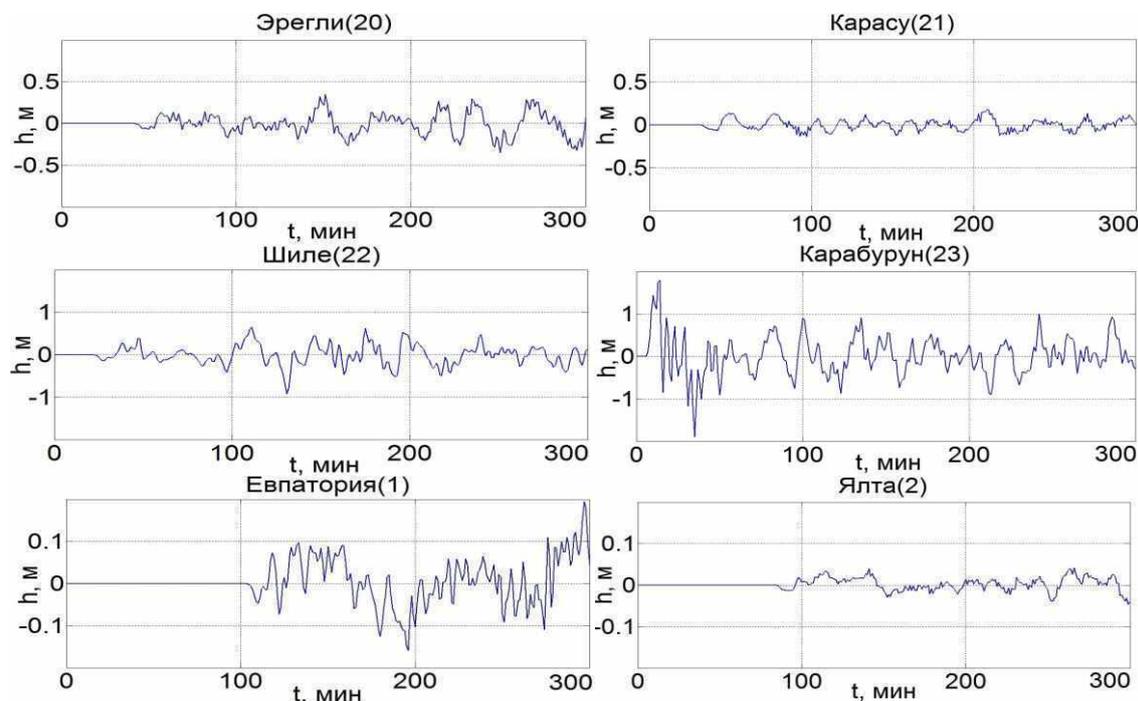


Рис. 11. Расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 1 (очаг 2) для четырех пунктов на турецком побережье (20-23) и двух пунктов на российском (1 и 2)

Таблица 3

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 1	Максимальные высоты на 7 м изобате, м	Максимальное понижение уровня воды на 7м изобате, м	Время дохода до пункта, (ч, мин)	Фаза подхода волны: (+) горб, (-) впадина
20	0,3	0,3	43 мин	-
21	0,2	0,15	33 мин	-
22	0,7	0,9	23 мин	-
23	1,8	1,9	5 мин	+
1	0,19	0,15	1 час 45 мин	-
2	0,04	0,04	1 час 26 мин	-

СЦЕНАРИЙ 2. «Новый голубой поток»

На рис. 12-14 приведены результаты численного моделирования для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б). На рис. 12 приведено формирование очага цунами (верхняя панель) и три начальных момента эволюции очага цунами до $t=120$ с, на рис. 13 дано положение волновых фронтов для шести моментов времени для этого сценария. Хорошо видно, что в месте выхода газопровода на сушу на турецком побережье волна появляется меньше, чем через 7 мин. С другой стороны волновой фронт продвигается в северо-восточном направлении, достигая места входа газопровода в морской участок на российском побережье за 46 мин. К российскому побережью первой подходит небольшая волна понижения, затем следует горб волны.

На рис. 14 приведены расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 для очага б при магнитуде землетрясения $M=7$ для четырех пунктов у турецкого побережья на юго-востоке Черноморской акватории (пп. 11-14) и двух пунктов на северо-востоке акватории у российского побережья (пп. 5 и 6). Хорошо видно, что в пп. 11,12, 5 и 6 волна подходит к берегу отрицательной фазой (откатом); в двух пунктах 13 и 14 первая волна положительная. Высоты волн у турецкого побережья в п.13 (вблизи места расположения турецкого терминала газопровода) лежат в интервале от 20 см до 1м.

А у места входа газопровода в морской участок на российском побережье (п. 6) максимальные высоты достигают 60 см.

В табл. 4 приведены данные для расчета по этому сценарию. Хорошо видно, что только в двух пунктах (п.13 и 14) волна подходит к берегу горбом, в то время как в остальных пунктах (11 и 12 на турецком побережье, 5 и 6 на российском побережье) цунами начинается с отхода воды от берега. Хорошо известно, что в этих случаях возможно значительное усиление высоты волны, следующей за волной отката [24].

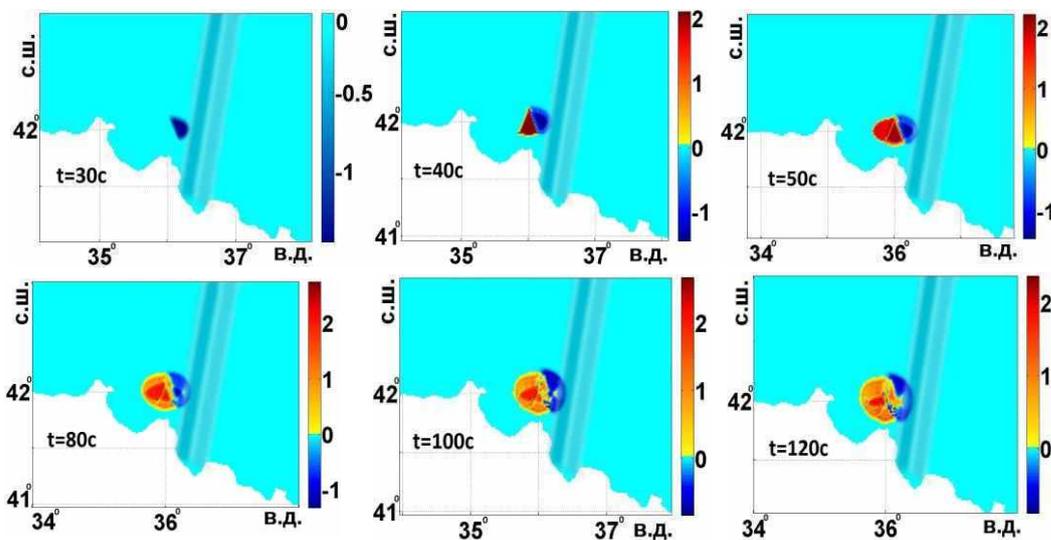


Рис. 12. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 120 с

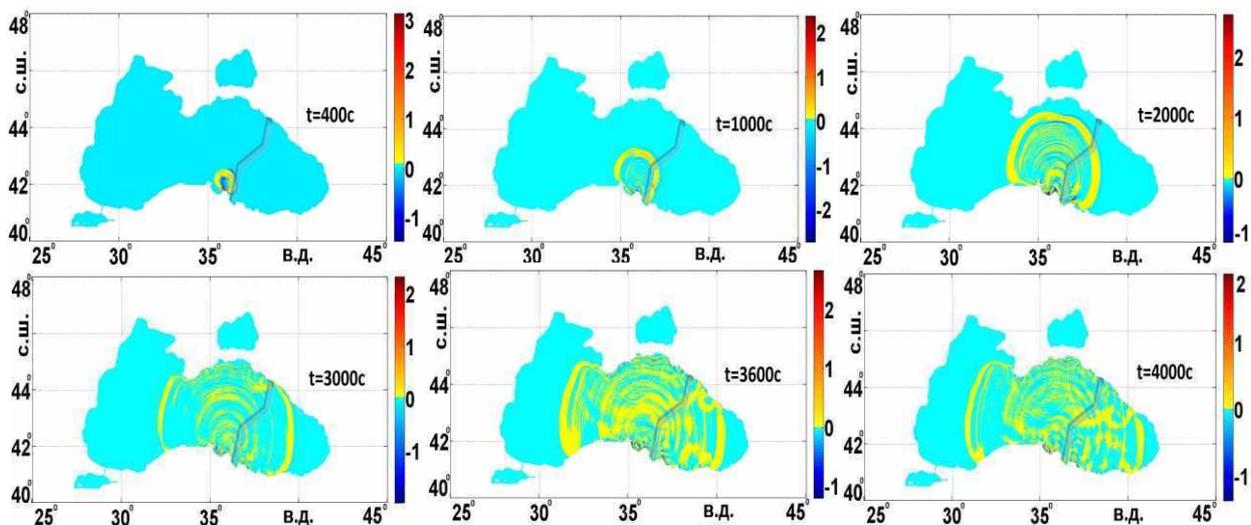


Рис. 13. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 2 (очаг б) для моментов времени:

$t = 6 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 16 \text{ мин } 40 \text{ с}; t = 33 \text{ мин } 20 \text{ с}; t = 50 \text{ мин}; t = 1 \text{ ч}; t = 1 \text{ ч } 6 \text{ мин } 40 \text{ с}$

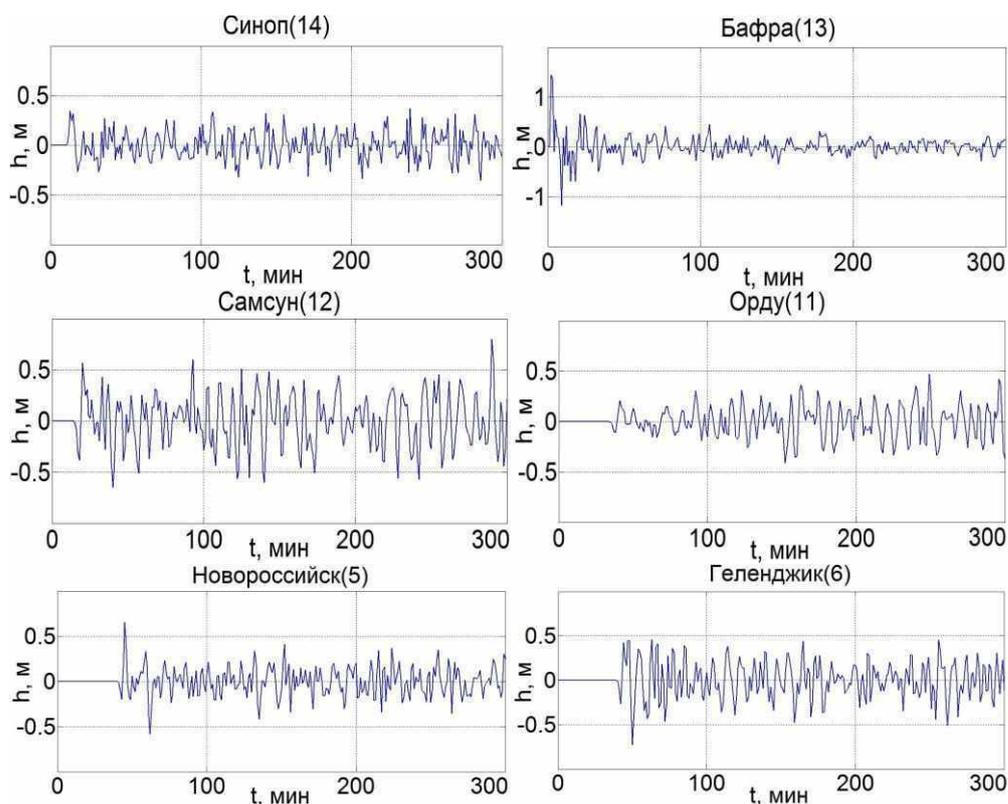


Рис. 14. Расчетные мареограммы для сценария 2 (очаг 6) для четырех пунктов на юго-востоке Черноморской акватории (11-14) и двух пунктов на российском побережье (5 и 6)

Таблица 4

Номер мареографа СЦЕНАРИЙ 2	Максимальные высоты, м	Максимальное понижение уровня воды, м	Время дохода до пункта (ч, мин)	Фаза подхода волны (+) горб, (-) впадина
11	0,47	0,38	34 мин	-
12	0,7	0,62	14 мин	-
13	1,43	1,2	1 мин	+
14	0,35	0,38	11 мин	+
5	0,65	0,6	41 мин	-
6	0,48	0,73	39 мин	-

Для СЦЕНАРИЯ 2 рассмотрим локализацию сейсмического очага к востоку от возможного положения газопровода (очаг 7). На рис. 15 приведена генерация данным очагом очага цунами и его эволюция в первые моменты времени. Как видно из рис. 7, очаг цунами на поверхности воды имеет дипольный характер: с восточной стороны формируется полусферический фронт волны понижения, в то время как с западной стороны фронт волны повышения имеет более резкую, вытянутую форму. Глубина понижения уровня с восточной стороны порядка 1 м, а высота подъема поверхности с западной стороны достигает 2 м. С ростом времени оба фронта волны расширяются, при этом глубина понижения с восточной стороны, заметно уменьшается ($\sim 0,5$ м) и область, разделяющая фронты понижения и повышения заметно расширяется. Наибольшие высоты в волне повышения (западный фронт волны) достигаются со стороны побережья, в то время как высота уровня на южной части фронта волны повышения несколько уменьшается.

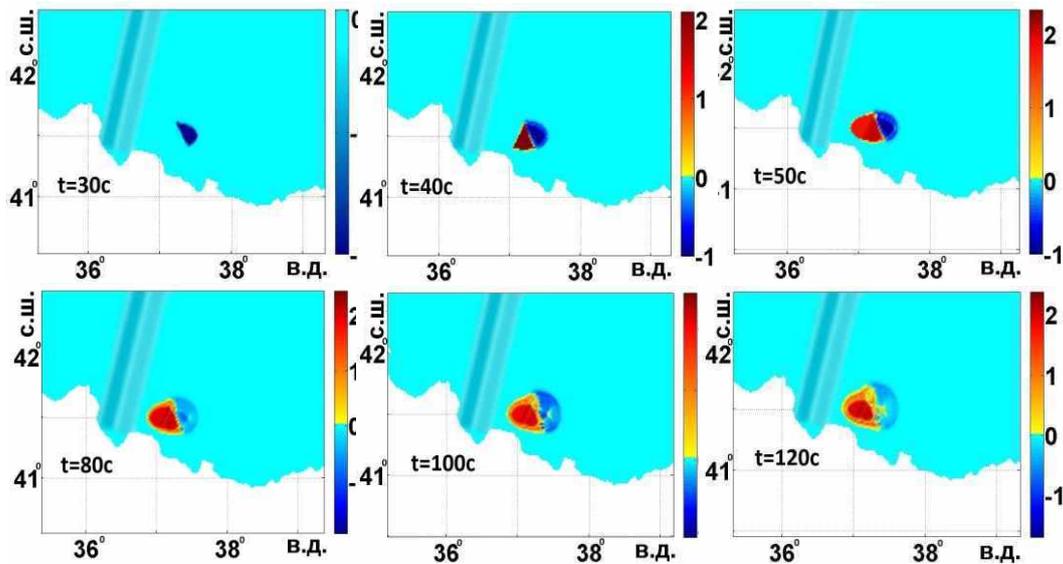


Рис. 15. Формирование очага цунами для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) шести моментов времени: 30 с; 40 с; 50 с; 80 с; 100 с и 120 с

На рис. 16 приведено положение волновых фронтов для шести моментов времени при распространении волн от очага 7 по акватории Черного моря.

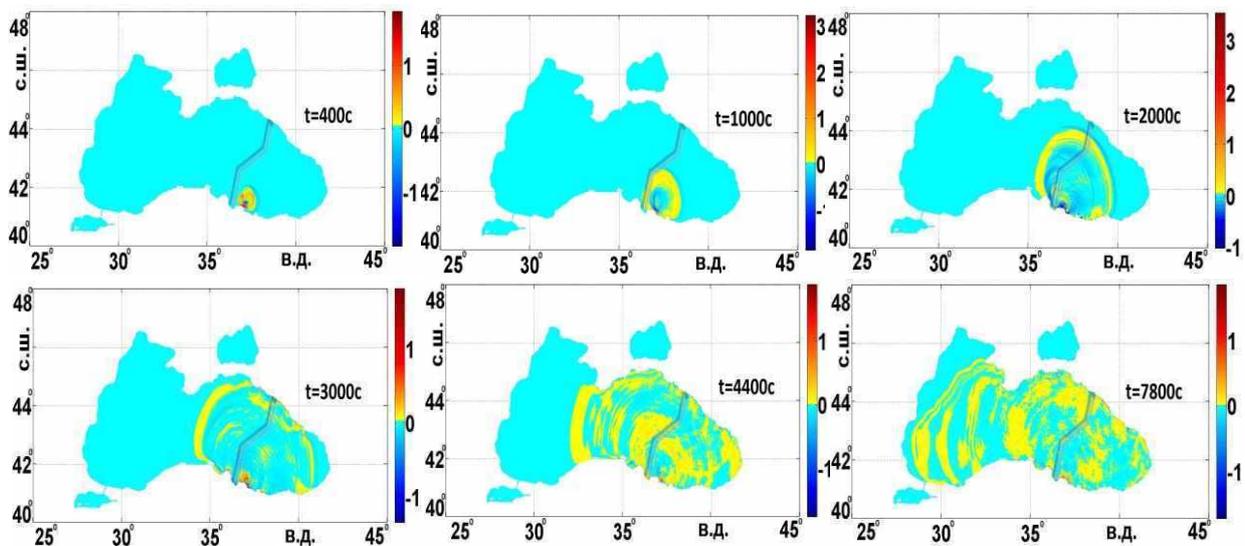


Рис. 16. Положение волновых фронтов при реализации СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) для моментов времени: $t = 400$ с; $t = 1000$ с; $t = 2000$ с; $t = 3000$ с; $t = 4400$ с; $t = 7800$ с

На рис. 17 приведены расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 для очага 7 при магнитуде землетрясения $M=7$ для четырех пунктов у турецкого побережья на юго-востоке Черноморской акватории (пп. 10-12) и двух пунктов на северо-востоке акватории у российского побережья (пп.6 и 7). Хорошо видно, что в пп. 10, 11, 6 и 7 волна подходит к берегу отрицательной фазой (откатом); в двух пунктах 12 и 13 первая волна положительная. Высоты волн у турецкого побережья (вблизи места расположения турецкого терминала газопровода) доходит до 70 см, у российского побережья до 40 см. Наименьший размах колебаний уровня в волне ($\sim 0,2$ м) наблюдаются в пп. 10 и 13. В то же время размах колебаний в волне в пп. 11 и 12 (Самсун) достигает 1 м, причем в п. 12, в отличие от мареограмм в остальных пунктах, на фоне относительно высокочастотных колебаний уровня наблюдается дополнительная низкочастотная моду-

ляция (несущая). Такое поведение мареограммы может быть вызвано геометрическими особенностями батиметрии в районе шельфовой зоны в окрестности п.12. На российском побережье в пп. 6 и 7 размах колебаний на мареограмме порядка 0,6 м.

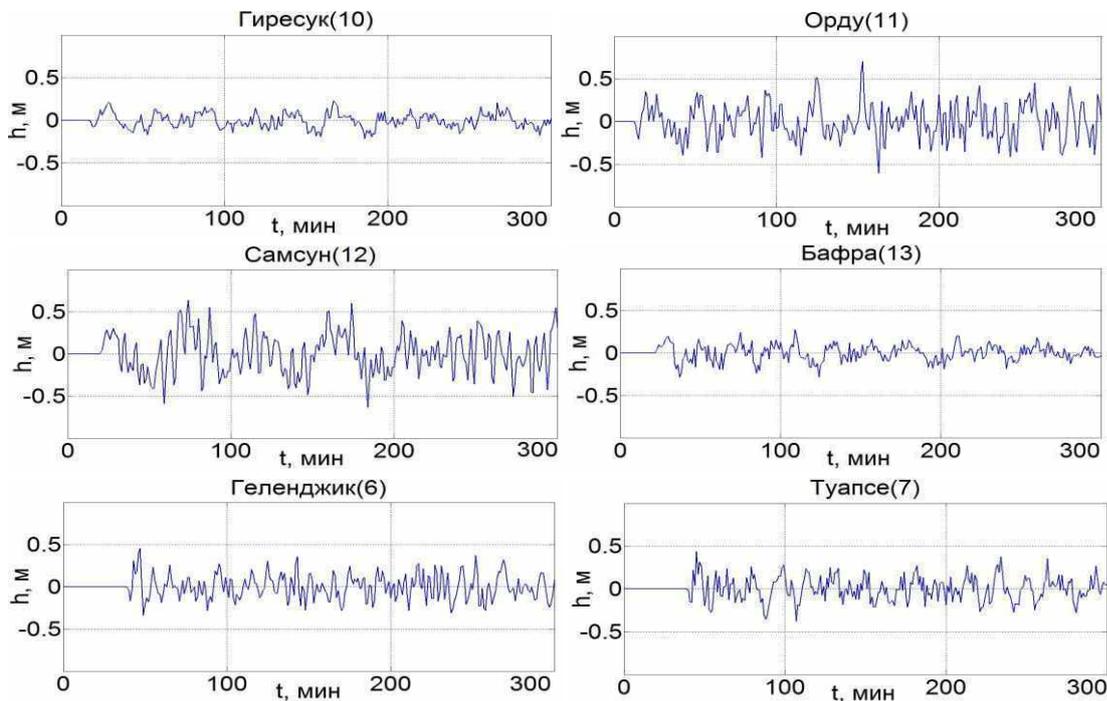


Рис. 17. Расчетные мареограммы для СЦЕНАРИЯ 2 (очаг 7) для четырех пунктов на юго-востоке Черноморской акватории (10-13) и двух пунктов на российском (6 и 7)

Более наглядно полученные выводы можно видеть на рис. 14, где приведены максимальные распределения высот волн при расчетах по обоим сценариям.

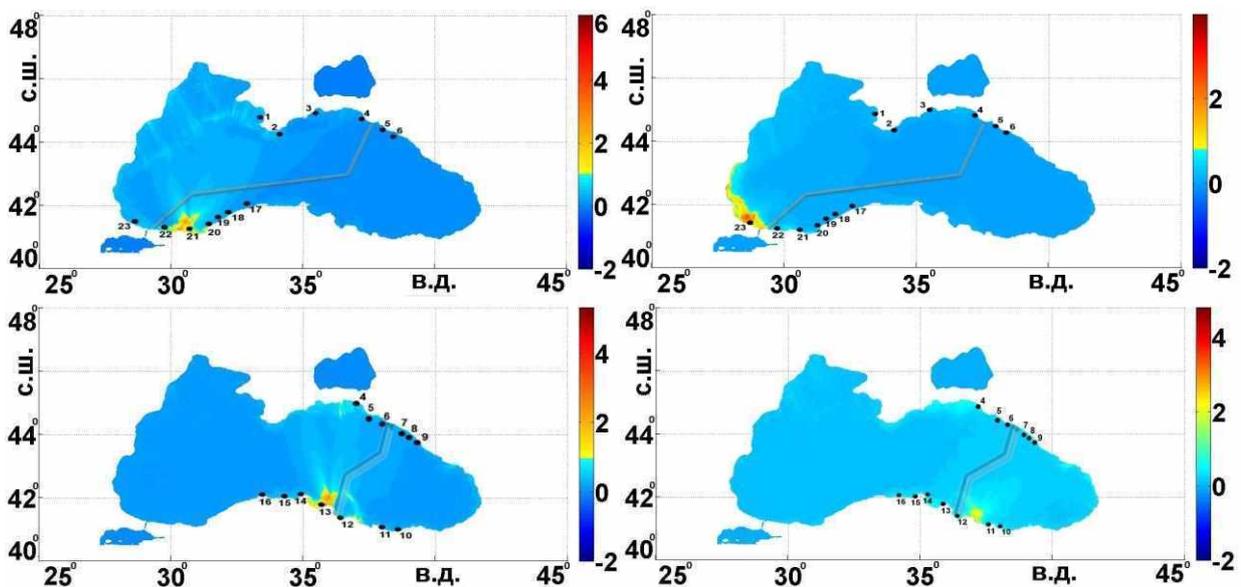


Рис. 18. Максимальные распределения высот волн для сценариев I и II от очагов 1, 2 и 6, 7 (точками отмечено положение виртуальных мареографов)

По цветовой шкале видно, что области наибольшего подъема воды как около турецкого побережья, так и около российского, лежат в интервале до 2 м. Нужно также отметить, что

наибольшие высоты волн локализованы достаточно далеко от возможных районов выхода трубопроводов на побережья. Таким образом, на рис. 1 – рис. 14 приведены данные по расчету волновых полей для умеренных землетрясений с $M=7$. Аналогичные расчеты проведены также для магнитуды землетрясения для очагов с той же локализацией для $M=7,3$. В табл. 5-8 приведены сравнительные данные для максимальных высот волн для магнитуд $M=7$ и $M=7,3$ для конкретных пунктов вдоль турецкого и российского побережий, где было фиксировано положение расчетных мареографов. Однако гистограммы (рис. 19 – рис. 22) показывают, что в ближайших точках к выбранным пунктам значения максимальных высот могут несколько отличаться, что легко объяснить физическими эффектами, а также геометрией береговой зоны. Так, рядом с п.12 (Самсун), в котором расчет показал 0,74 м, можно видеть максимальные высоты до 2 м (рис. 22).

Таблица 5
СЦЕНАРИЙ 1 (очаг 1)

Номер мареографа	Максимальный высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
20	0,98	2,6
21	1,2	2,9
22	0,75	1,8
23	0,47	0,8
1	0,56	0,9
2	0,08	0,21

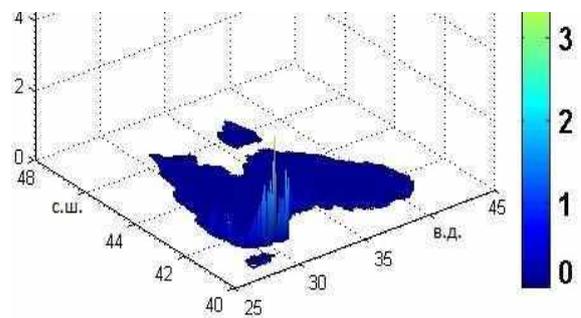


Рис. 19. Гистограмма для очага 1, $M=7$

Таблица 6
СЦЕНАРИЙ 1 (очаг 2)

Номер мареографа	Максимальный высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
20	0,3	1,3
21	0,2	0,51
22	0,7	1,5
23	1,8	3,8
1	0,19	0,6
2	0,04	0,13

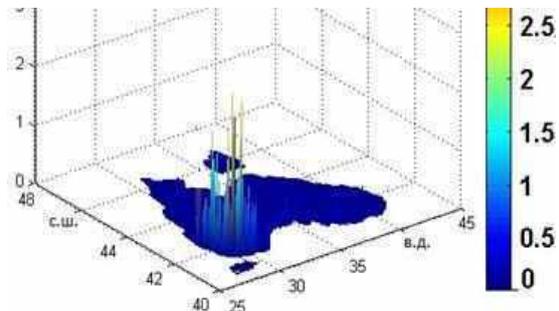


Рис. 20. Гистограмма для очага 2, $M=7$

Таблица 7
СЦЕНАРИЙ 2 (очаг 6)

Номер мареографа	Максимальные высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, при $M=7,3$
14	0,35	1,2
13	1,43	2,2
12	0,7	1,5
11	0,47	1,0
5	0,65	1,4
6	0,48	1,8

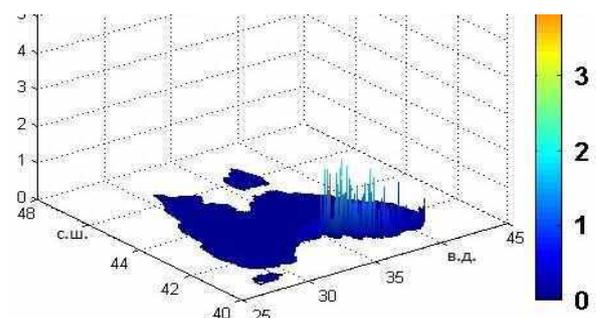


Рис. 21. Гистограмма для очага 6, $M=7$

Таблица 8
СЦЕНАРИЙ 2 (очаг 7)

Номер мареографа	Максимальные высоты, м, при $M=7$	Максимальные высоты, м, $M=7,3$
13	0,23	0,71
12	0,74	1,84
11	0,68	1,23
10	0,27	0,68
6	0,50	1,22
7	0,35	0,77

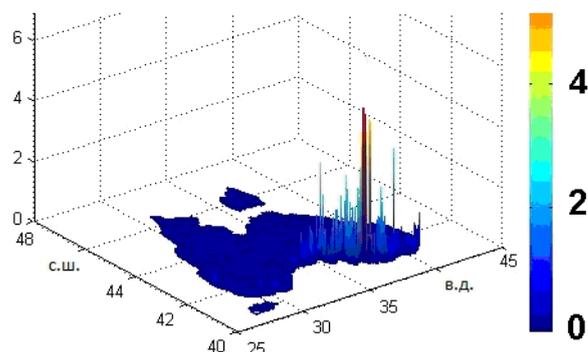


Рис. 22. Гистограмма для очага 7, $M=7$

Заключение

Таким образом, можно видеть, что в районах входа-выхода газопроводов и расположения морских терминалов газопроводов с газоизмерительными станциями максимальные высоты волн, оцененные для умеренных магнитуд землетрясения, которые чаще наблюдаются в акватории Черного моря, как правило, не превышают 1 м (см. табл. 5-8, $M=7$). В некоторых пунктах высоты волн в районах выхода на побережье могут принимать максимальные значения до 2 м. При более сильном землетрясении (например, СЦЕНАРИЙ 2, $M=7,3$), высоты волн в районах выхода газопровода на побережье могут достигать в некоторых пунктах до 4 м. При этом необходимо учесть то, что расчет производился только до семиметровой изобаты. Можно предположить, что береговой склон внесет дополнительный вклад в подрастание высоты волны, выходящей на берег, что необходимо учитывать при данном проектировании.

Библиографический список

1. Соловьева, О.Н. Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 679–685.
2. Соловьева, О.Н. Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря / О.Н. Соловьева, И.П. Кузин // Океанология. 2005. Т. 45. № 2. С. 826–833.
3. Фомичева, Л.А. Цунами в Черном море / Л.А. Фомичева, А.Б. Рабинович, А.Н. Демидов // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1 Гидрометеорологические исследования. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 352–354.
4. Григораш, З. К. Черноморские цунами 1927г. по мареографическим записям // Тр. МГИ АН СССР. – М.: АН СССР 1959-17. 1959. С. 59–67.
5. Григораш, З.К. Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // Океанология. 1972. Т. 12. Вып. 3. С. 417–422.
6. Доценко, С.Ф. Черноморские цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994.Т. 30. С. 513–519.
7. Yalçiner, A. Tsunamis in the black sea: comparison of the historical, instrumental, and numerical data / A. Yalçiner [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2004. Т. 109. № 12. С. 1–13.
8. Гарагаш, И.А. Геомеханическая оценка оползневых процессов и их мониторинг на склонах Черного моря связи с реализацией проекта «Голубой поток» / И.А. Гарагаш, Л.И. Лобковский // Современные методы и средства океанологических исследований: VI Междунар. научно-техн. конф. 2000. С. 5–15.

9. **Yolsal-Cevikbilen, S.** Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean / S. Yolsal-Cevikbilen, T. Taymaz // *Tectonophysics*. 2012. V. 61. P.536–537.
10. **Доценко, С.Ф.** Численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журн.* 1995. № 1. С. 67–80.
11. **Доценко, С.Ф.** Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журнал.* 1995. № 6. С. 3–16.
12. **Зайцев, А.И.** Численное моделирование возможных оползневых цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв. АИН РФ, ПММ.* 2003. Т. 4. С. 150–154.
13. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв. АИН РФ, ПММ.* 2002.Т. 3. С. 27–34.
14. **Зайцев, А.И.** Прогноз высот волн цунами на российском побережье Черного моря / А.И. Зайцев, Е.Н. Пелиновский // *Океанология.* 2011. Т. 51. № 5. С. 1–9.
15. **Колчина, Е.А.** Численное моделирование волн цунами с учетом динамики подводного очага (на примере акватории Черного моря): дисс. ...канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 198 с.
16. **Lobkovsky, L.I.** Estimation of Maximum Heights of Tsunami Waves for the Sochi Coast from Strong Submarine Earthquakes / L.I. Lobkovsky, R.Kh. Mazova, E.A. Kolchina // *Doklady Akademii Nauk.* 2014. V. 456. № 5. P. 604–609.
17. **Mazova, R.E.** Numerical Simulation of Long Water Wave Generation by Dynamic Seismic Source and Their Propagation for Black Sea Basin / R.E. Mazova, E.A. Tresvyatskaya // *Russ. J. Earth Sci.* V.8, ES5001, doi:10.2205/2006ES000208 <http://dx.doi.org/10.2205/2006ES000214> (2006).
18. **Мазова, Р.Х.** Максимальные высоты волн на Сочинском побережье при возможных сильных подводных землетрясениях / Р.Х. Мазова, Л.И. Лобковский, Е.А. Колчина // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2009. Т. 18. № 12. С. 16–21.
19. <http://www.gazpromexport.ru/projects/6/>; <http://www.south-stream-offshore.com>
20. **Чебаненко, И.И.** Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережий Черного моря / И.И. Чебаненко [и др.] // *Геологический журн.* 2003. № 1. С. 54–58.
21. **Казмин, В.Г.** Современная кинематика микроплит в Черноморском-Южно-Каспийском регионе / В.Г. Казмин, Л.И. Лобковский, Б.Г. Пустовитенко // *Океанология.* 2004. 44. С. 600–610.
22. **Wells, D.L.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement / D.L. Wells, K.J. Coppersmith // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1994. V. 84. P. 974–1002.
23. **Лобковский, Л.И.** Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах / Л.И. Лобковский, Б.В. Баранов // *Доклады АН СССР.* 1984. Т. 275. №4. С. 843–847.
24. **Пелиновский, Е. Н.** Нелинейная динамика волн цунами / Е. Н. Пелиновский. – Горький: изд. ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
25. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
26. **Sielecki, A.** The numerical integration of the non-linear shallow-water equations with sloping boundaries / A. Sielecki, M. Wurtele // *J. Comp. Phys.* 1970. V. 6. P. 219–236.
27. **Марчук, Ан.Г.** Численное моделирование волн цунами / Ан.Г. Марчук, Л.Б. Чубаров, Ю.И. Шокин. – М.: Наука, 1983. – 267 с.

Дата поступления
в редакцию 12.07.2015

R.Kh. Mazova, E.A. Kolchina, E.A. Ovchinnikova, I.V. Remizov

ESTIMATION OF TSUNAMI DANGER OF BLACK SEA COAST IN REGIONS OF PLANNED VARIANTS OF TRACE OF NEW GAS PIPELINE RUSSIA-TURKEY

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

Purpose: The numerical simulation tsunami waves in the Black Sea basin is performed to estimate possible tsunami danger at the coast in the points of input-output of gas pipeline for two scenarios of planned trace of new line of gas pipeline “Russia-Turkey”.

Scientific contribution: Theoretical significance of the study presented in the work is provided by novelty of results of numerical simulation and obtaining of dependence of wave regime characteristics on physical and geometrical parameters of the problem. Practical significance of obtained results is provided by possibility of their direct using to decide applied problems of coastal tsunami zonation.

Results: It is demonstrated that under possible graduate earthquakes the danger of tsunami wave action for realization of considered directions of trace of gas pipeline is absent. In contrast, under stronger earthquake the danger of destruction of infrastructure is possible. In this connection, the detailed tsunami zonation of local parts of coast in the region of input-output of planned gas pipelines.

Novelty: The novelty of research results is provided by novelty of research results of tsunami wave characteristics produced by keyboard seismic mechanism, to analyze real problem of estimation of tsunami danger for proposed way of trace of gas pipelines.

Key words: tsunami waves, seismic and tsunami danger, tsunamigenic earthquakes, numerical simulation, Black Sea coast.

УДК 532.5

А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин², Е.Н. Пелиновский^{2,3}**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ТЕЛА В ВОДУ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА
ПОЛНОСТЬЮ НЕЯВНЫМ МЕТОДОМ**ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева,
Институт прикладной физики РАН

Цель: Представлены результаты численного исследования падения тела в воду в различных условиях на основе уравнений Навье-Стокса.

Метод: Для численного моделирования многофазных течений со свободной поверхностью используется модель односкоростного приближения на базе полностью неявной связи скорости и давления.

Результаты: Приводятся основные формулы дискретизации уравнений и вид коэффициентов, а также результаты верификации модели на задаче образовании дорожки Кармана при движении тела и падении тела в воду. На базе предложенной модели проведено моделирование как вертикального вхождения, так и под различными углами. Исследованы размеры области возмущения и выявлены закономерности изменения параметров.

Область применения: Моделирование падения тел в воду при различных условиях и исследование всех параметров падения.

Ключевые слова: уравнения Навье-Стокса, численное моделирование, неявный метод, жидкость, твердое тело, взаимодействие.

Введение

Вопросу исследования взаимодействия тел с жидкостью посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [1-5, 10]. В них приводятся аналитические и численные решения, результаты экспериментальных и лабораторных исследований.

Взаимодействие тела с поверхностью жидкости и его дальнейшее погружение определяется многими факторами: скоростью и углом вхождения тела; массой и формой тела; физическим состоянием воздушной и жидкой сред в момент взаимодействия; свойствами тела и многими другими факторами, учет влияния которых существенно усложняет аналитическое и численное исследование [6-9]. Сложность рассматриваемых явлений не позволяет в полной математической постановке получить ни аналитические, ни численные решения широкого круга прикладных и научных задач. Даже численное исследование этого процесса представляет большие трудности, возникающие уже на этапе построения численных схем. Эти трудности связаны с существенно трехмерным нестационарным процессом обтекания тела, его турбулентным характером, нелинейностью, а также разрывным характером движения.

В прикладных и научных исследованиях падения тел в воду основными изучаемыми свойствами являются силы, действующие на тело и возникающие волны. Теоретический анализ этих свойств основывается на теории идеальной жидкости без учета влияния воздуха [2]. Однако, даже при сделанных упрощениях, точный расчет действующих сил и конфигурация свободной поверхности практически не возможен. В связи с этим актуальным становится вопрос выявления закономерностей и описания деталей этого явления на простых численных экспериментах с целью выработки теоретических закономерностей. Современное состояние исследований в этом направлении отражено в [2-4, 10].

Процесс падения тела в воду можно условно разбить на три стадии: стадия соударения с образованием каверны на поверхности воды, стадия начала погружения с сопутствующим схлопыванием каверны и стадия непосредственно погружения с сопутствующим схлопыванием подводного пузыря [1, 3, 8, 10]. Для изучения возникающих в результате падения

тела поверхностных волн необходим учет влияния всех стадий, что возможно лишь при непосредственном их моделировании. Для задач распространения поверхностных волн зачастую используют параметрическое приближение [7-9, 11-14], не учитывающее две последние стадии и представляющее собой каверну, образованную вертикальным падением тела. Самым главным недостатком параметрического источника является то, что он не учитывает угол вхождения тела в воду.

В настоящей работе проведены численные эксперименты вхождения тела в воду под разными углами с целью анализа параметров образующейся каверны. Вхождение моделируется с разными скоростями, отражающими дозвуковой и сверхзвуковой вход под различными углами. Анализируются высоты возникающих при соударении волн, а также три стадии движения тела. Представлена используемая математическая модель и применяемые граничные условия. Приводятся основные формулы дискретизации уравнений и вид коэффициентов матрицы системы. Представлены результаты верификации предложенной модели на задачах, позволяющих оценить правильность расчета сил, действующих на тело, и правильность образования формы источника. Приведены и обобщены результаты исследований вхождения тела под различными углами.

Основные уравнения

Рассмотрим несжимаемые среды, состоящие из произвольного количества гетерогенных фаз, разделенных границей раздела. В рамках односкоростной модели смеси движение данной системы описывается консервативными уравнениями, включающими уравнения неразрывности, сохранения импульса и уравнение для объемных долей фаз [15, 16]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} = -\nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \mu^{(k)} \nabla \mathbf{u}) - \nabla p + \rho \mathbf{g} \\ \frac{\partial}{\partial t} \alpha^{(k)} \rho^{(k)} + \nabla \cdot (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь \mathbf{u} – вектор общей скорости совокупности фаз k ; $\rho^{(k)}$ – плотность фазы k ; $\alpha^{(k)}$ – объемная доля фазы k и $\sum_k \alpha_k = 1$; p – давление; $\mu^{(k)}$ – молекулярная вязкость фазы k ; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Основная сложность при численном решении системы (1) заключается в определении связи поля давления с полем скорости. Процедура согласования поля давления с полем скорости должна приводить к одновременному удовлетворению уравнений неразрывности и сохранения импульса. Наиболее распространенными являются методы типа SIMPLE, основанные на процедуре коррекции давления или принципе расщепления неизвестных [17].

Для получения SIMPLE-процедуры численного решения системы (1) опустим уравнение для объемных долей и массовые силы, рассмотрим ячейку P с гранями $f = nb(P)$ и запишем систему уравнений (1) в дискретном виде

$$\begin{cases} \sum_{f=nb(P)} \mathbf{u}_f^n S_f = 0 \\ \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \frac{\mathbf{u}^n - \mathbf{u}^{n-1}}{\tau} V = - \sum_{f=nb(P)} \sum_k \alpha^{(k)} \rho_f^{(k)} \mathbf{u}_f^{n-1} \mathbf{u}_f^n S_f + \sum_{f=nb(P)} \sum_k \alpha^{(k)} \mu_f^{(k)} \nabla \mathbf{u}_f^n S_f - \\ - \sum_{f=nb(P)} p_f^n S_f + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{g} V \end{cases} \quad (2)$$

Здесь n – временной слой; τ – временной шаг; S_f – площадь грани f , разделяющей кон-

трольные объемы расчетной сетки (рис. 1); \mathbf{u}_f – величина скорости на грани (здесь и далее индекс f означает принадлежность величины к грани); $nb(P)$ – количество граней ячейки (в данном случае ячейки P).

В случае расчета многофазных течений с помощью алгоритма SIMPLE уравнение для переноса объемных долей решается для $(n-1)$ объемной доли $\alpha^{(n)} = 1 - \sum_{k \neq n} \alpha^{(k)}$ фаз k отдельно от уравнений неразрывности и сохранения импульса.

Наиболее удобно использовать совмещенный алгоритм решения системы (2), основанный на полностью неявной формулировке. Для его реализации запишем систему (2) в виде

$$\begin{cases} \sum_{f=nb(P)} \left\{ \overline{\mathbf{u}}_f^n + \overline{\mathbf{D}}_f \left[\left(\overline{\nabla p}_f^{n-1} \right) - \left(\nabla p_f^n \right) \right] \right\} S_f = 0 \\ \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \frac{(\mathbf{u}^n - \mathbf{u}^{n-1})}{\tau} V = - \sum_{f=nb(P)} \sum_k \alpha^{(k)} \rho_f^{(k)} \mathbf{u}_f^{n-1} \mathbf{u}_f^n S_f + \\ + \sum_{f=nb(P)} \sum_k \alpha^{(k)} \mu_f^{(k)} \nabla \mathbf{u}_f^n S_f - \sum_{f=nb(P)} p_f^n S_f + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{g} V \end{cases} \quad (3)$$

Здесь «верхняя черта» означает, что величина на грани получена интерполяцией из соседних контрольных объемов. В уравнении неразрывности в системе (3) была использована поправка Рхи-Чоу [18], нивелирующая разницу приближений градиента давления в уравнениях неразрывности и сохранения импульса, а также связывающая поля скорости и давления при одновременном решении уравнений неразрывности и движения.

В алгебраической форме система имеет вид

$$\begin{cases} \sum_{j \in \{p, u, v, w\}} a_P^{pj} j_P + \sum_{N=NB(P)} \left[\sum_{j \in \{p, u, v, w\}} a_N^{pj} j_N \right] = b_P^p, \\ \sum_{j \in \{p, u, v, w\}} a_P^{ij} j_P + \sum_{N=NB(P)} \left[\sum_{j \in \{p, u, v, w\}} a_N^{ij} j_N \right] = b_P^i, \quad i = \{u, v, w\}. \end{cases} \quad (4)$$

Суммирование по индексу j для первого уравнения системы (4) – уравнения неразрывности дает коэффициенты общей матрицы системы для вычисления давления в контрольных объемах дискретной модели. Данные коэффициенты имеют вид

$$\begin{aligned} a_N^{pp} &= \frac{(\overline{\mathbf{D}}_f \mathbf{S}_f) \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}}, \quad a_P^{pp} = - \sum_{f=nb(P)} a_f^{pp} \\ a_N^{pu} &= (1 - \lambda_f) S_f^x, \quad a_N^{pv} = (1 - \lambda_f) S_f^y, \quad a_N^{pw} = (1 - \lambda_f) S_f^z, \\ a_P^{pu} &= \sum_{f=nb(P)} \left[\lambda_f S_f^x \right], \quad a_P^{pv} = \sum_{f=nb(P)} \left[\lambda_f S_f^y \right], \quad a_P^{pw} = \sum_{f=nb(P)} \left[\lambda_f S_f^z \right] \end{aligned} \quad (5)$$

При записи данных коэффициентов использовался алгоритм неортогональной коррекции [19] для возможности правильного расчета на произвольных неструктурированных сетках, а также формула для вычисления давления на грани p_f с помощью линейной интерполяции по значениям в центрах ячеек:

$$p_f = \lambda_f p_P + (1 - \lambda_f) p_N. \quad (6)$$

Для первого уравнения системы (4) правая часть имеет вид

$$b_P^p = \sum_{f=nb(P)} \overline{\mathbf{D}}_f \nabla p_f \cdot \mathbf{S}_f - \overline{\mathbf{D}}_f \nabla p_f \cdot \left(\mathbf{S}_f - \frac{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}} \mathbf{d}_{PN} \right). \quad (7)$$

Суммирование по индексу i для второго уравнения системы (4) – уравнения сохранения импульса – дает коэффициенты общей матрицы системы для вычисления компонент скорости

$$a_N^{uu} = a_N^{vv} = a_N^{ww} = \sum_k \alpha_f^{(k)} \mu_f \frac{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}} + \min(0, \sum_k \alpha_f^{(k)} \rho_f^{(k)} S_f) \quad (8)$$

Первое слагаемое выражений (8) относится к диффузионному слагаемому, и коэффициенты общей матрицы системы будут иметь вид

$$\begin{aligned} a_N^{up} &= (1 - \lambda_f) S_f^x, & a_N^{vp} &= (1 - \lambda_f) S_f^y, & a_N^{wp} &= (1 - \lambda_f) S_f^z, \\ a_P^{up} &= \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^x, & a_P^{vp} &= \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^y, & a_P^{wp} &= \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^z \end{aligned} \quad (9)$$

Как и для коэффициентов (5), для записи использовался алгоритм неортогональной коррекции. Второе слагаемое выражений (8) – конвективная составляющая, которая аппроксимируется с помощью любой известной дифференциальной схемы, применимой на произвольных неструктурированных сетках [20-22]. Обычно используется противопотоковая схема (UpwindDifferences, UD). Также используются: противопоточная схема с линейной интерполяцией (LinearUpwindDifferences, LUD), схема QUICK, центрально-разностная схема (CentralDifferences, CD), схемы семейства NVD (NormalizedVariableDiagram), гибридные схемы. Все перечисленные схемы применяются совместно с противопоточной схемой для увеличения монотонности.

Дискретизация нестационарного слагаемого может быть осуществлена по одной из известных неявных схем [23]: схеме Эйлера; схеме Адамса-Бэшфорта. Вклад диффузионного и конвективного слагаемых уравнений сохранения импульса относится и к диагональным коэффициентам общей матрицы системы, которые с учетом нестационарного слагаемого дискретизованного с помощью схемы Эйлера будут иметь вид

$$\begin{aligned} a_P^{uu} &= - \sum_{N=NB(P)} a_N^{uu} + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} \frac{V}{\tau} \\ a_P^{vv} &= - \sum_{N=NB(P)} a_N^{vv} + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} \frac{V}{\tau} \\ a_P^{ww} &= - \sum_{N=NB(P)} a_N^{ww} + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} \frac{V}{\tau} \end{aligned} \quad (10)$$

Для второго уравнения системы (4) правая часть имеет вид

$$\begin{aligned} b_p^u &= \sum_{f=nb(P)} \left[\nabla u \cdot \mu_f \cdot \left(\mathbf{S}_f - \frac{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}} \mathbf{d}_{PN} \right) \right] + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} u_P \frac{V}{\tau} + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} g_x V, \\ b_p^v &= \sum_{f=nb(P)} \left[\nabla v \cdot \mu_f \cdot \left(\mathbf{S}_f - \frac{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}} \mathbf{d}_{PN} \right) \right] + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} v_P \frac{V}{\tau} + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} g_y V, \\ b_p^w &= \sum_{f=nb(P)} \left[\nabla w \cdot \mu_f \cdot \left(\mathbf{S}_f - \frac{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{S}_f}{\mathbf{S}_f \cdot \mathbf{d}_{PN}} \mathbf{d}_{PN} \right) \right] + \sum_k \alpha_P^{(k)} \rho_P^{(k)} w_P \frac{V}{\tau} + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} g_z V. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, совмещенная система линейных алгебраических уравнений полностью неявного алгоритма для моделирования многофазного потока имеет вид

$$\begin{bmatrix} a_P^{pp} & a_P^{pu} & a_P^{pv} & a_P^{pw} \\ a_P^{up} & a_P^{uu} & a_P^{uv} & a_P^{uw} \\ a_P^{vp} & a_P^{vu} & a_P^{vv} & a_P^{vw} \\ a_P^{wp} & a_P^{wu} & a_P^{wv} & a_P^{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_P \\ u_P \\ v_P \\ w_P \end{bmatrix} + \sum_{N=NB(P)} \begin{bmatrix} a_N^{pp} & a_N^{pu} & a_N^{pv} & a_N^{pw} \\ a_N^{up} & a_N^{uu} & a_N^{uv} & a_N^{uw} \\ a_N^{vp} & a_N^{vu} & a_N^{vv} & a_N^{vw} \\ a_N^{wp} & a_N^{wu} & a_N^{wv} & a_N^{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_N \\ u_N \\ v_N \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_P^p \\ b_P^u \\ b_P^v \\ b_P^w \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Данная система записана для вычисления общей скорости и общего давления многофазного потока, однако может быть обобщена и на случай расчета, где каждая фаза обладает своей скоростью и физическими свойствами, такими как сжимаемость и турбулентность. Эти обобщения будут проведены в следующих работах.

Для моделирования границ раздела фаз, после решения системы (12), решается уравнение переноса объемных долей (третье уравнение системы (1)), которое решается для $(n - 1)$ объемной доли фаз. Его дискретизация методом конечных объемов осуществляется по схеме полностью аналогичной той, что используется для уравнения сохранения импульса. Для аппроксимации конвективного слагаемого уравнения переноса объемных долей используется схема M-CICSAM [24], относящаяся к классу сжимающих схем высокого разрешения и обеспечивающая сохранение минимально возможной толщины границы раздела сред, а также сохранение формы распределения объемных долей при параллельном переносе и вращении. Дискретизация нестационарного слагаемого также осуществляется по схемам Эйлера или Адамса–Бэшфорта.

В алгебраической форме данная система уравнений для k -й фазы имеет вид

$$a_P^{(k)} \alpha_P^{(k)} + \sum_{N=NB(P)} a_N^{(k)} \alpha_N^{(k)} = b_P^{(k)} \quad (13)$$

Коэффициенты матрицы неявного решения уравнения (13) имеют вид:

$$a_N^{(k)} = \min(0, u_f^{(n-1)} S_f), \quad a_P^{(k)} = - \sum_{N=NB(P)} a_N^{(k)} + \frac{V}{\tau}$$

$$b_P^{(k)} = -u_f^{(n-1)} S_f \cdot (\alpha_{MC}^{(k)} - \alpha_{UD}^{(k)}) + \frac{V}{\tau} \alpha_P^{(k),n-1}, \quad (14)$$

где $\alpha_{MC}^{(k)}, \alpha_{UD}^{(k)}$ – значение объемной доли на грани, найденной по схеме MCICSAM и по противопоточной схеме соответственно; $\alpha_P^{(k),n-1}$ – значение объемной доли на прошлый шаг по времени. Представленные слагаемые получены с помощью дискретизации методом отложенной коррекции.

Для численного решения итоговая система уравнений должна быть дополнена начальными и граничными условиями. На твердых стенках градиент давления и объемных долей равен нулю т.е. $\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0$, значение скорости равно нулю – $u = 0, v = 0, w = 0$. На входных границах задается фиксированное значение скорости и объемных долей, градиент давления равен нулю, т.е. $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. На выходных границах фиксируется статическое давление, градиенты скорости и объемных долей равны нулю:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0.$$

Движение тела моделируется с использованием метода погруженных границ (Immersed Boundary Method, IBM) [25]. Метод IBM предполагает выделение в расчетной области ячеек, полностью или частично занятых твердым телом, и введением для данных ячеек, дополнительной силы сопротивления, предложенной в [26]. Такой подход к моделированию подвижного твердого тела достаточно прост, не требует динамического перестроения расчетной сетки и дает хорошие результаты для практических задач, не требующих детального описания течений в пограничном слое вблизи поверхности твердого тела.

Правильное вычисление сил сопротивления, действующих на тело, является одной из самых сложных задач моделирования падения тела. Воспользуемся следующим алгоритмом. Определение силы сопротивления, действующей на тело со стороны жидкости, а также моменты этих сил находятся из следующих интегралов:

$$\begin{aligned}
 F_p &= -\int_S pndS; F_\tau = \int_S \tau tdS \\
 M_p &= -\int_S p(r-r_*) \times ndS; M_\tau = -\int_S (r-r_*) \times (\tau t) dS
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где F_p сила сопротивления давления; F_τ - сила сопротивления трения; τ - напряжение трения; n, t - нормальный и тангенциальный к поверхности тела векторы; p - давление в жидкости. Интегралы (15) вычисляются по всей поверхности твердого тела S . При численном расчете интеграл заменяется суммированием следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F_p &= -\int_S pndS = -\sum_{i=1}^N p_i n_i S_i; F_\tau = \int_S \tau tdS = \sum_{i=1}^N \tau_i t_i S_i; \\
 M_p &= -\int_S p(r-r_*) \times ndS = -\sum_{i=1}^N p_i (r_i - r_*) \times n_i S_i; \\
 M_\tau &= -\int_S (r-r_*) \times (\tau t) dS = \sum_{i=1}^N (r_i - r_*) \times (\tau t)_i S_i;
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Основная проблема – нахождение границы твердого тела для определения на ней давления, площади и нормали. Для решения этой проблемы воспользуемся алгоритмом построения изоповерхности. Для нахождения изоповерхности зададим граничный уровень концентрации в ячейке $\varphi_{crit} = 0.5$. Вначале интерполяцией найдем значение концентрации в узлах расчетной модели. Далее проводим поиск ячеек, содержащих границу твердого тела. Условие содержания границы состоит в том, что ячейка содержит узлы со значением объемной доли твердого тела как менее φ_{crit} , так и более. Для ребер ячейки, содержащей границу твердого тела, находим точки, в которых $\varphi = \varphi_{crit}$. Данная операция делается в предположении линейного распределения φ вдоль ребра

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \frac{\varphi_{crit} - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1}
 \tag{17}$$

где \vec{P}_1, \vec{P}_2 - узлы рассматриваемого ребра; φ_1, φ_2 - значение концентраций; P - точка пересечения.

По имеющимся N точкам строим N треугольников с общей точкой P_c , которая является геометрическим центром найденных точек:

$$P_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i.
 \tag{18}$$

Для каждого треугольника находим вектор-площадь по выражениям:

$$\begin{aligned}
 S_x &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} P_{2,y} - P_{1,y} & P_{2,z} - P_{1,z} \\ P_{3,y} - P_{1,y} & P_{3,z} - P_{1,z} \end{vmatrix}; \\
 S_y &= -\frac{1}{2} \begin{vmatrix} P_{2,x} - P_{1,x} & P_{2,z} - P_{1,z} \\ P_{3,x} - P_{1,x} & P_{3,z} - P_{1,z} \end{vmatrix}; S_z = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} P_{2,x} - P_{1,x} & P_{2,y} - P_{1,y} \\ P_{3,x} - P_{1,x} & P_{3,y} - P_{1,y} \end{vmatrix};
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Находим вклад силы и момента сил от каждого треугольника:

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_{p,i,j} &= (S_{x,j} P_i; S_{y,j} P_i; S_{z,j} P_i); \\
 \vec{M}_{p,i,j} &= \left[(\vec{P}_{C,j} - \vec{r}_*) \times (S_{x,j} P_i; S_{y,j} P_i; S_{z,j} P_i) \right];
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

где $P_{C,j}$ - центр масс треугольника, $S_{x,j}, S_{y,j}, S_{z,j}$ - компоненты вектор-площади; P_i - давление в ячейке; r_* - центр масс всего твердого тела.

В данном виде алгоритм определения результирующей силы и моментов сил пригоден

для использования на произвольной неструктурированной сетке, состоящей из многогранников произвольной формы. Представленная модель реализована в пакете программ ЛОГОС – российском программном продукте инженерного анализа, предназначенном для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [20, 21, 27]. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая расчеты турбулентных и нестационарных течений [7, 21, 28].

Верификация модели

Представленные здесь верификационные задачи направлены на оценку правильности моделирования сил, действующих на тело в потоке жидкости, и формирования свободной поверхности около тела и вдали от него.

Обтекание цилиндра

Данная задача является одним из самых известных и классических тестов для верификации программ, моделирующих движение жидкости или газа. В ней рассматривается обтекание жидкостью кругового цилиндра. При числах Рейнольдса (Re) выше 30 за цилиндром образуется последовательность вихрей, вращающихся попеременно вправо и влево, известная как «вихревая дорожка Кармана». При достижении критических чисел Рейнольдса (при переходе течения из ламинарного режима в турбулентный) дорожка разваливается. Экспериментальные исследования данной задачи детально представлены в [29]. В эксперименте определяются коэффициент лобового сопротивления цилиндра (C_x) и число Струхала (St), отражающее временной период колебания (или срыва) вихрей.

Для оценки действующих на цилиндр сил будем рассматривать обратную задачу. Пусть цилиндр движется в канале, заполненном неподвижной вязкой жидкостью. Движение цилиндра соответствует ламинарному режиму с числом Рейнольдса 350. За характерный размер берется диаметр цилиндра $d=0,2$ м. Движение цилиндра моделируется с помощью метода IBM, а действующие на него силы вычисляются с помощью описанного выше алгоритма. Для рассматриваемого диаметра цилиндра безразмерный коэффициент лобового сопротивления C_x , соответствующий взятому числу Re , равен 1,3.

Моделирование осуществляется на серии сгущающихся блочно-структурированных гексагональных сетках (табл. 1) в геометрической области, соответствующей параллелепипеду с размерами: $X \in [0; 10]$; $Y \in [0; 1]$; $Z \in [0; 0,1]$. Параметры расчетных сеток представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные сетки и характерные размеры ячеек

Номер сетки	Число ячеек, млн	Характерный размер ячейки, м
1	0,1	0,01
2	0,4	0,005
3	0,5	0,0044
4	1,6	0,0025

В расчетах использовалась схема второго порядка точности по времени. Для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении сохранения импульса использовалась противопоточная схема. Шаг по времени выбирается переменным с условием соответствия числу Куранта, равному 0,9. Длина расчетной области позволяет с достаточной точностью определить установившиеся динамические характеристики.

На рис. 1 изображены мгновенные поля скорости в разные моменты времени. Пред-

ставленная картина соответствует классическому описанию отрыва пограничного слоя при обтекании тела с тупой кормовой частью [29]. В табл. 2 приведены результаты сравнения экспериментальных значений со значениями, полученными в результате расчетов.

Таблица 2

Результаты сравнения численных и экспериментальных значений

№ сетки	C_x (расчет)	C_x (эксперимент)	Погрешность, %	Число Струхала (расчет)	Число Струхала (эксперимент)	Погрешность, %
1	1,59	1,3	22,8	0,22	0,21	5,82011
2	1,40	1,3	8,45	0,22	0,21	5,82011
3	1,39	1,3	7,61	0,21	0,21	2,04082
4	1,37	1,3	5,61	0,21	0,21	2,04082
5	1,35	1,3	4,12	0,21	0,21	0,25063

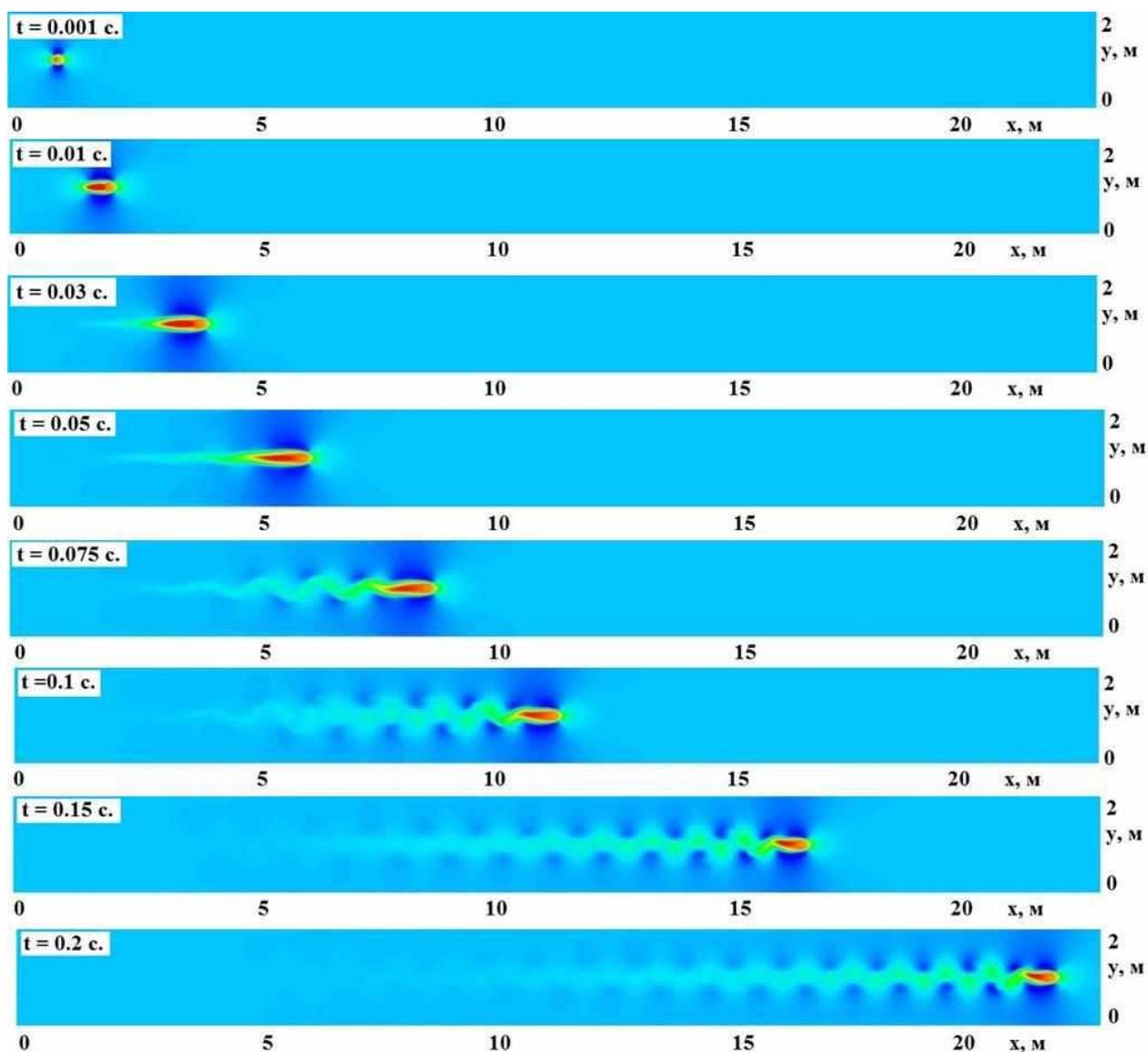


Рис. 1. Поле скорости вокруг цилиндра в разные моменты времени

Результаты численных экспериментов показывают хорошее совпадение между собой и сходимость численного решения при измельчении сетки. Сходимость значений лобового сопротивления подтверждает правильность расчета сил сопротивления, действующих на цилиндр.

Падение параллелепипеда в воду

Верификацию представленного алгоритма на правильное описание образования каверны при падении тела в воду можно осуществить с помощью численного моделирования эксперимента, описанного в [2]. С помощью этой задачи можно также оценить правильность описания распространения волн на свободной поверхности на расстояние.

В этом эксперименте с высоты H вдоль торцевой стенки бассейна в воду свободно падает прямоугольный параллелепипед с высотой H_1 и длиной l . Прямоугольный бассейн с горизонтальным дном заполнен водой на высоту $h < H_1$. В натурном эксперименте длина бассейна составляла 4,3 м, а ширина 0,2 м. В невозмущенном состоянии вода находится в состоянии покоя. Расчетная модель представлена на рис. 2.

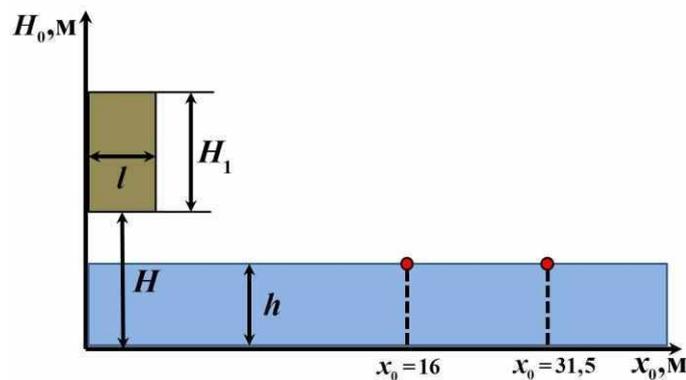


Рис. 2. Геометрия задачи

В [2] рассматривается несколько вариантов проведения эксперимента, отличающиеся друг от друга размерами тела, высотой, с которой оно падает, и глубиной воды. В безразмерной форме эти параметры выглядят так:

$$H^0 = H/h, \quad H_1^0 = H_1/h, \quad l^0 = l/h, \quad x^0 = x/h, \quad \rho^0 = (\rho_1 - \rho)/\rho,$$

где ρ_1, ρ – плотность тела и плотность жидкости соответственно. Величины $h, H^0, H_1^0, l^0, \rho^0, x^0$ меняются в зависимости от постановки.

В первом случае значения этих величин следующие: $h = 8$ см, . На расстоянии $x^0 = 16$ установлен мареограф, фиксирующий колебания водной поверхности. Во втором случае $h = 4$ см, $H^0 = 4.75$, $H_1^0 = 4.5$, $l^0 = 1.15$, $\rho^0 = 0.215$, а мареограф установлен на расстоянии $x^0 = 31.5$.

Для моделирования падения параллелепипеда в воду была построена блочно-структурированная расчетная сетка, состоящая примерно из 1 млн ячеек в области с размерами $4,3 \times 0,4 \times 0,5$ м. В месте падения параллелепипеда и установки датчика сетка более мелкая. На левую, правую и нижнюю стенки дискретной модели накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху фиксировалось статическое давление.

В расчетах использовалась схема второго порядка точности по времени, для конвективных слагаемых в уравнении сохранения импульса использовалась противопоточная схема, для конвективных слагаемых в уравнении переноса объемных долей – схема M-CICSAM. Шаг по времени составлял 0,001 с.

На рис. 5 показано образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи. В момент времени $t = 0,25$ с наблюдается ранняя стадия развития каверны и брызговой струи. В момент $t = 0,3$ с струя продолжает развиваться. Через $0,1$ с дно канала обнажилось, скорость формирования струи уменьшилась. В момент $t = 7,5$ с показана заключительная стадия схлопывания каверны и генерации брызговой струи. Следует отметить, что в работе [2] не указано, в какие моменты времени были сделаны фотографии. Авторами этой статьи были самостоятельно выбраны моменты времени для построения результатов численного моделирования.

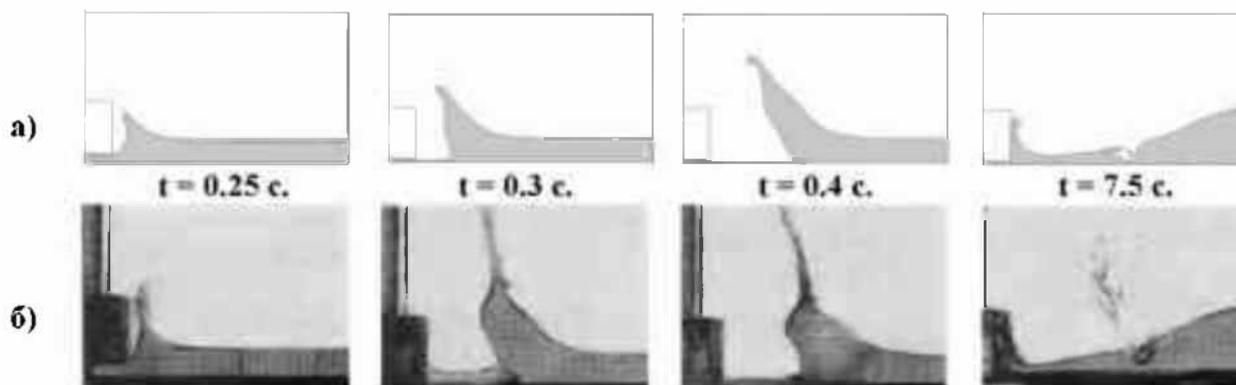


Рис. 3. Образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи:
 а – результаты численного моделирования на моменты времени 0,25; 0,3; 0,4 и 7,5 с;
 б – экспериментальные данные

На рис. 4 приведены зависимости амплитуды колебаний уровня воды в бассейне от времени для второй и третьей постановки задачи соответственно. Цветом выделена кривая, построенная на основе данных, записанных неподвижным волномером.

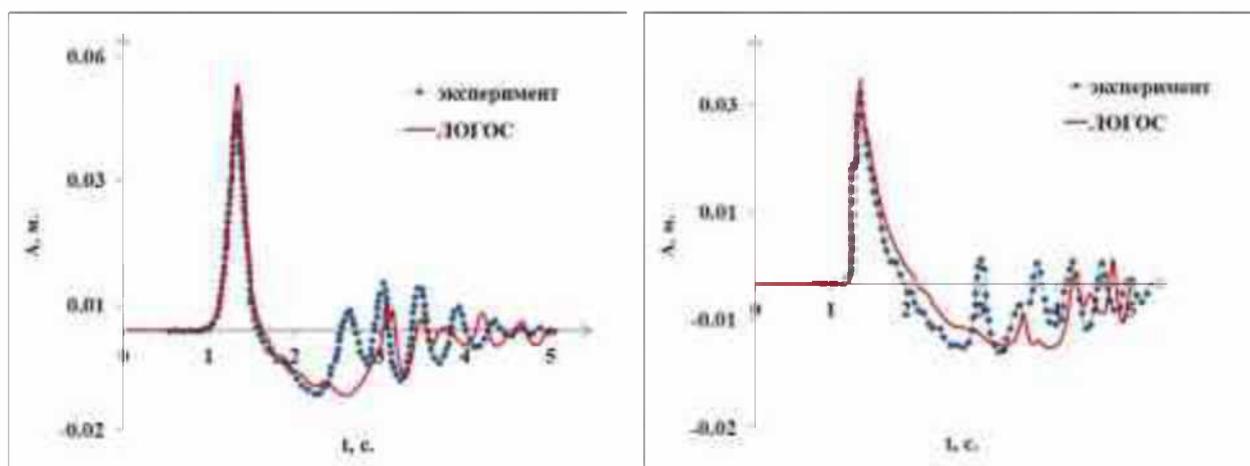


Рис. 4. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне для второй и третьей постановок задачи соответственно:
 А – амплитуда колебаний уровня воды; t – время

Сравнение мареографных записей показывает хорошее совпадение для первой приходящей волны. Вычисленная амплитуда вторая волна («отрицательной») также хорошо соответствует экспериментальным данным, однако наблюдается различие для дальнейших колебаний поверхности, которые имеют миллиметровую амплитуду. Это может быть связано как с качеством расчетной сетки, так и со способом записи численных данных в мареографной точке.

Моделирование возмущений при падении тел в воду в различных условиях

Рассмотрим задачу падения тел в воду при различных скоростях падения и с различными углами атаки. Для исследования рассмотрим модельную дискретную область размером $160 \times 160 \times 50 \text{ см}^3$, представляющую собой неструктурированную трехмерную (3D) сетку, состоящую из усеченных многогранников произвольной формы (рис. 5). Расчетная сетка построена средствами препроцессора пакета программ ЛЮГОС. В модельной области взята постоянная глубина относительно поверхности 10 м. Высота над нулевым уровнем поверхности воды составляет 40 м.

Верхняя часть рис. 5 справа отражает структуру сетки по вертикальной координате. Расстояние от поверхности воды (нулевой уровень) до максимального верхнего значения границы воздуха составляет 40 м, а до дна 10 м. Относительно нулевого уровня вверх для более детального разрешения основного выброса воды в воздух, было построено несколько сеточных слоев со сгущением.

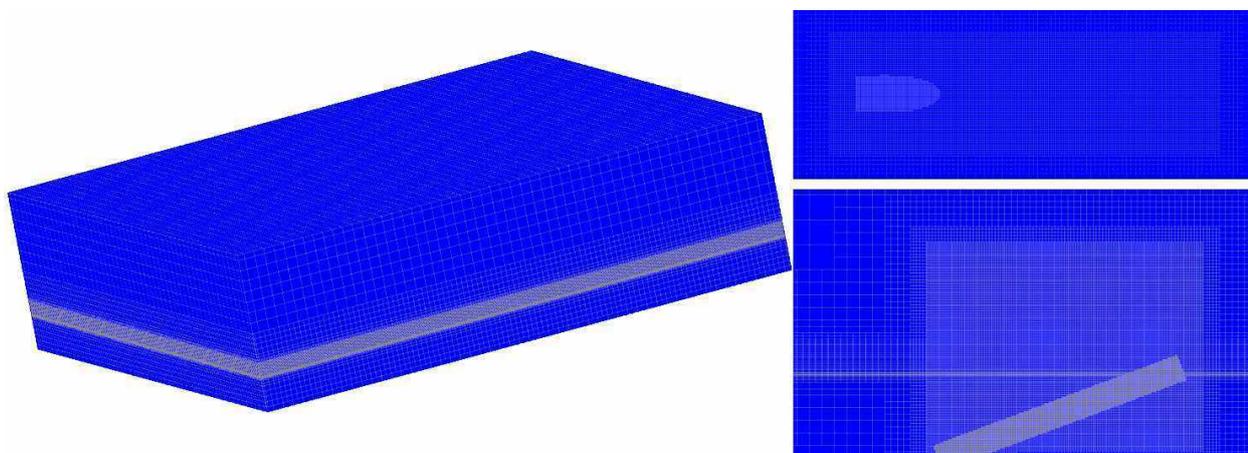


Рис. 5. Модельная дискретная область (слева) и фрагмент расчетной сетки в месте падения (справа). Зоны сгущения сетки вблизи свободной поверхности и области движения тела (черный цвет)

Характерные размеры ячеек в воздухе: от 0 до 0,2 м - $\Delta z = 10 \text{ см}$; от 0,2 м до 15,5 м - $\Delta z = 25 \text{ см}$; от 15,5 м до 17 м - $\Delta z = 50 \text{ см}$; от 17 м до 21 м - $\Delta z = 0,75 \text{ м}$; от 21 м до 27 м - $\Delta z = 1,5 \text{ м}$; и от 27 м до 35 м - $\Delta z = 3 \text{ м}$. Размеры ячеек в воде по вертикали: от 0 до 0,2 м - $\Delta z = 10 \text{ см}$, и от 0,2 м до 10 м - $\Delta z = 25 \text{ см}$.

Для исследований будем рассматривать тело сферической формы диаметром 1 м движущееся со скоростью 10, 30, 60, 100, 150, 200 м/с под углами 0, 20, 30, 45, 60 и 80 град относительно поверхности воды для каждой из скоростей. Для корректного моделирования движения тела в воде проведено сгущение расчетной сетки в цилиндрической области до характерного размера ячеек 10 см так, чтобы на диаметр метеорита приходилось не менее 10 ячеек. Данная область расположена с наклоном, соответствующим углу падения тела (на рис. 5 20 град) (нижняя часть справа).

На рис. 6 – рис. 8 представлены результаты моделирования падения тела под углами 20, 45 и 80 град (тело летит слева направо).

При падении под углом 20 град образовавшаяся каверна имеет несимметричную структуру с выделяющимся всплеском по ходу падения тела (передняя волна) (рис. 6). За телом при малых скоростях ($\sim 10 \text{ м/с}$) поднятия поверхности воды (задняя волна) практически не наблюдается, тогда как по ходу падения высота волны достигает 2-4 м. Образовавшаяся каверна имеет клиновидную структуру и ее ширина около момента схлопывания составляет около 8 м. По мере возрастания скорости падения высота основного выброса волны увеличивается. Увеличивается и высота волны, образованной за телом, увеличивая при этом и размер каверны. По мере увеличения скорости амплитуда передней и задней волн отличаются в 4-5

раз. Передняя волна имеет «серповидную» форму, поэтому будет обрушаться как на внутреннюю сторону каверны, так и на внешнюю по ходу падения тела.

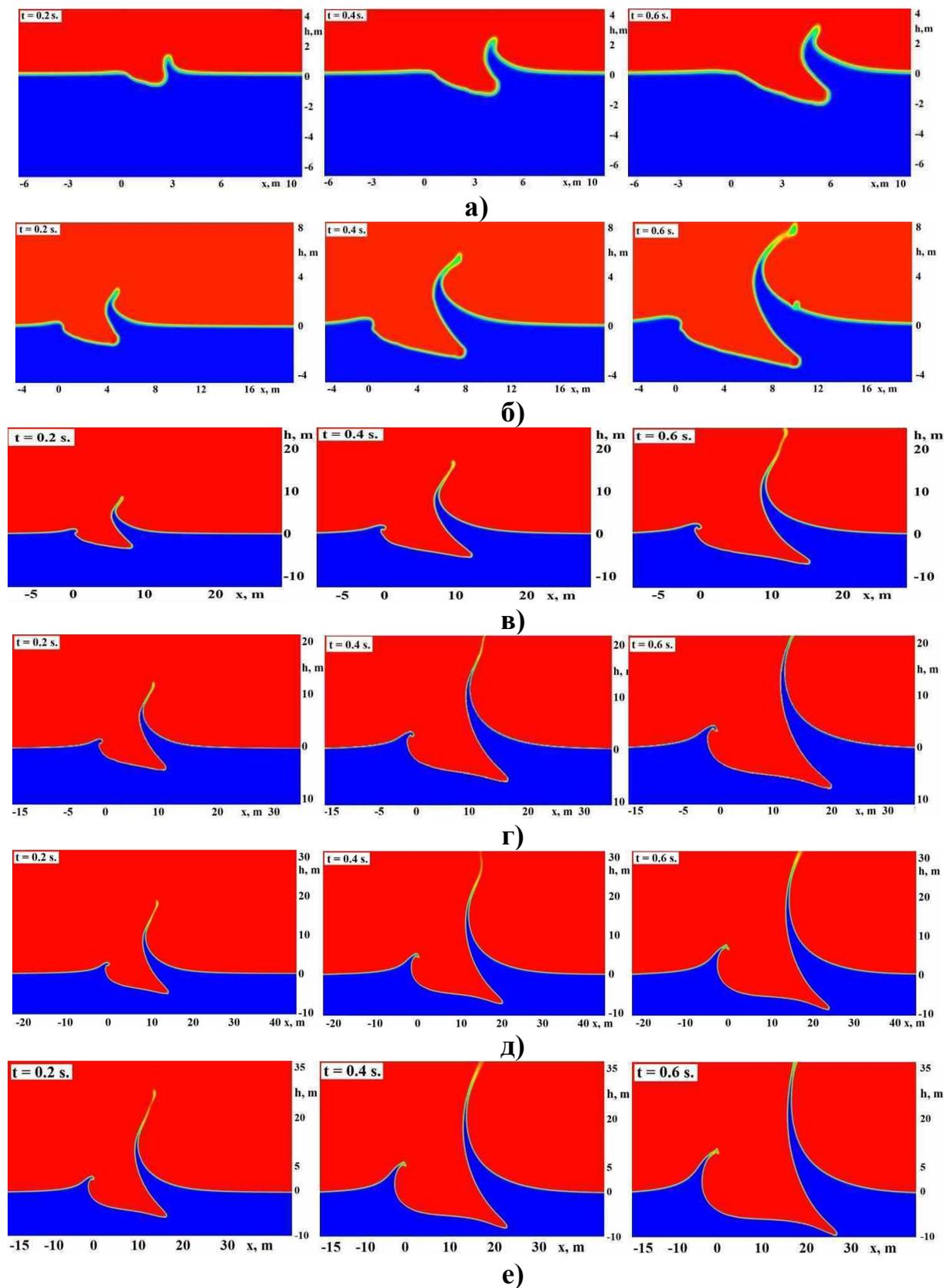


Рис. 6. Падение тела под углом 20° со скоростью:
 а - 10 м/с; б - 30 м/с; в - 60 м/с; г - 100 м/с; д - 150 м/с; е - 200 м/с

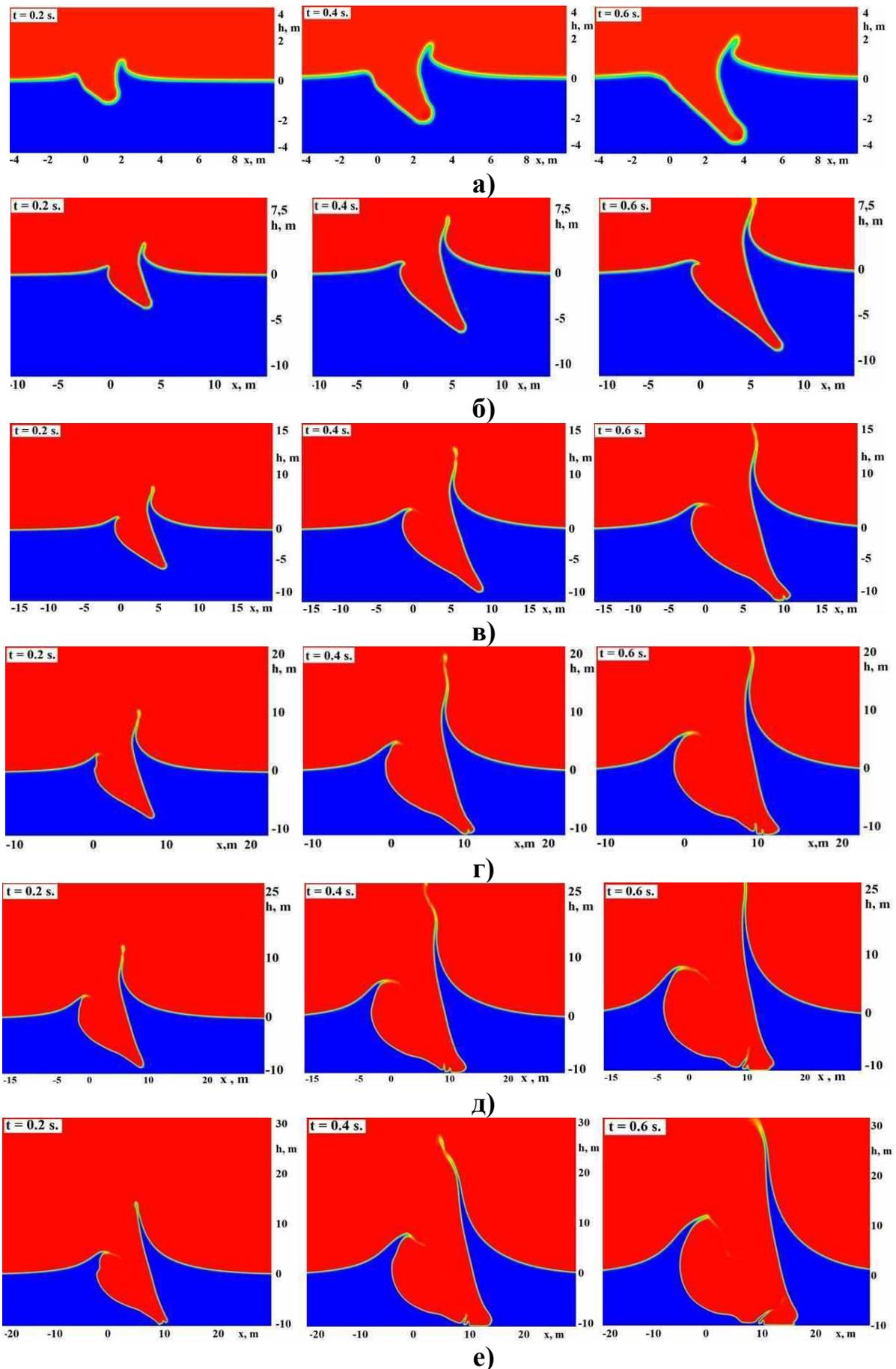


Рис. 7. Падение тела под углом 45° со скоростью:
 а - 10 м/с; б - 30 м/с; в - 60 м/с; г - 100 м/с; д - 150 м/с; е - 200 м/с

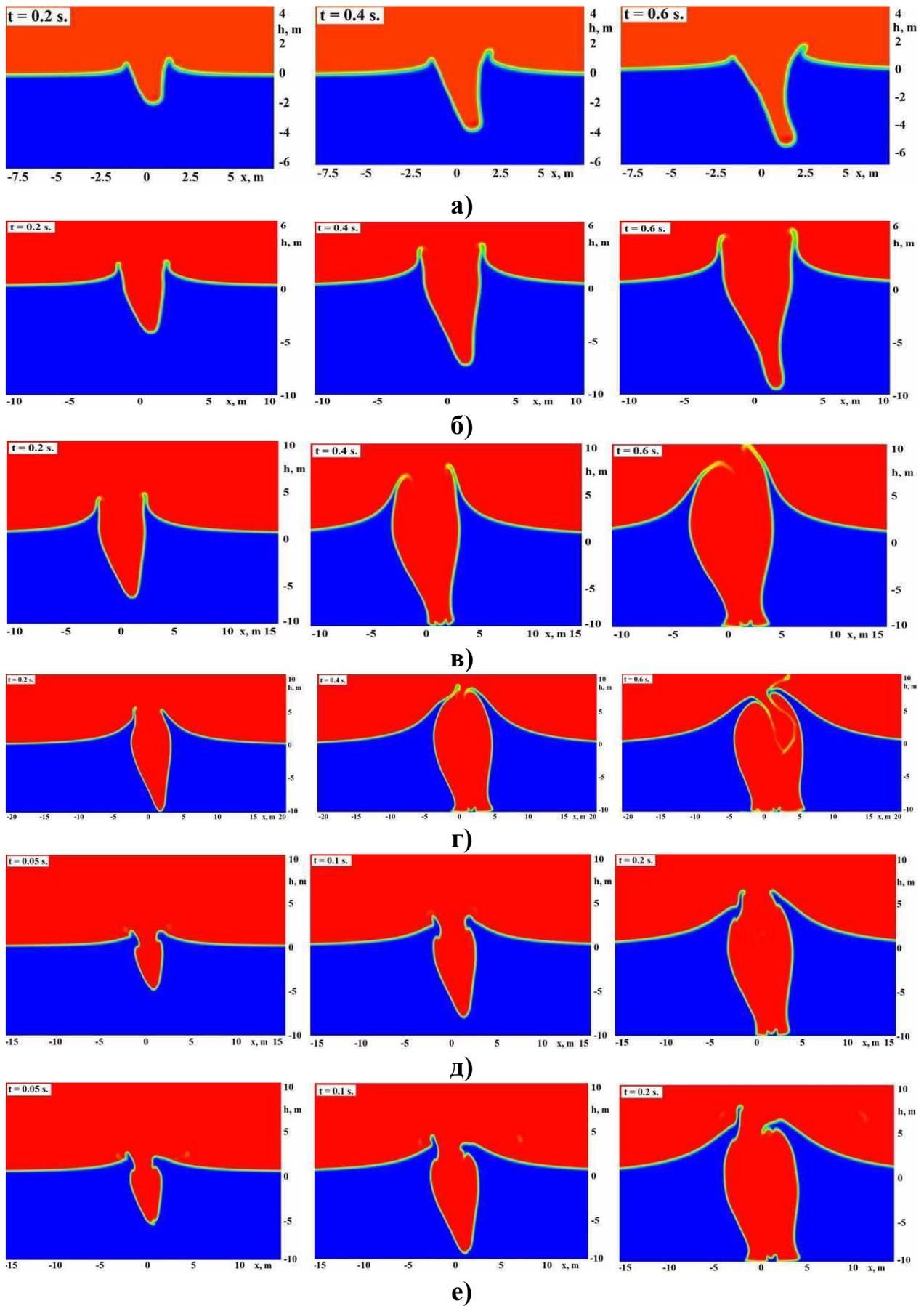


Рис. 8. Падение тела под углом 80° со скоростью
 а - 10 м/с; б - 30 м/с; в - 60 м/с; г - 100 м/с; д - 150 м/с; е - 200 м/с

Изменение угла падения до 45 град уменьшает амплитуду передней волны и увеличивает амплитуду задней, при этом размер полной каверны становится больше (рис. 7). При этом незначительное увеличение угла падения резко меняет форму передней волны, которая от «серповидной» формы переходит к вертикальному всплеску вверх и эта закономерность усиливается при увеличении скорости. Обрушение данной волны будет происходить по схеме падения вертикально вниз с уклоном на внутреннюю часть каверны, практически на захватывая внешней её стороны по ходу падения тела. Во внутреннюю часть каверны будет обрушаться и задняя волна. При таких режимах падения образование внутренней части каверны будет продолжаться даже при обрушении передней и задней волн и в итоге приведет к образованию большой воздушной полости в толще воды. По мере увеличения угла падения такая картина будет сохраняться.

Увеличение угла падения до близкого к вертикальному выравнивает амплитуды выбросов воды по ходу и за ходом падения тела (рис. 8). При этом при увеличении угла каверна начинает схлопываться раньше. При вертикальном падении каверна будет иметь симметричную структуру. В этом случае схлопывание каверны начинается гораздо раньше, чем при меньшем угле падения, а выбросы воды имеют гораздо меньшую амплитуду (может отличаться в разы), чем основной выброс воды при падении под углом.

Оценить закономерность изменения геометрии каверны можно по следующим параметрам (рис. 9): R_{in} – внутренний радиус каверны; R_{out} – внешний радиус каверны; H_{in} – внутреннее углубление каверны; H_{out} – внешний подъем каверны.

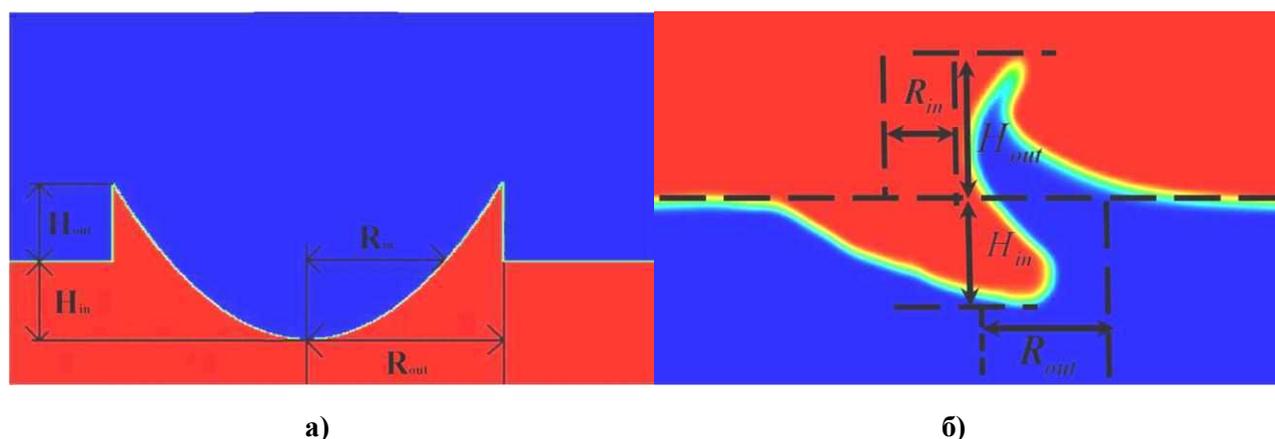


Рис. 9. Основные параметры каверны:

a – симметричная каверна; *б* – косая каверна, образованная падением под углом

В табл. 3 приведены значения этих параметров для различных скоростей и углов падения. Значения для скоростей падения 10-100 м/с представлены на момент времени 0,4 с, а для скоростей 150 и 200 м/с на момент 0,2 с. В эти моменты времени каверна из активной фазы роста начинает переходить в фазу обрушения. Для величины H_{out} падения под углом приводится максимальное значение одного из образовавшихся выбросов воды. Измерения между точками проводились в автоматическом режиме с использованием специальной функции вычисления расстояния постпроцессора пакета программ ЛОГОС (крайние точки выбирались в соответствии с рис. 9 справа). Отметим, что слишком точно определить величины этих параметров весьма проблематично из-за размытости границ, поэтому приводятся приблизительные (оценочные) данные.

Как видно из табл. 3, изменение параметров относительно вертикального падения наблюдается до и после 20 град. При этом внутренний радиус каверны R_{in} и внутреннее

углубление каверны H_{in} до 20 градусов увеличиваются, а после 20 градусов начинают уменьшаться постепенно до параметров вертикального падения. С внешним радиусом каверны R_{out} и внешним подъемом каверны H_{out} изменения происходят с точностью до наоборот. Изменение параметров при увеличении скорости падения происходит более резко, а самое существенное изменение наблюдается при небольших углах падения. Изменение как в сторону увеличения, так и уменьшения параметров происходит по линейному закону (рис. 10).

Таблица 3

Изменение параметров каверны при падении

Скорость падения, м/с	Угол падения	$R_{in}, м$	$R_{out}, м$	$H_{in}, м$	$H_{out}, м$
10	0	1.0	2.5	3.3	1.2
	20	1.6	2.0	1.3	1.8
	30	1.4	1.8	1.9	2.0
	45	1.3	2.2	2.4	1.8
	60	1.2	2.3	3.0	1.5
	80	1.1	2.4	3.1	1.3
30	0	2.5	6.0	9.5	4.6
	20	3.6	4.0	3.5	6.2
	30	3.3	4.2	5.0	6.0
	45	3.0	4.6	7.0	5.6
	60	2.7	5.1	8.3	5.2
	80	2.6	5.6	8.9	4.7
60	0	3.2	8.0	9.8	7.0
	20	5.0	6.0	4.5	10.5
	30	4.4	6.5	6.0	10.0
	45	4.0	6.9	8.7	8.8
	60	3.7	7.4	9.4	8.0
	80	3.3	7.8	9.7	7.5
100	0	4.2	10.0	10.0	10.0
	20	6.7	7.0	5.8	16.0
	30	5.7	7.2	7.9	14.5
	45	5.0	8.0	10.0	13.0
	60	4.6	9.0	10.0	11.7
	80	4.4	9.7	10.0	11.0
150	0	4.7	15.0	10.0	10.2
	20	7.5	10.5	6.1	18.0
	30	6.3	11.1	7.9	14.0
	45	5.6	12.0	10.0	13.7
	60	5.1	13.2	10.0	12.2
	80	4.8	14.5	10.0	11.1
200	0	5.0	18.0	10.0	11.0
	20	8.0	11.0	6.4	19.0
	30	7.0	12.0	8.5	14.5
	45	6.1	13.3	10.0	14.0
	60	5.6	15.8	10.0	13.0
	80	5.1	17.0	10.0	12.0

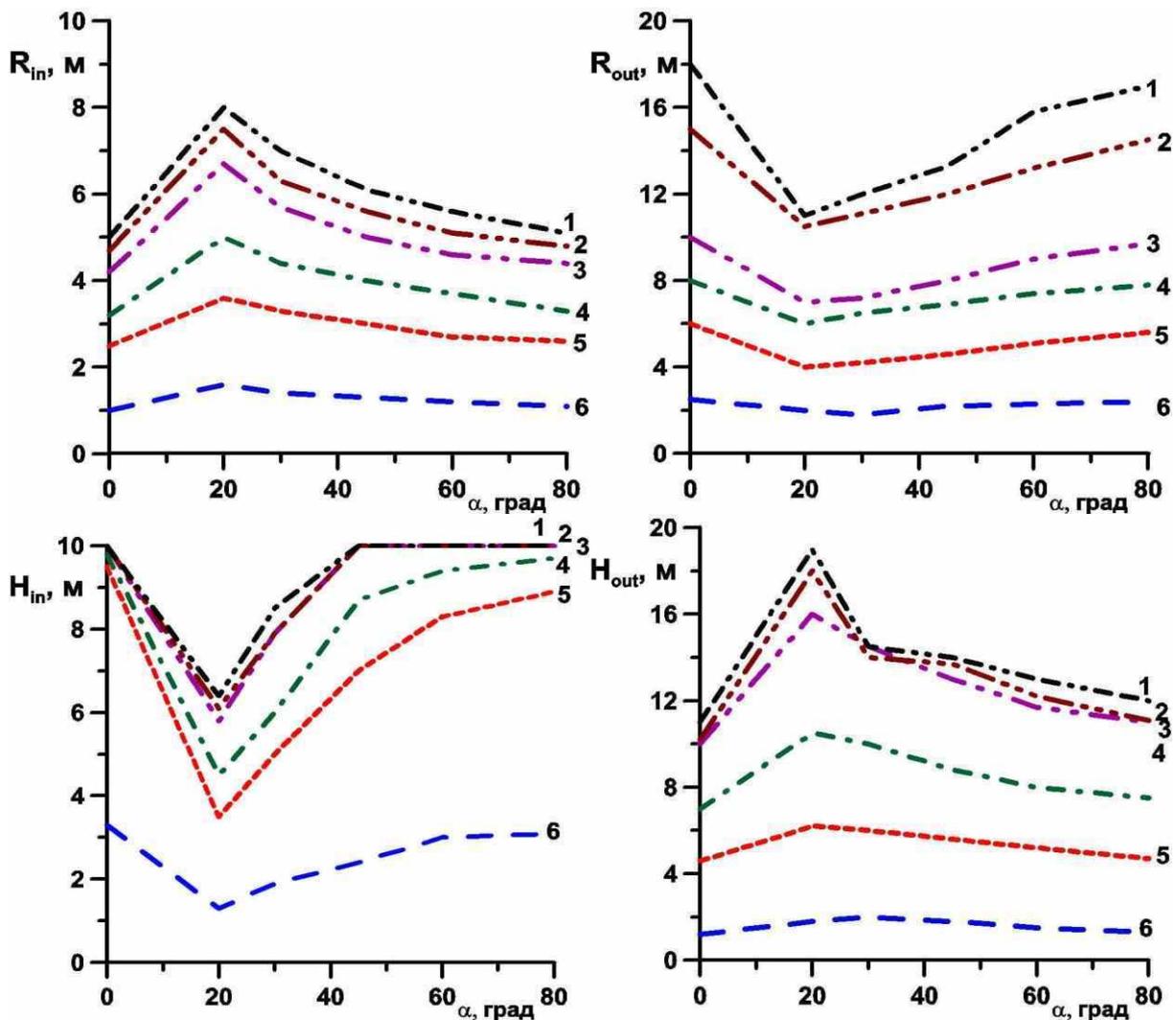


Рис. 10. Графики изменения параметров каверны от угла падения на различных скоростях: 1 – 200 м/с; 2 – 150 м/с; 3 – 100 м/с; 4 – 60 м/с; 5 – 30 м/с; 6 – 10 м/с

Изменение параметров при малых углах происходит по линейному закону. При увеличении угла тенденция сохраняется и приобретает такой же характер при существенном увеличении скорости. Хотя, как видно из графиков, закономерность изменения параметров примерно одинаковая на различных скоростях.

Более резкое изменение параметров на больших скоростях также указывает на то, что для таких режимов падения необходимо учитывать изменение термодинамических свойств жидкости и газа (в частности сжимаемость).

Выводы

В работе представлены результаты численного исследования падения тела в воду при различных углах входа и разных скоростях. Для численных экспериментов используется модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса для многофазных течений со свободной поверхностью. Модель основана на односкоростном приближении и базируется на полностью неявной связи скорости и давления. Правильное описание моделью падения тел и их движения в воде показано при численном решении задачи образования дорожки Кармана и падения тела в воду.

Предложенная модель была использована для исследования размеров области возмущения и выявления закономерностей изменения параметров каверны. Показано, что изменение параметров каверны наиболее интенсивно происходит при малых углах падения и под-

чиняется линейному закону. Интенсивность изменения растёт по мере увеличения скорости, а тенденция линейного изменения сохраняется.

Библиографический список

1. **Лаврентьев, М.А.** Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Главная редакция физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1973.
2. **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.
3. **Gekle, S.** Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact / S. Gekle [et al.] // Physical Review Letters, 0031-9007/10/104(2) /024501(4).
4. **Aristoff, J.M.** On falling spheres: the dynamics on water entry and descent along a flexible beam // Partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy at Massachusetts Institute of Technology. – USA: MIT. 2009.
5. **Pierazzo, E.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets / E. Pierazzo [et al.] // Meteoritics & Planetary Science 43. 2008. № 12. P. 1917–1938.
6. **Комаров, А.А.** Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок / А.А. Комаров, В.В. Казеннов // Вестник МГСУ. Сер. Гидравлика. Инженерная гидрология // Гидротехническое строительство. 2014. № 5. С. 135–143.
7. **Козелков, А.С.** Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса с источниками различных типов / А.С. Козелков [и др.] // Изв. РАН. Сер. Механика жидкости и газа. 2015. №2. С. 142–150.
8. **Козелков, А.С.** Эффекты, сопровождающие вхождение метеорита в водную среду // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 3(105). С. 48–77.
9. **Козелков, А.С.** Цунами космогенного происхождения / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 2(104). С. 26–35.
10. **Логвинович, Г.В.** Гидродинамика течений со свободными границами / Г.В. Логвинович. – Киев: Наукова Думка, 1969.
11. **Левин, Б.В.** Физика цунами и родственных явлений в океане / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус-К, 2005.
12. **Ward, S.N.** Asteroid impact tsunamis: A probabilistic hazard assessment / S.N. Ward, E. Asphaug // Icarus. 2000. V. 145. №1. P. 64–78.
13. **Kharif, C.** Asteroid impact tsunamis / C. Kharif, E. Pelinovsky // C. R. Physique. 2005. № 6. P. 361–366.
14. **Badescu, V.** Dynamics and Coastal Effects of Tsunamis Generated by Asteroids Impacting the Black Sea / V. Badescu, D. Isvoranu // Pure Appl. Geophys. 2011. № 168. P. 1813–1834.
15. **Волков, К.Н.** Течения газа с частицами / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008.
16. **Darwish, M.** A coupled finite volume solver for the solution of incompressible flows on unstructured grids / M. Darwish, I. Sraj, F. Moukalled // Journal of Computational Physics. 2009. V. 228. P. 180–201.
17. **Ferziger, J. H.** Computational methods fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric // Springer, 2001.
18. **Rhie, C.M.** A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation / C.M. Rhie, W.L. Chow // AIAA. 1983. V. 21. P. 1525–1532.
19. **Jasak, H.** Error Analysis and Estimation for the finite volume method with applications to fluid flows / H. Jasak. Thesis submitted for the degree of doctor. Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1996.
20. Математические модели и алгоритмы для численного моделирования задач гидродинамики и аэродинамики: учеб. пособие / А.С. Козелков [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 166 с.
21. **Козелков, А.С.** Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках методом отсоединенных вихрей / А.С. Козелков [и др.] // Математическое моделирование. 2013. Т. 26. №8. С. 81–96.
22. **Роуч, П.** Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980.

23. **Waclawczyk, T.** Remarks on prediction of wave drag using VOF method with interface capturing approach / T. Waclawczyk, T. Koronowicz // Archives of civil and mechanical engineering, 2008. V. 8. P. 5–14.
24. **Mittal, R.** Immersed boundary methods / R. Mittal, G. Iaccarino // Ann Rev Fluid Mech. 2005. V. 37. P. 239–61.
25. **Posa, A.** Large-eddy simulations in mixed-flow pumps using an immersed-boundary method / A. Posa [et al.] // ComputFluids, 2011. V. 47(1). P. 33–43.
26. **Козелков, А.С.** Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС / А.С. Козелков [и др.] // Журнал ВАИТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 4. С. 44–56.
27. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4(104). С. 21–69.
28. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974.

*Дата поступления
в редакцию 15.07.2015*

A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin², E.N. Pelinovsky^{2,3},

**MODELING OF A BODY FALLING INTO THE WATER UNDER DIFFERENT
CONDITIONS BASED ON THE NUMERICAL SOLUTION OF THE NAVIER-STOKES
EQUATIONS FULLY IMPLICIT METHOD**

FSUE «RFNC – VNIIEF»¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Institute of Applied Physics RAS³

Purpose: In this paper results of numerical investigation of a body falling into the water under different conditions based on the Navier-Stokes equations are discussed.

Method: For the numerical simulation of multiphase flows with a free surface is used a model of a single-speed approach based on fully implicit link of speed and pressure.

Results: The basic formulas and equations sample form of the coefficients, and the results of model verification on the task of education Karman motion of the body and the body fall into the water are presented. On the basis of the proposed model has been simulated as a vertical entry and entry from different angles. The dimensions of the perturbations are studied and regularities of changes of parameters are revealed.

Application domain: Modeling of bodies falling in water under various conditions and study all parameters of fall.

Key words: Navier-Stokes equations, numerical simulation, implicit method, fluid, solid, interaction.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.391

М. О. Дербасов², А. С. Лаптев³, А. А. Филяков¹, В. Е. Гай¹

РЕЧЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
 ЗАО «Интел»²,
 Нижегородский радиотехнических колледж³

Работа посвящена описанию метода распознавания речевых команд в условиях априорной неопределенности в задачах управления робототехнической системой с позиции активного восприятия. В отличие от существующих методов распознавания, работающих на уровне отсчетов, предлагаемый метод реализует концепцию грубо-точного анализа сигнала, описанную в теории активного восприятия.

Ключевые слова: распознавание голосовых команд, теория активного восприятия.

Введение

Робототехническая система является сложным программно-аппаратным комплексом, активно взаимодействующим с внешней средой. Структурно это взаимодействие можно представить в виде схемы, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Структурное представление взаимодействий

Задача ручного управления робототехнической системой еще полностью не решена. Основной проблемой является отсутствие удобного и простого в обращении, особенно для неподготовленного оператора, пользовательского интерфейса. Даже для проведения простых манипуляций с физическими предметами может потребоваться несколько десятков комбина-

ций команд. Создание же интерфейса, понятного и эргономичного для человека, в таком ключе становится почти невыполнимой задачей.

Одним из решений данной проблемы может стать управление устройством при помощи речевых команд, подаваемых человеком. Существует несколько больших классов методов распознавания речи: скрытые Марковские модели; нейронные сети; методы дискриминантного анализа, основанные на Байесовской дискриминации; динамическое программирование – временные динамические алгоритмы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. В данной статье будет рассматриваться процесс распознавания с позиции системного анализа.

Процесс распознавания с позиций системного анализа можно разделить на три этапа: формирование исходного описания, нахождение системы признаков и построение решающего правила. Существуют две формулировки задачи распознавания: в узком и широком смыслах [1]. В узком смысле задача распознавания сводится к построению классификатора, в широком – к распознаванию в условиях априорной неопределённости (в данном случае не известны множество признаков и множество классов).

Известны проблемы, связанные с применением существующих методов распознавания образов [2]:

1) проблема формирования исходного описания. Связана с тем, что существующие модели и методы распознавания адаптированы к конкретному классу прикладных задач и требуют априорного знания свойств анализируемых сигналов;

2) проблема формирования системы признаков. Связана с выбором конечного множества признаков, обеспечивающих однозначность решения задачи классификации на этапе распознавания и отвечающая требованиям необходимости и достаточности. Этап выбора системы признаков необходим для сокращения размерности входного описания. Поскольку задача сокращения размерности – оптимизационная задача, то для её решения следует использовать критерий информативности. Отсутствие модели априорной неопределённости и модели её раскрытия породило большое количество методов в выборе критерия информативности, что привело к большому числу возможных вариантов признаков [3, 4];

3) проблема принятия решений в условиях априорной неопределённости. Этап принятия решения заключается в сравнении с имеющимся эталоном признакового описания анализируемого сигнала. Предполагается, что эталону соответствует компактное множество точек в системе признаков. Однако помехи, структурные изменения одного и того же представителя класса приводят к перекрытию классов. Поэтому проблема принятия решения замыкается на проблеме формирования системы признаков, позволяющей сформировать эталон, имеющий компактное представление.

Теория активного восприятия предлагает решение описанных проблем [1]. Настоящая работа посвящена применению данной теории к анализу речевых сигналов для управления робототехнической системой.

1. Обзор методов распознавания речевых сигналов

Рассмотрим методы, применяемые на разных этапах решения задачи распознавания [5]:

1) этап предварительной обработки звукового сигнала. Обычно он заключается в фильтрации сигнала и выделении границ речевой активности [6, 7]. Учитывая, что задача распознавания решается в условиях априорной неопределённости (информация о помехе отсутствует), выбрать подходящий фильтр сложно;

2) для создания описания входного сигнала вычисляются признаки: коэффициенты спектра Фурье; кепстральные коэффициенты; мел-частотные кепстральные коэффициенты; коэффициенты линейного предсказания (linear predictive coding); коэффициенты вейвлет-спектра и т. д. Необходимо отметить, что существующие методы обработки речевых сигналов основаны на стратегии точно-грубого анализа, который заключается в том, что признаки вычисляются по участку сигнала длительностью около 25 мс [4, 5];

3) на этапе классификации в системах распознавания речи взаимодействуют несколько модулей [8]:

а) модуль акустической модели позволяет по входному речевому сегменту определить наиболее соответствующие ему шаблоны отдельных звуков. При акустическом моделировании используются скрытая марковская модель, модель гауссовой смеси, нейронная сеть, метод опорных векторов. Применение данных моделей предполагает их предварительное обучение и выбор параметров, что, в условиях априорной неопределённости является не тривиальной работой;

б) модуль модели языка служит для определения наиболее вероятной последовательности слов. Необходимость использования языковой модели объясняется ростом словаря распознаваемых слов, в результате чего увеличивается число слов, похожих по звучанию. Выделяют дискретные (модель с конечным числом состояний, на основе теории формальных языков, на основе лингвистических знаний) и статистические модели (n -граммная модель, модель на основе деревьев решений, статистическое обобщение формальных языков);

в) декодер объединяет данные, поступающие от акустической и языковой моделей, и формирует результат распознавания.

2. Метод распознавания речевых сигналов на основе теории активного восприятия

В теории активного восприятия (ТАВ) описан метод грубо-точного анализа, используемый для распознавания изображений. Предполагается, что похожие механизмы работают в слуховой системе, исходя из чего данный метод может быть применён и к анализу речевых сигналов. Рассмотрим предлагаемую реализацию этапов системы распознавания с точки зрения ТАВ.

2.1. Предварительная обработка

В условиях априорной неопределённости процесс раскрытия неопределённости звукового сигнала заключается в дихотомии его области определения G на равные части. Поскольку все отсчёты сигнала находятся в отношении эквивалентности, множество отсчётов можно разбить на любое число подобластей $G_{ij} \subseteq G$ без пересечения этих областей между собой. Последовательное применение операции дихотомии позволяет сгенерировать пирамидальную структуру (рис. 2).

Таким образом, этап предварительной обработки заключается в выполнении операции дихотомии и формировании подобластей G_{ij} .

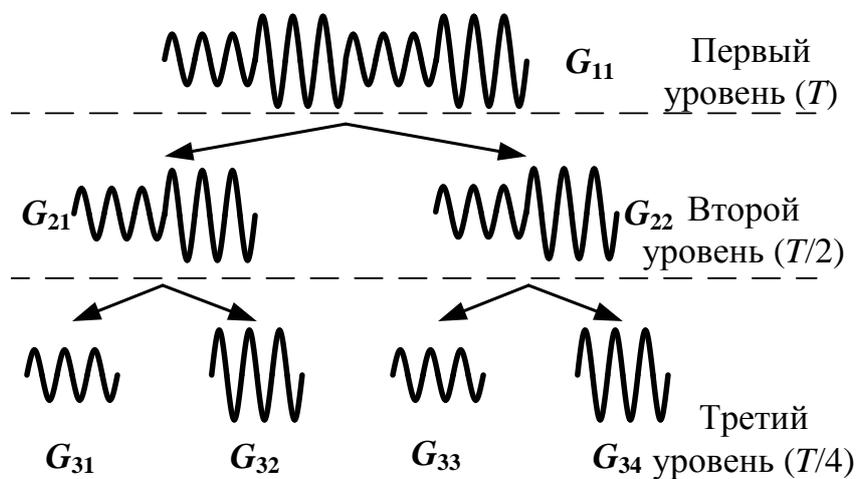


Рис. 2. Пирамида описания сигнала:

i – уровень разложения; j – номер области на i -м уровне;
 T – длительность сигнала

2.2. Вычисление признаков

Рассмотрим предлагаемый метод вычисления признакового описания подобласти $G_{ij} \subseteq G$:

1) отсчёты сигнала, относящиеся к подобласти G_{ij} , разбиваются на множество сегментов $\mathbf{g} = \{g_k\}$ длиной $L * 16$ отсчётов со смещением в S отсчётов, $k = \overline{1, N}$, где N – число сегментов в подобласти G_{ij} ;

2) к каждому сегменту g_k применяется U -преобразование (U -преобразование является базовым в теории активного восприятия), в результате формируется спектральное представление каждого сегмента $u_k = U[g_k]$, $\mathbf{u} = \{u_k\}$, где U – оператор вычисления U -преобразования;

3) по вычисленному спектральному представлению u_k сегмента g_k определяются замкнутые группы $p_k = P[u_k]$, $\mathbf{p} = \{p_k\}$, где P – оператор вычисления замкнутых групп;

4) вычисляется гистограмма замкнутых групп $d_{ij} = H[\mathbf{p}]$, где H – оператор формирования гистограммы замкнутых групп, которая и является признаковым описанием области G_{ij} ;

5) признаковые описания областей G_{ij} объединяются в вектор x .

Отметим, что при создании признакового описания используется принцип рекурсии, т. е. к сигналу последовательно применяется одна и та же операция – дихотомия. Таким образом, для выявления структуры сложного сигнала применяется одна и та же операция.

2.3. Принятие решения (классификация)

Этап классификации может быть реализован с помощью нескольких классификаторов. В данной работе используется линейный метод опорных векторов (SVM), также известный под названием метод классификации с максимальным зазором. Основная идея этого метода заключается в переводе исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющих гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве. Две параллельные гиперплоскости строятся по обе стороны от гиперплоскости, разделяющей конечные классы. Разделяющей гиперплоскостью будет гиперплоскость, максимизирующая расстояние до двух параллельных гиперплоскостей. Метод работает в предположение, что чем больше разница или расстояние между этими параллельными гиперплоскостями, тем меньше будет средняя ошибка классификатора.

Входные данные для классификатора могут пройти предварительную нормализацию, но это требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Решающее правило метода опорных векторов выглядит следующим образом:

$$a(x) = \text{sign} \left(\sum_{j=1}^n w_j x^j - w_0 \right),$$

где $x = (x^1, \dots, x^n)$ – признаковое описание объекта x (одно из возможных описаний, приведённых выше); вектор $w = (w^1, \dots, w^n)$ и скалярный порог w_0 являются параметрами алгоритма. Метод опорных векторов является бинарным классификатором. В данной работе для решения задачи мультiclassовой классификации используются два способа сведения данной задачи к бинарной [5]:

1) подход «один против всех» (One-vs-All) заключается в обучении N классификаторов по следующему принципу:

$$f_i(x) = \begin{cases} \geq 0, & \text{если } y(x) = i, \\ < 0, & \text{если } y(x) \neq i, \end{cases}$$

вычисляются все классификаторы и выбирается класс, соответствующий классификатору с большим значением

$$a(x) = \arg \max_{i \in \overline{1, N}} f_i(x);$$

2) подход «один против одного» (One-vs-One) заключается в формировании $N(N-1)$ классификаторов, которые разделяют объекты пар различных классов,

$$f_{ij}(x) = \begin{cases} +1, & \text{если } y(x) = i, \\ -1, & \text{если } y(x) = j. \end{cases}$$

После обучения бинарных классификаторов, решение принимается следующим образом:

$$a(x) = \arg \max_{i \in \overline{1, N}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N f_{ij}(x).$$

При классификации используется линейное ядро $k(x, y) = x^T y + c$.

Структурная схема системы классификации принятого сигнала представлена на рис. 3.

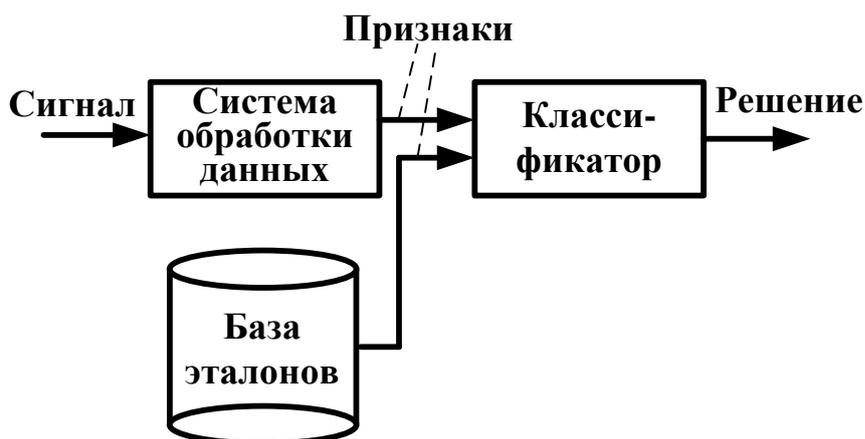


Рис. 3. Классификация принятого сигнала

3. Вычислительный эксперимент

3.1. Описание тестовых данных

В вычислительном эксперименте использовались звуковые записи следующих слов: Вперёд, Лево, Назад, Право, Стоп. Выполнено 50 записей для каждого слова. Вычисления и запись базы данных выполнялись на следующей конфигурации: процессор – Intel Core i5-2410M, объём оперативной памяти 8 Гб. Вычислительный эксперимент заключается в проверке точности работы описанного метода распознавания.

Таблица 1

Точность классификации в зависимости от числа дихотомий в процентах

	SVM. 1-1		SVM. 1-N	
	нормализованные	ненормализованные	нормализованные	ненормализованные
1	2	3	4	5
1 / 1	88	86	95	96
1 / 2	89	85	96	96

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
1 / 4	85	81	95	91
1 / 8	83	78	94	93
2 / 1	91	93	97	97
2 / 2	91	92	98	97
2 / 4	91	91	97	97
2 / 8	89	89	96	95
4 / 1	90	92	96	94
4 / 2	90	93	96	95
4 / 4	90	91	96	95
4 / 8	88	92	96	94

Выводы

Проведение предварительной нормализации значений повышает точность классификации в обоих подходах, но это увеличивает вычислительные затраты конечного алгоритма. Подход «один против всех» позволяет получить более высокие показатели при распознавании. Как и подход «один против всех», так и «один против одного» дают достаточно высокие показатели, что позволяет выбирать при реализации наиболее подходящий по доступным вычислительным ресурсам.

Заключение

В работе рассматривается метод распознавания речевых команд в условиях априорной неопределенности в задачах управления робототехнической системой с позиции активного восприятия. Предлагается несколько вариантов классификаторов. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Библиографический список

1. **Утробин, В. А.** Элементы теории активного восприятия изображений // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2010. Т. 81. № 2. С. 61–69.
2. Распознавание образов: состояние и перспективы / К. Верхаген [и др.]. – М.: Радио и связь, 1985. – 104 с.
3. **Загоруйко, Н. Г.** Методы распознавания и их применение / Н.Г. Загоруйко. – М.: Сов. радио, 1972. – 208 с.
4. **O'Shaughnessy, D.** Acoustic Analysis for Automatic Speech Recognition // Proceedings of the IEEE. – 2013. V. 101. N. 5. P. 1038–1053.
5. **Карасиков, М.Е.** Поиск эффективных методов снижения размерности при решении задач многоклассовой классификации путем её сведения к решению бинарных задач М.Е. Карасиков, Ю.В. Максимов // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 1. № 9. С. 1273–1290.
6. **Saon, G.** Large-Vocabulary Continuous Speech Recognition Systems: A Look at Some Recent Advances / G. Saon, J.-T. Chien // IEEE Signal Processing Magazine. 2012. V. 29. N. 6. P. 18–33.
7. **Котомин, А. В.** Распознавание речевых команд с использованием сверточных нейронных сетей // Научно-технические информационные технологии SIT-2012: труды молодежной конф. – Переславль-Залесский, 2012. С. 17–28.
8. **Котомин, А. В.** Предобработка звукового сигнала в системе распознавания речевых команд // Научно-технические информационные технологии SIT-2011: труды XV молодежной конф. – Переславль-Залесский, 2011. С. 25–38.

Дата поступления
в редакцию 02.07.2015

M. O. Derbasov², A. A. Laptev³, A. A. Filyakov¹, V. E. Gai¹

**VOICE CONTROL OF ROBOTS FROM THE STANDPOINT
OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
CJSC Intel²,
Nizhny Novgorod radio engineering College³

This abstract related to a description of the method for recognition of voice commands in conditions of a priori uncertainty in control problems of robots. In contrast to a signal samples methods this method represents coarse-to-fine conception of signal analyze described in active perception theory. Provides results of computing experiment for confirming the efficiency of this method.

Proposed to implement two stages of recognition: preprocessing phase and phase calculation signs. At the stage of pre-treatment is performed the integration signal. At a stage of calculation of signs – the algebra of groups and operation of a dichotomy is used(the one-dimensional histogram of the closed groups). Dimension of system of signs for one sample are 4·840 elements. At the stage of classification used a support vector machine. Two approaches to creation of the multiclass qualifier are considered: «one-against-one» and «one - against – all».

Performed testing the proposed method based on cross-checking. The accuracy of the classification on a data-base of the 5 commands (50 realizations recorded each word) is 98%. The results can be used in the creation of methods of continuous speech recognition. The developed system of signs can also be used in other tasks classification signals.

Key words: speech command recognition, theory of active perception.

УДК 004.934

Д.А. Сорокоумова, О.Н. Корелин, А.В. Сорокоумов

**ПОСТРОЕНИЕ И ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматривается способ решения задачи распознавания речи на примере распознавания отдельных слов ограниченного словаря с использованием нейронной сети прямого распространения, обучаемой методом обратного распространения ошибки. Приведены практические результаты обучения построенной нейронной сети при различных размерах обучающей выборки.

Ключевые слова: распознавание речи, нейронные сети, алгоритм обратного распространения ошибки, обучение, скорость обучения.

Введение

Задача распознавания речи – одна из наиболее актуальных задач современности. Несмотря на то, что на данный момент существует множество готовых систем распознавания речи, основанных на различных технологиях, задача распознавания речи не полностью решена, так как существующие системы имеют определенные недостатки. В частности, зависимость работы системы от доступа к средствам передачи данных и недостаточная точность распознавания.

Одним из перспективных направлений в решении задач распознавания речи является применение искусственных нейронных сетей. Нейронные сети широко применимы в решении различных классов задач распознавания образов ввиду способности к обобщению.

Исходные данные задачи

Рассмотрим аспекты построения и применения нейронных сетей для решения задачи распознавания речи на примере задачи распознавания чисел от 1 до 9, т.е. слов «раз», «два», «три», «четыре», «пять», «шесть», «семь», «восемь» и «девять» соответственно. Поскольку звуки человеческой речи лежат в частотном диапазоне от 100 до 4000 Гц, для решения поставленной задачи достаточно использовать частоту дискретизации 11025 Гц для оцифровки речевых сигналов. Использование данной частоты позволяет уменьшить поток аудиоданных, избежав при этом потери полезных составляющих сигнала. В рамках поставленной задачи звуковые сигналы представлены наборами фреймов, каждый из которых содержит 512 отсчетов.

На основе экспериментального анализа аудиозаписей различных вариантов произношения исследуемых слов была определена максимальная длительность полезного сигнала (рис. 1), составившая 1 с. Соответственно минимальный набор фреймов, охватывающий длительность полезного сигнала, должен состоять из 20 фреймов. Недостающие отсчеты исходного сигнала заполняются нулями.

В качестве входных данных для обучения нейронной сети будем использовать результаты преобразования Фурье, выполненного для каждого анализируемого фрейма. Такой подход позволяет анализировать сигнал как в частотной области (использование спектра фрейма), так и во временной – путем разбиения исходного сигнала на фреймы. Так как значимая информация содержится в действительном частотном спектре, после выполнения преобразования Фурье, мы используем действительный спектр сигнала, отбрасывая информацию о фазе (рис. 2, б).

На выходе нейронной сети ожидаем число, находящееся в диапазоне от 1 до 9 и однозначно соответствующее своему словесному представлению, поданному на вход нейронной сети.

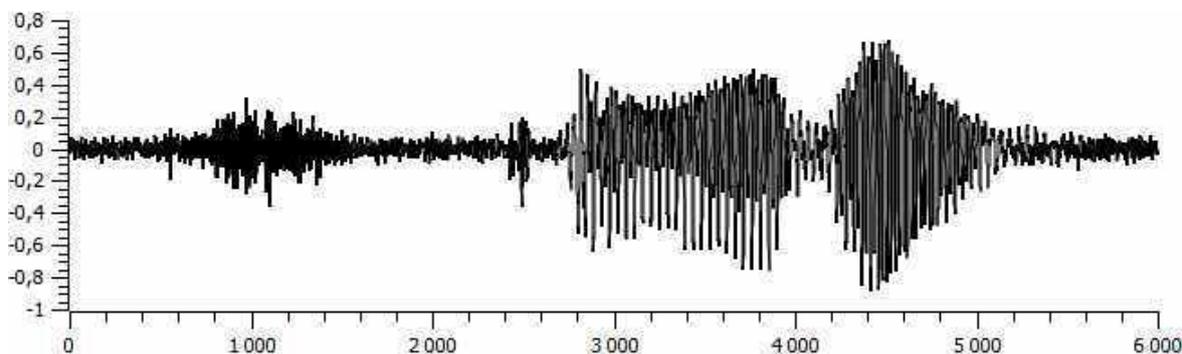


Рис. 1. Временная диаграмма слова «четыре»

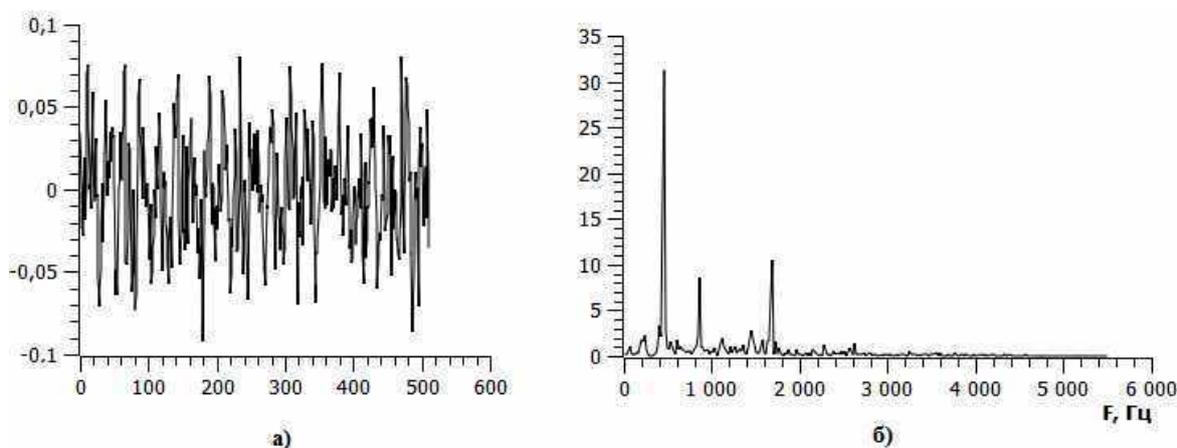


Рис. 2. Первый фрейм сигнала «четыре»: а – временная диаграмма; б – спектр выделенного фрейма

Нейросетевой подход к решению поставленной задачи

Нейронная сеть – это совокупность соединенных и взаимосвязанных между собой искусственных нейронов, аккумулирующих входные значения и генерирующих выходной сигнал при помощи функции активации. Работу одного нейрона можно представить формулой

$$y_j = F\left(\sum w_{ij}x_i\right), \quad (1)$$

где y_j – выходной сигнал j нейрона; w_{ij} – вес связи между i и j нейронами; x_i – выходной сигнал i нейрона; F – функция активации нейрона.

Способы соединения нейронов в искусственных нейронных сетях определяют топологию нейронной сети. По структуре межнейронных связей можно выделить два вида нейронных сетей: нейронные сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети. В нейронных сетях прямого распространения связь между слоями однонаправленная – каждый нейрон связан только с нейронами следующего слоя. Такие сети являются статическими из-за отсутствия обратных связей и динамических элементов. Выход подобной сети зависит только от входных данных. Рекуррентные нейронные сети являются динамическими, благодаря наличию обратных связей. Выход рекуррентной нейронной сети зависит от её предыдущего состояния. Наиболее распространенными архитектурами нейронных сетей являются: сети прямого распространения; сети Хопфилда; карты Кохонена; машины Больцмана; сети на основе Адаптивной Резонансной Теории (АРТ); радиальные базисные функции (РБФ); каскадно-корреляционные сети.

Топология нейронной сети выбирается непосредственно для анализируемой задачи, учитывая особенности и сложность ее решения. Для решения некоторых типов задач уже существуют оптимальные конфигурации. Однако, если задача не может быть сведена ни к одному из известных типов, требуется синтезировать новую конфигурацию нейронной сети непосредственно для решаемой задачи. Поскольку не существует общего метода выбора оптимальной конфигурации нейронной сети, структура нейронной сети подбирается экспериментальным образом.

Наиболее наглядной структурой обладают сети прямого распространения сигнала, названные так ввиду того, что нейроны одного слоя могут быть соединены только с нейронами близлежащих слоев без обратных и рекуррентных связей. Обычно такие сети состоят из входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя. Простейшая структура такой сети изображена на рис. 3. Данная сеть имеет один скрытый слой, входной слой, состоящий из n нейронов и выходной слой, состоящий из m нейронов.

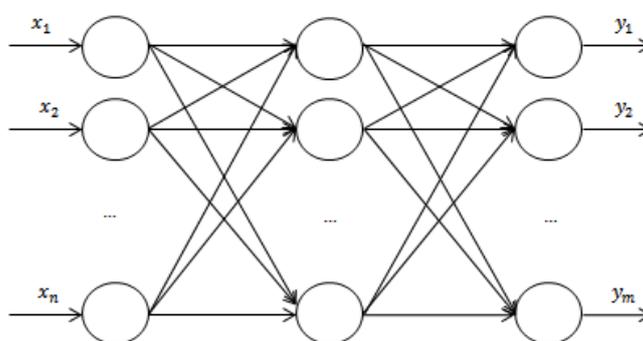


Рис. 3. Типовая структура нейронной сети

При помощи такой нейронной сети данные преобразуются из n -мерного входного пространства в m -мерное выходное. Преимуществом такого типа нейронных сетей является их относительная простота и наглядность, что позволяет анализировать работу используемой нейронной сети.

Исходя из формата входных и выходных данных, для решения поставленной задачи будем использовать нейронную сеть прямого распространения сигнала, входной слой которой содержит такое число нейронов, которое соответствует количеству анализируемых признаков (то есть количеству фреймов, умноженному на число анализируемых спектральных составляющих). Рекуррентные нейронные сети не могут быть использованы при решении поставленной задачи, так как из-за наличия обратных связей выходные значения рекуррентной нейронной сети зависят от предыдущего состояния сети, а поскольку произносимые слова в рамках решаемой задачи не связаны между собой, то предыдущее состояние сети не должно влиять на результат распознавания.

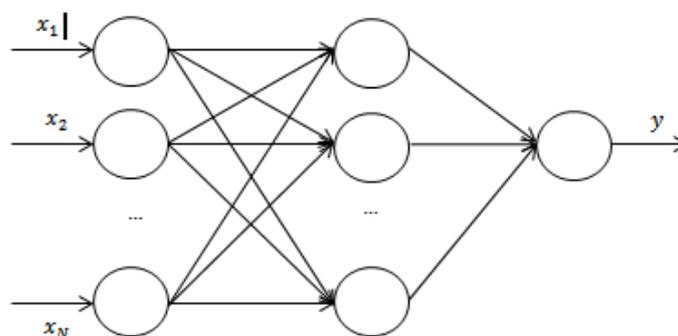


Рис. 4. Используемая структура нейронной сети

Для решения задач распознавания речи наиболее распространенным решением является использование такого числа нейронов в выходном слое, которое соответствует количеству распознаваемых объектов. Однако при решении данной задачи была выбрана архитектура нейронной сети, содержащая в выходном слое один нейрон, выходное значение которого находится в диапазоне от 0 до 1, что соответствует числам от 1 до 9. Используемая нейронная сеть также имеет один скрытый слой (рис. 4).

После определения топологии нейронной сети необходимо выбрать алгоритм обучения. Обучение нейронной сети может производиться двумя способами – с учителем и без учителя. При использовании обучения с учителем нейронной сети представляют пары векторов входных и выходных данных, в результате чего вычисляется ошибка и выполняется настройка весов нейронной сети. Алгоритм повторяется до тех пор, пока ошибка нейронной сети не достигнет требуемого минимального значения. В случае обучения без учителя, выходные данные заранее неизвестны, поэтому используются только входные данные.

При выборе алгоритма обучения необходимо учитывать топологию нейронной сети, модель анализируемых данных и предполагаемый способ обучения нейронной сети. Поскольку нами была выбрана нейронная сеть прямого распространения, будем использовать наиболее известный алгоритм обучения многослойного персептрона – алгоритм обратного распространения ошибки.

Обучение нейронной сети методом обратного распространения ошибки

Алгоритм обратного распространения ошибки предполагает вычисление ошибки, как выходного слоя, так и каждого нейрона обучаемой сети, а также коррекцию весов нейронов в соответствии с их текущими значениями. На первом шаге данного алгоритма веса всех межнейронных связей инициализируются небольшими случайными значениями (от 0 до 1). После инициализации весов в процессе обучения нейронной сети выполняются следующие шаги:

- прямое распространение сигнала;
- вычисление ошибки нейронов последнего слоя;
- обратное распространение ошибки.

Прямое распространение сигнала производится послойно, начиная со входного слоя, при этом рассчитывается сумма входных сигналов для каждого нейрона и при помощи функции активации генерируется отклик нейрона, который распространяется в следующий слой с учетом веса межнейронной связи по формуле (1). В результате выполнения данного этапа мы получаем вектор выходных значений нейронной сети.

Следующий этап обучения – вычисление ошибки нейронной сети как разницы между ожидаемым и действительным выходными значениями. Вычисление ошибки производится для каждого нейрона выходного слоя в соответствии с формулой

$$\delta_k = (EXP_k - y_k)F'(y_k), \quad (2)$$

где δ_k – полученная ошибка k -го нейрона выходного слоя; EXP_k - ожидаемое значение для k выходного нейрона; y_k - фактическое выходное значение k нейрона; $F'(y_k)$ – производная функции активации k нейрона.

Для последующих слоев нейронной сети ошибка нейрона вычисляется с использованием формулы

$$\delta_k = F'(y_k) \cdot \sum_{i=1}^M \delta_i w_{ki}, \quad (3)$$

где δ_k – полученная ошибка для k нейрона; δ_i - ошибка i -го нейрона предыдущего слоя; w_{ki} - вес связи между k нейроном текущего слоя и i нейроном предыдущего слоя; y_k - фактиче-

ское выходное значение k нейрона; $F'(y_k)$ – производная функции активации k нейрона; M – количество нейронов предыдущего слоя.

Полученные значения ошибок распространяются от последнего, выходного слоя нейронной сети, к первому. При этом вычисляются величины коррекции весов нейронов в зависимости от текущего значения веса связи, скорости обучения и ошибки, внесенной данным нейроном. Данный процесс описывается формулой

$$w_{ji} = w_{ji} + h\delta_i y_j \quad (4)$$

где w_{ji} – вес связи между j -м нейроном анализируемого слоя и i -м нейроном последующего слоя; h – параметр, определяющий скорость обучения; δ_i – ошибка i -го нейрона последующего слоя; y_j – выходное значение j -го нейрона текущего слоя.

После завершения данного этапа шаги описанного алгоритма повторяются до тех пор, пока ошибка выходного слоя не достигнет требуемого значения.

При коррекции весов межнейронных связей используется понятие скорости обучения. Скорость обучения нейронной сети – один из наиболее важных параметров, контролирующих процесс обучения. Данный параметр определяет величину изменения весовых коэффициентов межнейронных связей. Для идеального приближения к минимуму ошибки нейронной сети скорость обучения должна стремиться к бесконечно малому значению для обеспечения наилучшей сходимости алгоритма обучения. Однако чем меньше выбранное значение шага обучения, тем дольше происходит обучение сети. Таким образом, при стремлении шага обучения к бесконечно малому значению время, требуемое для обучения нейронной сети, многократно возрастает. В то же время, если выбрать слишком большое значение скорости обучения, то минимум ошибки не будет достигнут нейронной сетью – величина ошибки будет колебаться около минимального значения ввиду слишком большой коррекции весов межнейронных связей.

С целью преодоления указанных проблем используется так называемая динамическая скорость обучения. При использовании данного метода шаг обучения не является постоянной величиной, а зависит от других параметров процесса обучения (времени, номера итерации или ошибки нейрона на предыдущем шаге). Динамическая скорость обучения может быть введена как для каждого нейрона сети в отдельности, так и для всей сети в целом.

Функции, используемые для вычисления скорости обучения, должны обладать следующими свойствами:

- 1) $Y(x) = 0$ при $x = 0$;
- 2) $Y(x) = MAX$ при $x \rightarrow \pm\infty$;
- 3) $Y(x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow 0$.

Для работы с нейронной сетью нами была выбрана следующая функция, отражающая зависимость скорости обучения нейрона от величины ошибки:

$$Y(x) = |MAX * (-CST * |x|)|, \quad (5)$$

где MAX – константа, определяющая максимально возможную скорость обучения; x – величина ошибки, внесенной нейроном; CST – константа, определяющая степень крутизны результирующей функции. Функция представлена графиком на рис. 5.

Данная функция отвечает указанным требованиям и обеспечивает наиболее оптимальное изменение скорости обучения. В начале процесса обучения параметр MAX выставлен в максимальное значение скорости обучения (в нашем случае $MAX = 3$), в результате чего при больших значениях ошибки обучения изменения весовых коэффициентов будут значительны. По мере снижения ошибки нейрона скорость обучения будет снижаться, и при стремлении ошибки обучения к нулю скорость обучения будет также стремиться к нулю.

Таким образом, при решении поставленной задачи было реализовано динамическое

управление скоростью обучения, при котором величина шага обучения вычисляется для каждого нейрона в отдельности в зависимости от ошибки, внесенной данным нейроном. Введение данного алгоритма позволило точнее приближаться к минимуму ошибки обучения нейронной сети. При сравнении характера обучения нейронной сети с адаптивной скоростью обучения и нейронной сети с минимальным фиксированным шагом обучения первая демонстрирует более гладкое стремление ошибки к минимальному значению без значительных колебаний.

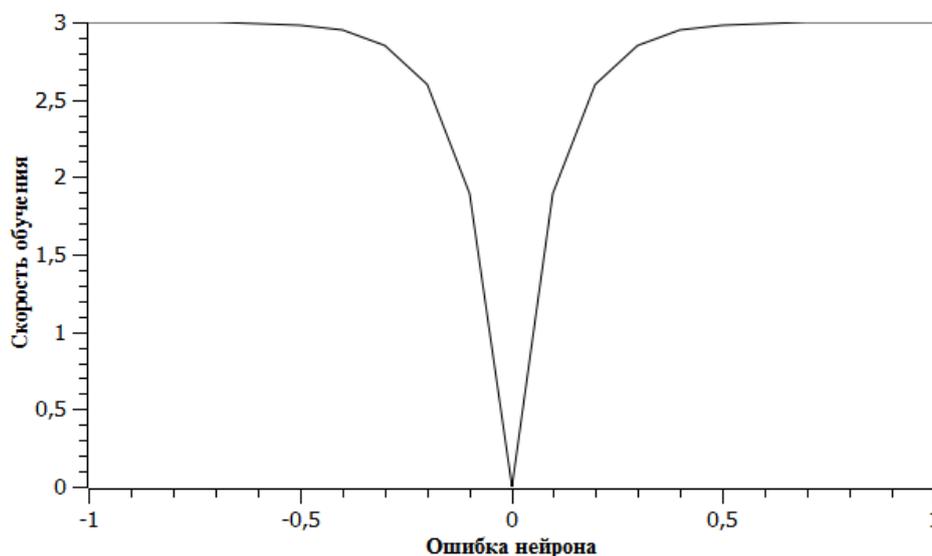


Рис. 5. График скорости обучения отдельного нейрона

Рассмотрим две разновидности ошибок нейронной сети, наиболее полно характеризующих процесс обучения. В процессе обучения нейронной сети различают ошибку обучения и ошибку обобщения. Ошибка обобщения – это ошибка, которую нейронная сеть демонстрирует на примерах, не участвовавших в процессе обучения. Ошибкой обучения, напротив, называется ошибка, которую обучаемая нейронная сеть демонстрирует на примерах обучающей выборки. Теоретическая зависимость данных ошибок от времени обучения проиллюстрирована на рис. 6.

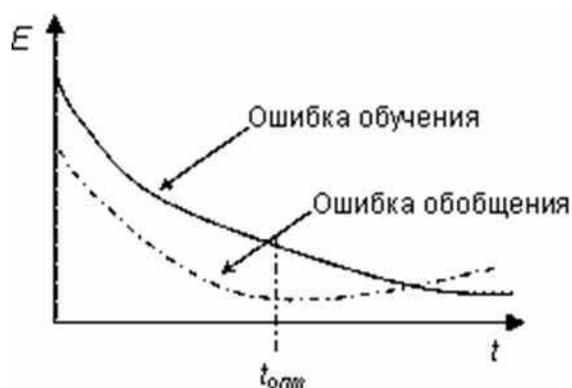


Рис. 6. Зависимость ошибок обобщения и обучения от времени

Из графика на рис. 6 видно, что в процессе обучения ошибка обучения постоянно уменьшается, пока не достигает достаточно малого значения, после чего обучение прекращается. Однако если параллельно отслеживать ошибку обобщения, то можно увидеть, что она сначала также уменьшается, но с некоторой эпохи обучения начинает возрастать из-за эффекта переобучения. Это означает, что, добиваясь большей точности решения на обучающем множестве, исследуемая сеть теряет часть обобщающей способности. Поэтому процесс обу-

чения необходимо останавливать, как только ошибка обобщения начинает монотонно возрастать.

Немаловажным аспектом обучения нейронной сети является обучающая выборка. Обучающая выборка – это набор пар входных и выходных данных (для обучения с учителем), используемых при обучении нейронной сети. Контрольная выборка – часть наборов, не участвующих в обучении нейронной сети – служит для определения ошибки обобщения.

Для корректного обучения нейронной сети обучающая выборка должна обладать свойством репрезентативности. Под репрезентативностью в данном случае следует понимать наличие достаточного количества разнообразных обучающих примеров, отражающих закономерности, которые должны быть обнаружены нейронной сетью в процессе обучения. Репрезентативность обучающей выборки выражается в следующих аспектах:

- достаточность: число обучающих примеров должно быть достаточным для обучения. Для достижения нулевой ошибки необходимо, чтобы число обучающих примеров было в несколько раз больше, чем число весов межнейронных связей, в противном случае модель может не приобрести способности к обобщению;
- разнообразие: обучающая выборка должна содержать большое число разнообразных комбинаций входных и выходных данных в обучающих примерах. Способность нейронной сети к обобщению не будет достигнута, если число примеров достаточное, но все они одинаковые, т.е. представляющие лишь часть классов, характерных для исходного множества;
- равномерность представления классов: примеры различных классов должны быть представлены в обучающей выборке в одинаковых пропорциях. Если один из классов будет преобладать, то данный класс будет определен моделью как наиболее вероятный для любых новых наблюдений.

Увеличение количества примеров в обучающей выборке способствует увеличению времени, необходимого для достижения нейронной сетью заданных показателей по ошибке обобщения.

При обучении построенной нейронной сети были получены результаты, подтверждающие теоретическую зависимость ошибки обобщения от мощности обучающей выборки (рис. 7, а). Также была выявлена зависимость между мощностью обучающей выборки и отклонением ошибки обобщения от установившегося значения (рис. 7, б).

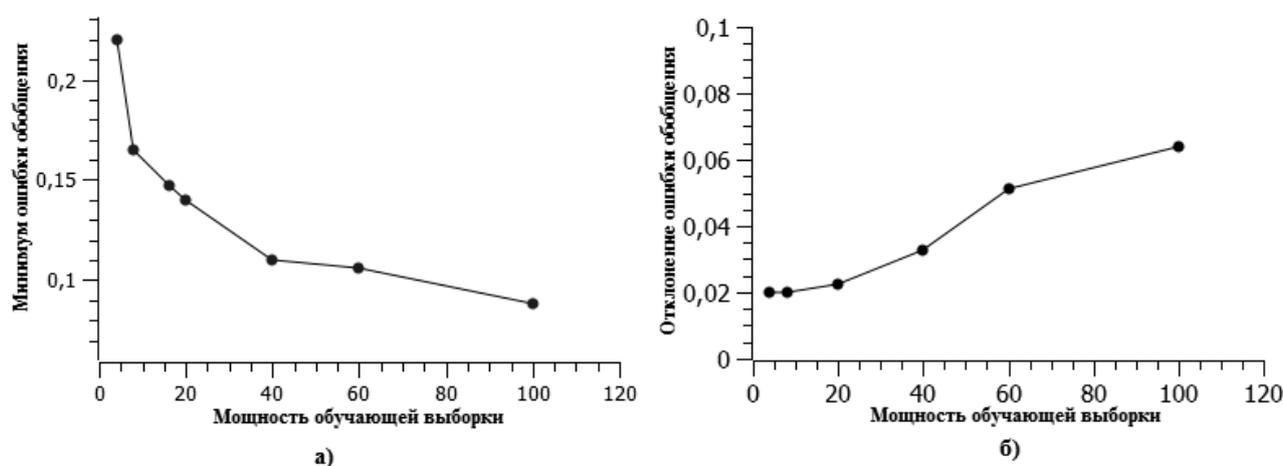


Рис. 7. Поведение ошибки обобщения в зависимости от мощности обучающей выборки:

а – изменение минимального значения ошибки обобщения; *б* – изменение отклонения ошибки обобщения от установившегося значения

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что при увеличении объема обучающей выборки минимально возможное значение ошибки обобщения уменьшается, при-

чем характер зависимости ошибки обобщения от мощности обучающей выборки совпадает с теоретическим. Однако при этом увеличиваются временные затраты на обучение нейронной сети, а также увеличивается отклонение ошибки обобщения от установившегося значения.

Таким образом, была реализована модель нейронной сети для решения задачи распознавания слов, соответствующих произношению чисел от 1 до 9. При анализе поведения нейронной сети было определено, что существующего размера обучающей выборки недостаточно для достижения нулевой ошибки обобщения нейронной сети. Однако, построенная сеть показала способность к обучению, подтвержденную экспериментальными данными. При достижении заданной ошибки обобщения программа сохраняет весовые коэффициенты в форме заголовочного файла, что дает возможность восстановить обученную нейронную сеть для последующего использования.

Библиографический список

1. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2007. – С. 751.
2. **Леонович, А.А.** Современные технологии распознавания речи / А.А. Леонович // Диалог 2005: материалы Междунар. конф. по компьютерной лингвистике. – М., 2005.
3. **Круг, П.Г.** Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие / П.Г. Круг. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 176 с.
4. Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ: [пер. с польск. И.Д. Рудинского] / Р. Тадеусевич [и др.] /. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011.
5. **Хайкин, С.** Нейронные сети. Полный курс: [пер. с англ.] / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
6. **Галушка, В.В.** Формирование обучающей выборки при использовании искусственных нейронных сетей в задачах поиска ошибок баз данных / В.В. Галушка, В.А. Фатхи [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2013. №2.: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1597>

*Дата поступления
в редакцию 02.07.2015*

D. Sorokoumova, O. Korelin, A. Sorokoumov

DEVELOPMENT AND TRAINING OF THE NEURAL NETWORK FOR VOICE RECOGNITION SOLUTION

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

Purpose: Create a neural network mode for recognition of separate words solution, analyze training characteristics and behavior of constructed neural network. Target network had to be portable to DSP platforms that define a format of input data.

Design/methodology/approach: Input signal is divided to 20 frames, each of them contain 512 samples. For every frame FFT gives 255 spectral items those are being provided to the input neurons of the neural network. Based on input data and the output requirements a feed-forward neural network has been chosen. This kind on network is most clear for analysis and development. To train selected neural network model backpropagation algorithm was selected.

Findings: Designed neural network demonstrated expected behavior related to learning and generalization errors. It was found that even if generalization error decreases while increasing training sequence, the errors starts oscillating regardless of introducing dynamic learning speed. The network has been trained enough to match requirements for generalization error, but there is still a possibility to improve generalization error.

Key words: speech recognition, neural networks, backpropagation, learning speed.

УДК 004.8

П.А. Шагалова

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Исследование нейросетевых методов и их использование для разработки системы анализа временных рядов.

Методология / подход: Применение аппарата искусственных нейронных сетей.

Результаты: Разработано программное приложение, позволяющее выполнять поиск и распознавание фигур технического анализа на графиках финансовых временных рядов.

Применение: Решение может быть использовано в качестве инструмента для анализа фондовых рынков.

Оригинальность / значение: Предложенный подход позволяет решать задачу распознавания фигур технического анализа с высокой степенью точности.

Ключевые слова: распознавание образов, искусственная нейронная сеть, фигура технического анализа.

Введение

Применение методов распознавания образов для решения задач машинного зрения, прогнозирования, диагностики, управления и принятия решений в различных сферах человеческой деятельности позволяет говорить об актуальности и перспективности исследований в данной области. Анализ временных рядов с целью прогнозирования их дальнейшего развития является одним из направлений применения алгоритмов распознавания [1], [2], [3]. Примером задачи, основывающейся на визуальном анализе графика, является задача распознавания фигур технического анализа финансовых временных рядов. Поиск фигур технического анализа – аналитический метод, зарекомендовавший себя временем, автоматизация которого позволит увеличить производительность, исключить человеческий фактор и может быть использована как в качестве инструмента анализа фондового рынка, так и при полной автоматизации принятия решения, например в торговых роботах. Целью данной работы является исследование нейросетевых подходов обработки и анализа изображений и их применение к задаче идентификации поведенческих шаблонов на графиках временных рядов.

Обоснование использования нейросетевых технологий для поиска фигур технического анализа

Одним из перспективных и успешно зарекомендовавших себя алгоритмов распознавания является аппарат искусственных нейронных сетей [4], [5], [7]. Преимущества использования искусственных нейронных сетей:

- способность сети самостоятельно настраивать свои параметры для решения конкретной задачи с учетом её особенностей;
- нелинейная структура нейронных сетей, позволяющая анализировать сложные, зашумленные данные;
- способность анализировать и выявлять внутренние, неочевидные закономерности данных;
- способность создать идеальный образ на основе множества предъявляемых реальных образов;

Помимо перечисленных обоснований, выбор нейросетевого метода обусловлен способностью нейронных сетей решать сложные, плохоформализуемые задачи, определять и

разрешать неоднозначные примеры. К таким задачам относятся задачи анализа фондовых рынков, в частности, задача распознавания фигур технического анализа. Существует большое количество архитектур нейронных сетей, отличающихся друг от друга организацией нейронной структуры и алгоритмом подстройки весовых коэффициентов. В данной работе проводится анализ различных нейросетевых архитектур с целью определения сети, наиболее подходящей для распознавания шаблонов на графиках временных рядов и для ее использования при разработке системы распознавания.

Анализ нейросетевых архитектур для решения задач распознавания фигур технического анализа

В результате проведенного обзора и анализа основных существующих архитектур с целью определения наиболее подходящих для решения задачи распознавания поведенческих шаблонов на графиках финансовых временных рядов к рассмотрению были выбраны сеть Хопфилда [6], сеть Кохонена [6], многослойный персептрон [6].

Выбор сетей Хопфилда и Кохонена продиктован их архитектурными особенностями. Так, структура сети Хопфилда представляет собой однослойную рекуррентную сеть, замкнутую обратными связями.

Обучение сети Хопфилда реализуется двумя способами: в соответствии с правилом Хебба [7] и по методу проекций [7] (формулы (1)-(2)).

$$w_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^s x_i^k x_j^k, \quad (1)$$

где x_i^k, x_j^k – элементы эталонного вектора k , $k = [1, s]$ – количество эталонных векторов; N – количество нейронов сети; w_{ij} – весовой коэффициент между нейронами i и j .

$$W^k = W^{k-1} + \frac{1}{[x^k]^T x^k - [x^k]^T W^{k-1} x^k} [W^{k-1} x^k - x^k][W^{k-1} x^k - x^k]^T, \quad (2)$$

где $k, k=[1, s]$ – количество эталонных векторов; W^k – матрица весовых коэффициентов k -го вектора; x^k – эталонный вектор.

Такая внутренняя организация сети Хопфилда (рис. 1), обрабатывая зашумленный и искаженный образ, подстраивает собственные параметры до тех пор, пока не приходит к некоторому стационарному состоянию (одному из эталонов) и, следовательно, позволяет решать задачи классификации, фильтрации и восстановления образов.

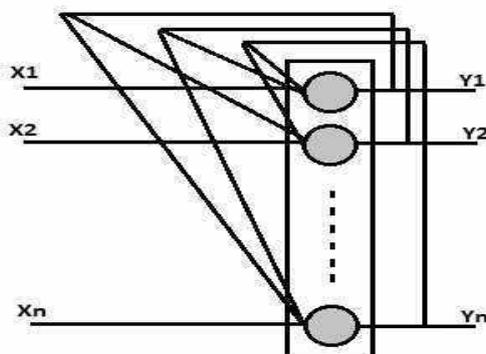


Рис. 1. Структура сети Хопфилда

Сеть Кохонена (рис. 3) состоит из двух слоев, причем работа сети организована таким образом, что для каждого входного образа только один из нейронов выходного слоя примет единичное значение.

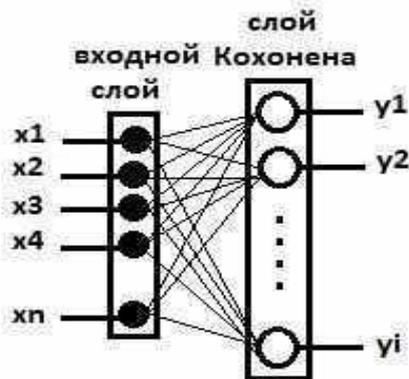


Рис. 2. Структура сети Кохонена

Алгоритм обучения сети основывается на вычислении разностей между вектором синаптических связей и входным вектором и на пересчете весовых коэффициентов для нейрона, соответствующего наименьшей их вычисленных разностей (3-4):

$$|X - W_i| = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - w_{in})^2}, \quad (3)$$

где X – входной вектор; W_i – вектор синаптических связей; w_{in} , x_n – элементы вектора синаптических связей и входного вектора соответственно.

$$W_i(t + 1) = W_i(t) + \gamma_i(t)G(i, w)(X - W_i(t)), \quad (4)$$

где W_i – вектор синаптических связей; $\gamma_i(t)$ – скорость обучения; G – коэффициент, определяющий удаленность нейрона-победителя и нейрона i .

Из этого следует, что сеть Кохонена позволяет разделить множество входных образов на несколько групп в соответствии с характерными признаками.

Выбор модели персептрона (рис. 3) в качестве кандидата для дальнейшего исследования основывается на том, что многослойный персептрон является одной из базовых и самых распространенных моделей нейронных сетей, позволяющих решать широкий спектр задач, в том числе, и задачи распознавания.

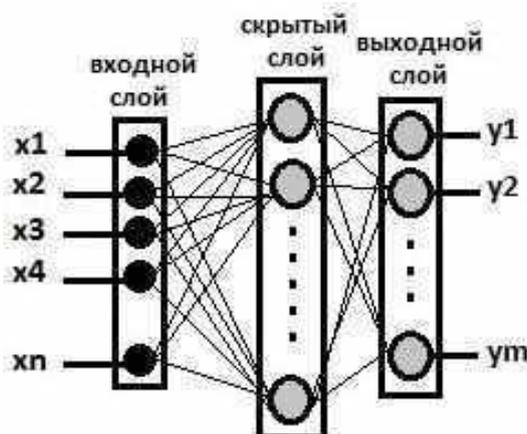


Рис. 3. Структура многослойного персептрона

Многослойный персептрон относится к сетям, обучающимся на основе алгоритма обратного распространения ошибки [8], весовые коэффициенты подстраиваются итерационно (5, 6).

$$OUT_r = f_a \left(\sum_{p=1}^N OUT_p w_{pr} \right), \quad (5)$$

где OUT_r , OUT_p – выходные значения нейронов r и p соответственно; f_a – функция активации; w_{pr} – весовой коэффициент связи между нейронами p и q .

$$w_{pr}(i+1) = w_{pr}(i) + n\delta_r OUT_r, \quad (6)$$

где $w_{pr}(i+1)$ – новое значение весового коэффициента связи между нейронами p и r ; w_{pr} – старое значение весового коэффициента pr -связи; n – скорость обучения; δ_r – дельта-коэффициент нейрона r ; OUT_p – выходное значение нейрона p .

Экспериментальная часть

Разработка системы распознавания фигур технического анализа включает в себя подготовку исходных данных и разработку архитектуры сети. Графическая фигура технического анализа – это шаблон поведения кривой зависимости цены от времени, на основании которого можно делать выводы о сохранении или изменении тренда. В качестве примера рассмотрим фигуру «голова-плечи». На рис. 4 представлен шаблон этой фигуры, представляющей три последовательных максимума, первый и последний из которых располагаются примерно на одинаковом уровне. Появление такого шаблона на графике, как правило, предшествует развороту рынка (рис. 5).

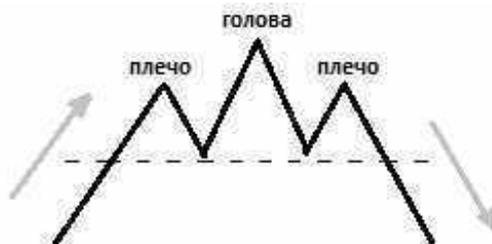


Рис. 4. Шаблон фигуры «голова-плечи»

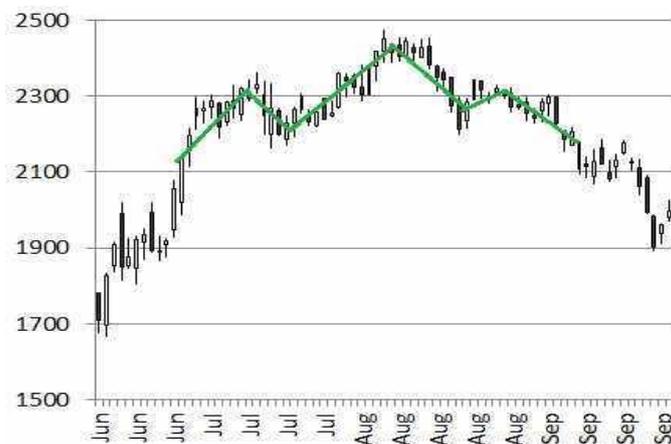


Рис. 5. Фигура технического анализа «голова-плечи» на графике финансового временного ряда

Разрабатываемая система будет основываться на нейронной сети и распознавать базовые фигуры, к которым относятся фигуры «голова-плечи», «двойная вершина-дно» [6], «тройная вершина-дно» [6], «флаг» [6].

Реализация подготовки исходных данных заключается в построении графиков по заданным ценовым значениям и их обработке. В каждом случае строится несколько графиков с различными временными окнами. Полученное изображение масштабируется, уменьшается в размерах до формата 56x24 пикселей и преобразуется к бинарному виду.

Для определения модели сети, которая должна быть использована в разрабатываемой

системе анализа графиков, было выполнено моделирование, обучение и тестирование каждой из трех описанных выше архитектур. Моделирование выполнено с использованием нейросетевого пакета, входящего в состав Matlab, тестирование произведено на множестве из 300 образов. В результате произведенных экспериментов точность сети Хопфилда составила 76%, сети Кохонена - 78%, трехслойного персептрона - 69%. Наиболее высокую скорость обучения показала сеть Хопфилда, наиболее низкую – многослойный персептрон. Это в значительной степени связано с процессом обучения этих сетей и объемами входных данных, необходимых для обучения. В случае персептрона требуется обучающая выборка значительного объема, содержащая множество образцов каждого типа, причем эти образцы должны быть разнообразны и репрезентативны. Для каждого из обучающих примеров в процессе обучения многократно происходит пересчет значений всех нейронов сети и связей между ними. В отличие от персептрона, для обучения сети Хопфилда нужны только эталонные значения, на основе которых однократно подбирается матрица весовых коэффициентов.

Исходя из анализа полученных результатов в разрабатываемом модуле распознавания фигур технического анализа была реализована сеть Хопфилда. Такой выбор был обусловлен высокой скоростью её работы, достаточно высокой точностью и отсутствием необходимости в обучающей выборке. При разработке программы расчет весовых коэффициентов сети Хопфилда был реализован двумя разными способами: в соответствии с правилом Хебба и по методу проекций. Выбор любого из двух методов обучения указывается пользователем в настройках системы (по умолчанию используется правило Хебба). Входные данные программе предоставляются в формате xls. Количество нейронов сети определяется размерностью изображения и вычисляется автоматически. Программная реализация выполнена на языке C++. Данные финансовых временных рядов для тестирования сетей получены с сайта компании «Финам».

Результаты

В ходе выполнения работы было исследовано и проанализировано использование нейросетевого подхода при прогнозировании финансовых рядов на основе фигур технического анализа. Разработан модуль, позволяющий выполнить поиск и распознавание фигур с высокой степенью точности. Следует отметить, что наличие фигуры на графике не всегда приводит к ожидаемому результату и для выполнения прогноза необходимо учитывать и другие технические показатели. В дальнейшем планируется разработка системы прогнозирования, в которой для выполнения прогноза будет использован написанный модуль распознавания фигур, а также анализатор финансовых индикаторов [6] и объемов продаж.

Библиографический список

1. **Дмитриев, Д.В.** Разработка и апробация эмулятора нейросетевого моделирования для целей прогнозирования временных рядов / Д.В.Дмитриев, Д.А. Ляхманов, Э.С. Соколова // Современные проблемы науки и образования. 2012. №6.
2. **Соколова, Э.С.** Выделение детерминированной компоненты временных рядов методом спектрального анализа / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №5. Ч. 1. С. 181–184.
3. **Ляхманов, Д.А.** Оптимизация метода прогнозирования анализом спектральных составляющих временных рядов / Д.А. Ляхманов, Ю.В. Соколова, В.П. Хранилов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012, №6. С. 425–429.
4. **Бухнин, А. В.** Оптимизация баз знаний экспертных систем с применением нейронных нечетких сетей / А. В. Бухнин, Ю. С. Бажанов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. №11.
5. **Дмитриев, Д.В.** Адаптация генетических алгоритмов к решению задач назначения точек контроля в объектах с большим числом состояний / Д.В. Дмитриев, Э.С. Соколова, С.Н. Капранов // Нейрокомпьютеры. 2007. № 11.

6. **Найман, Э.** Малая энциклопедия трейдера / Э. Найман. – М.: Альпина Паблишер, 2003. – 378 с.
7. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. –104 с.
8. **Ясницкий, Л.Н.** Введение в искусственный интеллект: учеб. пособие для студ. вузов / Л.Н. Ясницкий. – М.: Академия, 2008. –176 с.

*Дата поступления
в редакции 02.07.2015*

P.A. Shagalova

**IMPLEMENTATION OF THE PATTERN RECOGNITION SYSTEM
FOR TIME SERIES ANALYSIS BASED ON THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK**

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

Purpose: Researching of neural-network methods for design of the system of time series analysis.

Design / methodology / approach: Application of artificial neural networks.

Findings: The system of finding and recognition of technical analysis figures was implemented.

Research limitations / implications: The solution may be used for financial time series analysis.

Originality / value: The offered approach allows solving of the problem of recognition of technical analysis figures with high precision.

Key words: pattern recognition, artificial neural network, figure of technical analysis.

УДК 534.87

Д.С. Безыкорнов, А.И. Тюрин, М.А. Степаненко, Э.С. Соколова

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК НА ЛИЦЕ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Анализ эффективности двух различных алгоритмов поиска ключевых точек: активных моделей внешнего вида (ААМ) и ограниченных локальных моделей (CLM). Определение наиболее эффективных условий применения каждого алгоритма.

Методология: Тестирование проводилось на созданном наборе изображений, приближенном к реальным условиям распознавания. Данные изображения отбирались с максимально возможными различиями. Качество распознавания проверялось на пяти категориях: технические характеристики изображения, частичное перекрытие лица, поворот лица, индивидуальные особенности (борода, очки и т.д.), активное проявление эмоций.

Результаты: Определены условия применения каждого алгоритма: в хороших условиях (без перекрытия, человек смотрит в камеру и др.) лучший выбор алгоритм CLM. Если системе не могут быть предоставлены хорошие условия или необходимо применение в системах реального времени, следует использовать алгоритм ААМ.

Последующая работа: Опираясь на полученные выводы, дальнейшие исследования могут быть проведены для построения более стабильной системы, основанной на CLM или ААМ модели.

Оригинальность: Данная работа позволила выбрать алгоритм ААМ для дальнейшего улучшения и использования в построении реальной системы распознавания эмоций.

Ключевые слова: ключевые лицевые точки, эффективность алгоритмов, комплексное тестирование, активные модели внешнего вида, ограниченные локальные модели.

Введение

Базовой операцией систем автоматического распознавания эмоций является поиск лиц на изображении и дальнейшее распознавание ключевых точек в заданной области. Количество ошибок на данном этапе критически сказывается на качестве распознавания всей системы в целом, что недопустимо в области обеспечения национальной безопасности, как самой распространенной сфере применения этих систем.

Большинство существующих систем строятся для определенных «идеальных условий» и не подходят для практического использования. Например, системы аутентификации по изображению лица требуют взгляда непосредственно в камеру и хорошего освещения, наличие которых не всегда возможно.

Целью данной работы является оценка эффективности работы алгоритмов распознавания ключевых лицевых точек в условиях, приближенных к реальным. Для систем обработки реального времени будем рассматривать следующие параметры:

- вариативность вида и формы лица у различных людей;
- ориентация лица в пространстве;
- присутствие индивидуальных особенностей (борода, очки, веснушки и т.д.);
- эмоции на лице;
- перекрытие части лица различными предметами;
- технические особенности съемки (шумы, некачественное освещение, цветовой баланс и др.).

Данный набор охватывает большинство ситуаций на изображениях и позволяет использовать результаты анализа для гибкого выбора алгоритмов в различных системах.

Предварительное исследование существующих алгоритмов позволило исключить

заведомо бесперспективные для решения задачи распознавания эмоций и выделить два различных подхода к наиболее успешному поиску ключевых точек на лице. Это алгоритм активных моделей внешнего вида и алгоритм ограниченных локальных моделей.

Активные модели внешнего вида

В основе алгоритма активных моделей внешнего вида (ААМ - active appearance models) используются статистические модели изображений, которые путем особых преобразований, называемых деформацией, накладываются на реальное изображение или видеопоток [1]. Деформация представлена в виде композиции переноса, поворота и масштабирования конкретной модели.

Алгоритм распространения созданной модели на анализируемое изображение выглядит так:

1. Вычислить параметры модели и аффинные преобразования формы исходного изображения;
2. Вычислить вектор ошибки δt . Извлечение текстуры из анализируемого изображения происходит с помощью его кусочной деформации [2];
3. Вычислить вектор возмущений $\delta p = R\delta t$;
4. Обновить вектор комбинированных параметров и аффинных преобразований суммированием текущих их значений с соответствующими компонентами вектора возмущений [3];
5. Обновить формы и текстуры;
6. Выполнить последующие итерации, начиная с п. 2, пока не будет достигнута необходимая сходимость модели с реальным изображением.

Анализ математического обеспечения данного алгоритма позволяет предположить что при частичном перекрытии части лица и небольшом повороте статистическая модель сможет с достаточной точностью совпадать с входным изображением.

Ограниченные локальные модели

В отличие от метода активных моделей внешнего вида алгоритм ограниченных локальных моделей (CLM - constrained local models) строит базовую модель на основе выборки ключевых точек по интенсивности пикселей соседней области с использованием различных фильтров Хаара [4, 5]. Основная идея алгоритма заключается в следующем:

- 1) выбрать некоторую область на изображении, расположенную предположительно около целевой точки с учетом проекции на изображение-пример;
- 2) для каждой точки сгенерировать изображение-отклик, записывая в него стоимость каждого пикселя (стоимость вычисляется исходя из совпадения по определенному набору параметров) [6];
- 3) найти такую комбинацию точек, которая является оптимальной по общей стоимости, изменяя при этом параметры модели.

Алгоритм поиска точек выполняется следующим образом:

1. Получить на вход начальный набор ключевых точек;
2. В цикле:
 - a) найти модель для текущего набора ключевых точек, чтобы создать набор шаблонов;
 - b) используя метод поиска с учетом ограниченной формы модели, уточнять набор точек до тех пор, пока точки модели и тестируемого изображения не сойдутся.

При отслеживании начальные точки выбираются с предыдущего кадра. В случае неудачи можно использовать глобальный поиск с нуля [7].

Основным недостатком алгоритма для работы в сложных условиях является исполь-

зование фильтров Хаара: определенные шаблоны яркости будут хуже работать в условиях перекрытия части лица, что снижает эффективность применения данных алгоритмов на всем многообразии входных данных[8].

Экспериментальная часть

Для исследования возможностей алгоритмов необходим набор изображений, отвечающий определенным требованиям. Стандартные наборы изображений (FERET, M2VTS) зачастую предоставляют качественные, заранее выверенные примеры, в которых не проявляется всего многообразия признаков. Большинство исследованных систем очень плохо реагируют на такие особенности, как темная кожа или веснушки на лице. В примерах они не указываются.

Для решения задачи комплексного анализа в условиях, приближенных к реальным, был составлен собственный набор данных, состоящих из 150 изображений. 50 из них были размечены ключевыми точками в полуавтоматическом режиме: с помощью алгоритма ААМ находилось приблизительное положение точки и после проводилась ее коррекция вручную. 100 изображений тестовой выборки помечались, как принадлежащие к одной из пяти категорий:

1) ориентация лица в пространстве. Лицо считалось повернутым при повороте более чем на 15 град;

2) выражение лица. Проявление эмоций сильно влияет на сходимость построенных моделей и реального изображения. В данной категории учитывался открытый при улыбке рот и закрытые глаза;

3) индивидуальные особенности. Наличие бороды у мужчин, темный цвет кожи, наличие веснушек или прозрачных очков также затрудняет распознавание. Если дужки очков не закрывают глаза, алгоритм все еще может распознать ключевые точки, поэтому очки с прозрачными стеклами отнесены в эту категорию;

4) частичное перекрытие лица. Самое частое – пышные прически у женщин, когда волосы закрывают глаза, а также темные солнцезащитные очки;

5) плохие технические характеристики. К ним относятся низкое качество изображения (шум, недостаточная резкость), большая разница в яркости частей лица (часто встречается, что половина лица затенена).

Характеристики тестового набора:

- общее количество изображений – 100;
- минимальное разрешение – 278 x 541;
- максимальное разрешение – 1280 x 853;
- цветные изображения – да.

Количество изображений в каждой категории приведено в табл. 1.

Таблица 1

Количество изображений в категориях

Поворот лица	Эмоции	Индивидуальные особенности	Перекрытие	Плохие технические характеристики
54	48	21	23	37

На диаграмме (рис. 1) визуальное представлено распределение изображений по количеству категорий.

Как видно, большую часть выборки составляют изображения с первым или вторым сложными для распознавания признаками – 30 и 35% соответственно. Такие условия проверки алгоритмов позволяют провести комплексный стресс-тест.

Для алгоритма активных моделей внешнего вида было произведено обучение на обучающей выборке по 81 точке. Алгоритм ограниченных локальных моделей прошел обучение по 65 точкам. Такое различие связано с использованием для теста стандартных реализаций и особенностей алгоритмов. Основные различия в количестве точек, обозначающих глаз и очерчивании положения носа - не влияют на общие наборы для распознавания эмоций. В связи с этим был введен порог ошибочного определения положения лиц в 10% за счет меньшей важности локальных точек, очерчивающих овал лица, и некоторых других.

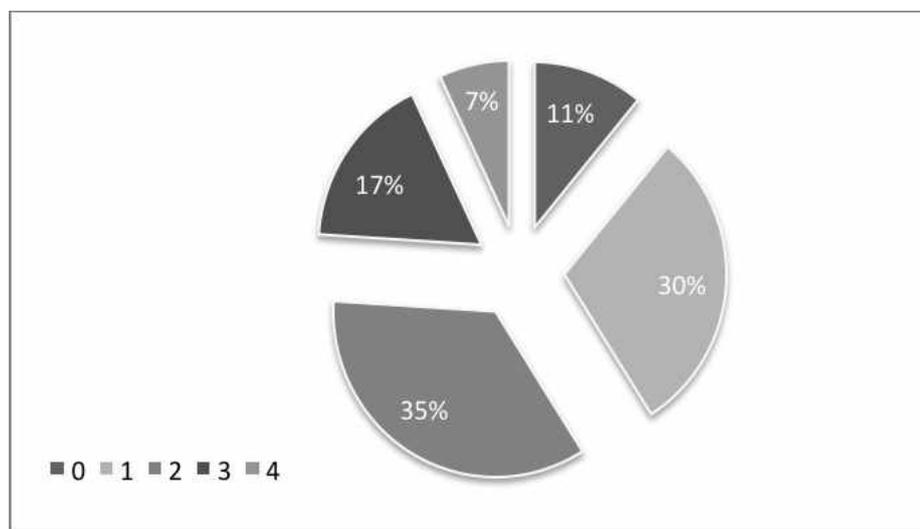


Рис. 1. Диаграмма количественного распределения категорий изображений

Результаты работы алгоритмов представлены на рис. 2.

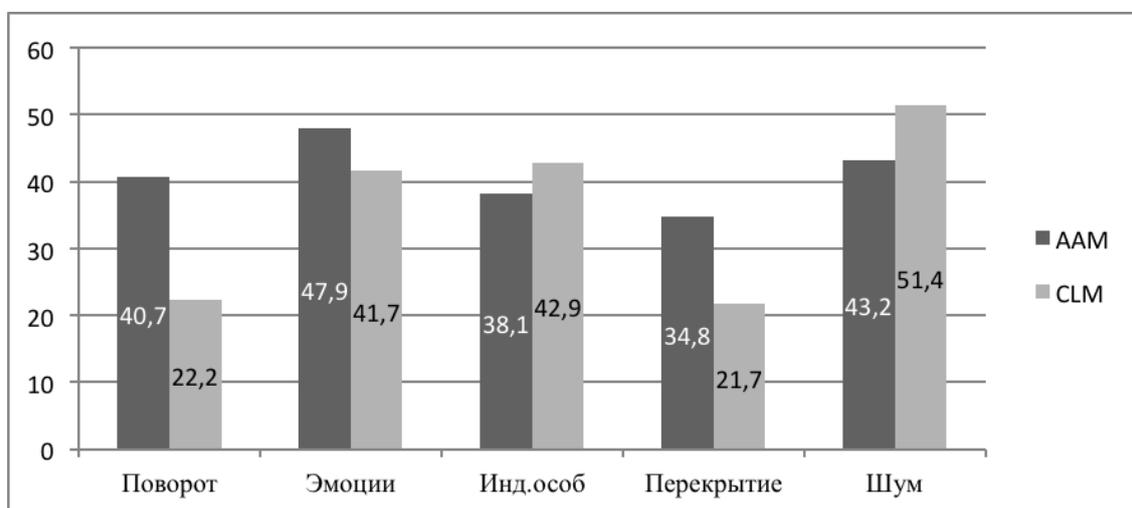


Рис. 2. Процентное соотношение распознанных лицевых изображений (порог ошибок 10%) по категориям

Как видно из приведенного графика, алгоритм ААМ показывает эффективность в два раза выше на одной из самых распространенных категорий – повороте лица. Также отмечается сильное падение качества распознавания, если часть лица закрыта. На рис. 3 представлены качественные сравнения алгоритмов.

Анализ результатов нахождения ключевых лицевых точек позволяет наглядно удостовериться в статистических данных. Главными точками в задачах распознавания эмоций

являются края губ, глаз, бровей, точки на носу. В первую очередь для сравнения качества используются именно эти точки.

Рисунки 3 (1), 3 (5) подтверждают непригодность алгоритма CLM к условиям изменения ориентации лица в пространстве, данные наборы точек не позволяют использовать даже небольшую их часть для эффективного применения в последующих алгоритмах. Рисунок 3 (4) показывает уязвимость алгоритма ААМ к изображениям лиц с очками, что исходит из их теоретических основ, а конкретно – разных вариантов формирования базовой модели во время обучения. Фильтры Хаара, при условии прозрачности очков позволяют более точно выделить участки глаз, в отличие от полностью адаптивной модели ААМ.

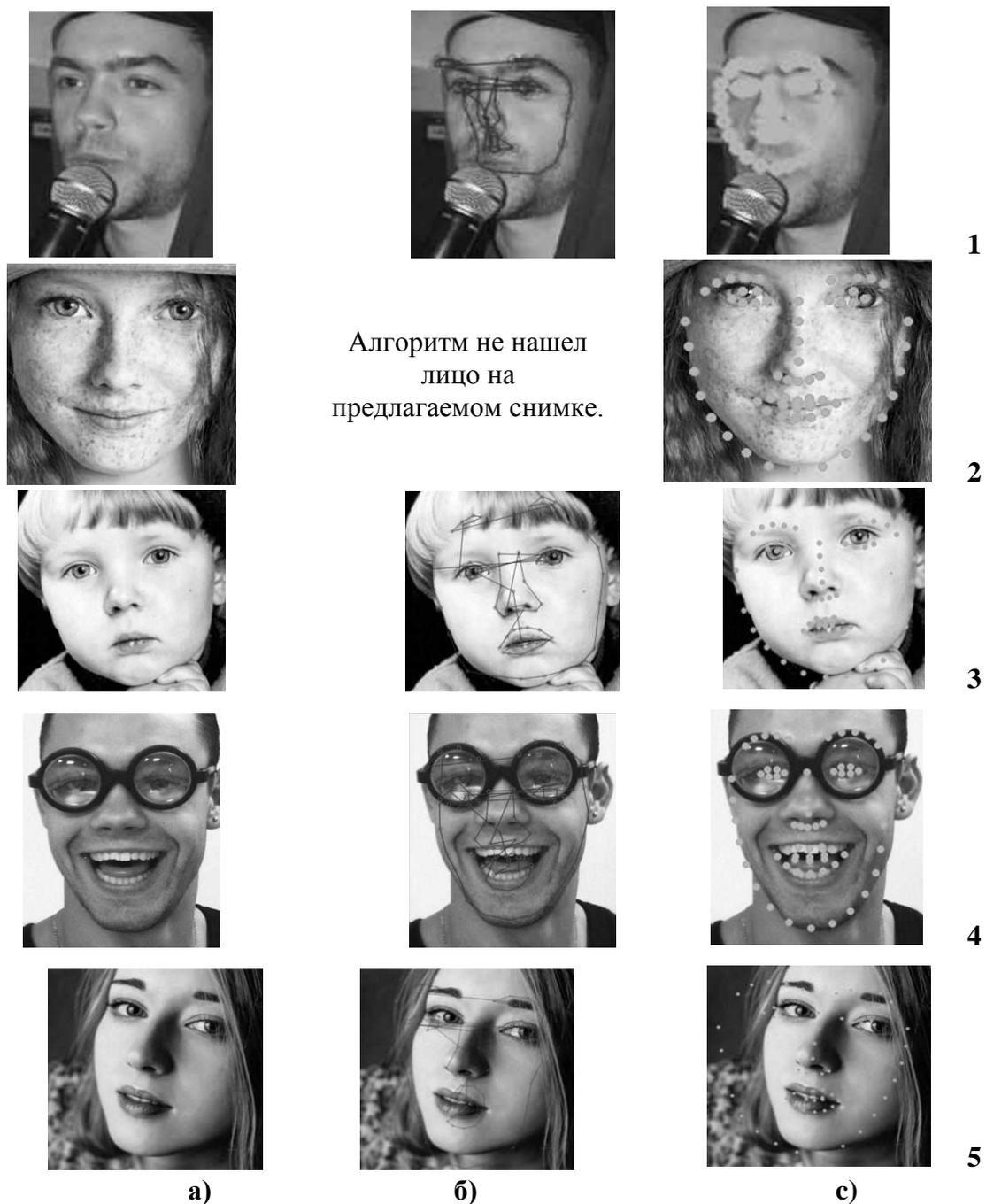


Рис. 3. Качественное сравнение работы алгоритмов:
а – оригинал; б – ААМ; в – CLM

Перекрытие части лица на рис. 3 (1) и рис. 3 (5) представляет сложность для алгоритма CLM, однако не мешает алгоритму ААМ эффективно распознать верхнюю часть лица и оставить несколько главных точек в наборе с высоким качеством распознавания.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать предположения об оптимизации алгоритма ААМ как наиболее перспективного в большинстве случаев:

1. Для повышения качества распознавания сильно зашумленных изображений при тренировке базовой модели следует производить графическое выравнивание параметров изображений, исходя из среднего по обучающей выборке. Данный метод позволит свести к минимуму влияние освещения и различий в разрешении изображений

2. Увеличение скорости обработки за счет исключения из сравнения модели текстур компонентов точек базовой формы при достаточном количестве итераций должно быть достаточно для качественного распознавания. Это позволит увеличить скорость обработки, а также снизить влияние условий частичного перекрытия лица и наличия индивидуальных особенностей.

3. Добавление обновления базовой модели с учетом поступающих данных будет эффективно в условиях систем реального времени, что позволит повысить качество распознавания без увеличения нагрузки на вычислительную систему.

Заключение

Проведенное тестирование алгоритмов поиска ключевых точек в условиях недостаточной графической информации позволяет определить области применения каждого из алгоритмов. Для систем распознавания эмоций в режиме реального времени эффективнее использование алгоритма ААМ. Средняя ошибка распознавания данного алгоритма на 5% ниже, чем показывает алгоритм CLM. Для систем с возможностью задавать условия съемки (прямой взгляд в камеру, открытое лицо без перекрытия) наиболее целесообразным является использование алгоритмов CLM. Данные наработки будут использованы в модификации алгоритма ААМ при построении реальной системы распознавания эмоций.

Библиографический список

1. **Cootes, T.F.** Active appearance models / T.F. Cootes, G.J. Edwards, C.J. Taylor // Proc. European Conference on Computer Vision 1998. V. 2. P. 484-498
2. **Li, P.** Context-based additive logistic model for facial keypoint localization DOI: 10.5244/C.24.28 / P.Li [et al.] // British Machine Vision Conference, BMVC 2010. – Aberystwyth (UK), 2010.
3. **Cristinacce, D.** A comparison of shape constrained facial feature detectors / D. Cristinacce, T.F. Cootes // Proc. Int. Conf. on Face and Gesture Recognition, 2004. P. 375–380.
4. **Zhang, Z.** Facial Landmark Detection by Deep Multi-task Learning / Z. Zhang [et al.] // Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.
5. **Zhu, X.** Face detection, pose estimation and landmark localization in the wild / X. Zhu, D. Ramanan // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Providence, Rhode Island. 2012.
6. **Hasan, K.** Localizing Facial Keypoints with Global Descriptor Search, Neighbour Alignment and Locally Linear Models, DOI: 10.1109/ICCVW.2013.55 / K. Hasan, C. Pal, S. Moalem // Proceedings of the 2013 IEEE Int. Conf. on Computer Vision Workshops, 2013.
7. **Bolme, D.S.** Average of Synthetic Exact Filters / D.S. Bolme, B.A. Draper, J.R. Beveridge // Computer Vision and Pattern Recognition, 2009.
8. **Valstar, M. F.** Facial Point Detection using Boosted Regression and Graph Models / M. F. Valstar [et al.] // Proceedings of IEEE Int. l Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'10). – San Francisco (USA). 2010. P. 2729–2736.

Дата поступления
в редакцию 02.07.2015

D.S. Bezykornov, A.I. Tyurin, M.A. Stepanenko, E.S. Sokolova

KEY POINTS SEARCH ALGORITHMS EFFICIENCY ANALYSIS IN A LACK OF GRAPHICAL INFORMATION

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

Purpose: Efficiency analysis of two different face models in computer vision: AAM (Active-Appearance Model), CLM (Constrain Local Model) in real cases and defining areas of use of these models.

Design/methodology/approach: We created image set with different pictures with real conditions. Recognition quality was checked in 5 categories: noise, partial occlusion, rotation, individual face landmarks (beard, glasses, etc.), emotions on the tested face.

Findings: We found different areas of using these face models: when system could be used in good conditions (no occlusion, humans look in camera, etc.) it better to use CLM model, in other case, when system cannot be set up in good conditions or if it needed to use system in real-time it better to use AAM.

Research limitations/implications: Further research could use our summary to create more stable system based on CLM or AAM model.

Originality/value: This research allow us to choose AAM model to further improvement and using in real system that can recognize emotions on a real face.

Key words: facial key points, algorithms efficiency, complex testing, active appearance models, constraint local models.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 004.93'1

А.А. Баевский

RFID-ТЕХНОЛОГИЯ И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ В РОССИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Рассматриваются основы технологии RFID-меток и особенности применения данной технологии в различных сферах деятельности. Также рассмотрен опыт её применения на территории России и причины сложности повсеместного внедрения таких меток.

Ключевые слова: RFID, метки, радиоидентификация, бесконтактная идентификация.

На протяжении нескольких лет в средствах массовой информации активно обсуждается роль радиочастотной идентификации. RFID (Radio Frequency IDentification – радиочастотная идентификация) – способ автоматической идентификации объектов, в котором посредством радиосигналов считываются или записываются данные, хранящиеся в так называемых транспондерах, или RFID-метках. Большинство RFID-меток состоит из двух частей (рис. 1). Первая – интегральная схема (ИС) для хранения и обработки информации, модулирования и демодулирования радиочастотного (RF) сигнала и некоторых других функций. Вторая – антенна для приёма и передачи сигнала. Сама система состоит из самой метки и считывающего устройства. Метки различаются по типу питания, дальности работы и т.д. Уже известные приложения RFID (бесконтактные карты в системах контроля и управления доступом, системах дальней идентификации и в платёжных системах) получают дополнительную популярность с развитием интернет-услуг [1].

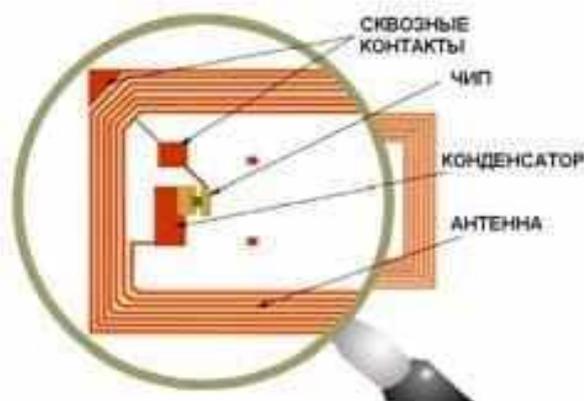


Рис. 1. RFID-метка

Преимущества радиочастотной идентификации:

1. Возможность перезаписи. Данные на RFID-метке могут перезаписываться и дополняться много раз, тогда как данные на штрих-коде не могут быть изменены — они записываются сразу при печати.

2. Отсутствие необходимости в прямой видимости. RFID-считывателю не требуется прямая видимость метки, чтобы считать её данные. Взаимная ориентация метки и считывателя часто не играет роли. Метки могут читаться через упаковку, что делает возможным их скрытое размещение. Для чтения данных метке достаточно хотя бы ненадолго попасть в зону регистрации, перемещаясь, в том числе, и на довольно большой скорости. Напротив, устройству считывания штрих-кода всегда необходима прямая видимость штрих-кода для его чтения.

3. Большее расстояние чтения. RFID-метка может считываться на значительно большем расстоянии, чем штрих-код. В зависимости от модели метки и считывателя радиус считывания может составлять до нескольких сотен метров. В то же время подобные расстояния требуются не всегда.

4. Большой объём хранения данных. RFID-метка может хранить значительно больше информации, чем штрих-код.

5. Поддержка чтения нескольких меток. Промышленные считыватели могут одновременно считывать множество (более тысячи) RFID-меток в секунду, используя так называемую антиколлизийную функцию. Устройство считывания штрих-кода может одновременно сканировать только один штрих-код.

6. Считывание данных метки при любом её расположении. В целях обеспечения автоматического считывания штрихового кода комитеты по стандартам (в том числе EAN International) разработали правила размещения штрих-меток на товарной и транспортной упаковке. К радиочастотным меткам эти требования не относятся. Единственное условие — нахождение метки в зоне действия считывателя.

7. Устойчивость к воздействию окружающей среды. Существуют RFID-метки, обладающие повышенной прочностью и сопротивляемостью жёстким условиям рабочей среды, а штрих-код легко повреждается (например, влагой или загрязнением). В тех сферах применения, где один и тот же объект может использоваться неограниченное количество раз (например, при идентификации контейнеров или возвратной тары), радиочастотная метка оказывается более приемлемым средством идентификации, так как её не требуется размещать на внешней стороне упаковки. Пассивные RFID-метки имеют практически неограниченный срок эксплуатации.

8. Многоцелевое использование. RFID-метка может использоваться для выполнения других задач, помимо функции носителя данных. Штрих-код же не программируем и является лишь средством хранения данных.

9. Высокая степень безопасности. Уникальное неизменяемое число-идентификатор, присваиваемое метке при производстве, гарантирует высокую степень защиты меток от подделки. Также данные на метке могут быть зашифрованы. Радиочастотная метка обладает возможностью закрыть паролем операции записи и считывания данных, а также зашифровать их передачу. В одной метке можно одновременно хранить открытые и закрытые данные.

Сегодня RFID рассматривается как уникальная технология, дающая неоспоримые преимущества перед всеми известными способами маркировки и идентификации. С этими системами люди сталкиваются каждый день, пользуясь многоразовыми проездными билетами в метро, отключая сигнализацию автомобиля иммобилайзером, открывая офисную дверь карточкой-ключом [4].

Одной из преобладающих областей применения RFID-систем является складская и производственная логистика. Пожалуй, только в этой области можно оценить и прочувствовать всю экономическую и стратегическую выгоду от использования столь популярных на Западе систем. Но по ряду объективных причин на данный момент применение RFID-систем экономически оправданно в двух случаях. Во-первых, эти системы позволяют отслеживать движение промаркированных объектов в пределах какой-либо области, не выходя за ее пределы. Примером может служить маркировка возвратной тары предприятия, расход и возврат которой автоматически учитывается, а факт прохождения каждого технологического этапа

конкретным объектом отображается в базе данных либо в самой радиометке, закрепленной на объекте. При этом имущество может перемещаться по достаточно большой территории (цеха завода, района, города, даже страны). Но все равно мы имеем замкнутую систему, так как возвратные средства, пройдя определенный цикл, должны вернуться в исходную точку, а в случае невозврата будет достаточно просто проконтролировать, от кого из партнеров не вернулись, например, дорогостоящие европоддоны.

Тот же принцип действует и на производстве, когда промаркированная деталь на стадии обработки (изготовления, сборки) фиксирует факт прохождения каждого этапа, что позволяет в реальном времени проследить весь цикл производства и обработки, а при необходимости узнать по серийному номеру метки, какие технологические этапы и когда прошла именно эта похожая на миллион других деталь. В данных областях обычно применяются корпусированные метки, имеющие повышенный класс защиты и способные работать в жестких производственных условиях. Стоимость таких меток обычно составляет несколько евро за штуку.

Во-вторых, экономическая эффективность RFID-систем заключается в маркировке участвующих в цепочке поставок товаров. При этом следует учитывать специфику как самой радиочастотной технологии, так и конкретной цепочки поставок и рассматривать каждый случай отдельно. Например, когда мы имеем дело с группами товаров, не содержащими жидкости и металлы, появляется возможность считывания всего промаркированного товара, не нарушая целостность транспортной упаковки. То есть весь товар, приходящий на склад в составе паллеты или коробки, может быть однозначно идентифицирован без вскрытия упаковки в течение 2-3 с.

Если же нужно работать с товарами, содержащими жидкость или металл, то есть два варианта решения задачи идентификации.

1) всегда доступна маркировка самой паллеты или размещение метки между слоями упаковочной стрейч-пленки, а поскольку поставщик на этапе упаковки знает, что именно находится на паллете, серийный номер метки закрепляется за наименованием, находящимся на паллете, либо в память метки прописываются все артикулы наименования. При этом на паллете может находиться товар абсолютно любого типа и вида;

2) задача групповой идентификации сложных объектов решается правильным ориентированием промаркированных объектов относительно считывающих антенн. Когда собирается мультипаллета из проблемных (с точки зрения радиочастотной идентификации) объектов, необходимо расположить промаркированные объекты таким образом, чтобы радиочастотные метки смотрели не внутрь, а на установленные по периметру проходного портала антенны, т.е. чтобы линию считывания не преграждал радиопоглощающий или радиоотражающий материал расположенного на паллете товара.

В обоих случаях необязательно обеспечивать прямую визуальную видимость радиометок, что дает возможность расположить метки в таких защищенных местах, как внутренняя сторона упаковки или под слоем радиопрозрачного упаковочного материала (полиэтилен, картон и т.д.).

Итак, одним из ярчайших достоинств RFID-систем является возможность идентификации промаркированных объектов без обеспечения прямой видимости радиометки, а удаленность метки от считывателя обычно превышает дальность действия общепризнанной системы штрихового кодирования. Уникальный идентификационный номер метки наделяет промаркированный объект индивидуальностью, что дает возможность отличить абсолютно одинаковые с виду предметы, кроме того, скорость идентификации позволяет опознать сотни предметов за считанные секунды.

Благодаря применению систем бесконтактной идентификации осуществляется автоматический сбор огромного количества недоступной ранее информации о перемещении промаркированных объектов, будь то технологическая цепочка либо движение товаров на складе. Появляется открытость и прозрачность бизнес-процессов, протекающих на предпри-

ятии. Существенно сокращается время на получение информации о движении объектов и повышается ее достоверность. Например, прием поддона с 25-ю промаркированными штрих-кодом коробками занимает в среднем 17 мин (вскрытие поддона, считывание каждого штрих-кода, сравнение с заказом, упаковка поддона), тот же самый поддон с промаркированными RFID-метками коробками принимается в среднем за 30 секунд (по данным компании IBM). При правильно спроектированной системе время на проведение инвентаризации может сократиться в десятки раз, а достоверность полученных данных превзойти все возможные ожидания.

Помимо экономии времени на проведение операций учета и повышения точности получаемых данных, внедрение RFID-системы дает и косвенную выгоду. Благодаря открытости, доступности и прозрачности информации о протекающих процессах на предприятии можно реально оценить действительные потери и издержки, получить новые важные сведения о собственном предприятии, выявить слабые места и правильно воздействовать именно на те участки, которые действительно требуют внимания и коррекции.

Если проанализировать возможные сложности и препятствия при внедрении и оценке эффективности RFID-технологии, то начать стоит с самого популярного – с цены радиометки. Бытует мнение, что цена метки является определяющим фактором при выборе технологии. Но это не совсем так. Вопрос приобретения оборудования и расходных материалов (метки) решается с учетом финансовых возможностей заказчика и экономического обоснования применения технологии в конкретном случае. Под экономическим обоснованием подразумевается детальное исследование бизнес-процессов предприятия, тончайший анализ и понимание изменений архитектуры бизнес-операций, которые неминуемо повлечет за собой интеграция RFID-системы. Система, позволяющая экономить деньги, не может быть дорогой или дешевой. Преодоление порога в 5 центов не даст резкого скачка, потому что предприятия, которые оценили для себя экономическую эффективность внедрения системы, закупили метки несколько лет назад по цене около 1,5 долларов за штуку и сэкономили миллионы, а сейчас при объеме годовой поставки около миллиона меток цена не превысит и 10 евроцентов. Поэтому вопрос дороговизны поставлен неправильно [4].

При отходе от вопроса ценовой категории следующим критерием выступает ROI (return on investment) финансовый коэффициент, иллюстрирующий уровень доходности или убыточности бизнеса, учитывая сумму сделанных в этот бизнес-инвестиций). Допустим, компания может позволить внедрить у себя RFID, но допустимо ли замораживание средств до той поры, когда система окупится и начнет приносить реальные дивиденды? Не каждое предприятие может позволить себе работать на год-два-три вперед и вкладывать в перспективу ощутимое количество денег, особенно в условиях нестабильной экономической ситуации в стране. Но тогда есть вероятность навсегда быть вытесненным с рынка компаниями, оптимизирующими свои бизнес-процессы и предлагающими более качественный сервис за меньшие деньги.

Следующий по популярности вопрос связан с частотами, стандартами и прочими нормативно-правовыми актами. Некая несогласованность в использовании RFID-систем мирового масштаба действительно существует в основном из-за запрета на использование определенного диапазона частот правительством разных стран. Если рассматривать применяемый в складской логистике диапазон СВЧ, то на данный момент существует так называемая европейская частота (868 МГц) и американская (915 МГц). Территориально карту мира можно разделить на две зоны: частота 915 МГц используется в Северной и Южной Америке, Японии и Азии, а 868 МГц в Европе, России и Африке.

Компаниям, ведущим активную ВЭД по всему миру, кажется достаточно сомнительным применение технологии, которая может быть использована только наполовину или оказаться вовсе невостребованной, а вот предприятиям, осуществляющим свою деятельность на территории России и Европы, есть о чем задуматься.

Что же касается стандартов складской логистики, то с 2004 г., когда был принят меж-

дународный стандарт Gen 2, метки и оборудование производят разные производители в разных странах мира, но если они поддерживают этот стандарт (а таких сейчас подавляющее большинство) от них можно ожидать только правильной и корректной работы [2].

Немаловажно также, чтобы в процессе проведения оценки внедрения участвовало руководство всех отделов компании от специалистов IT до финансового и кадрового департамента. Не исключено, что ряд сотрудников выразит несогласие или даже воспрепятствует внедрению по субъективным причинам, будь то чувство недоверия высоким технологиям, осознание сокращения своей значимости либо банальное нежелание обучаться и обучать своих подчиненных новым методам работы.

Интерес и уровень знаний россиян в области RFID за последний год заметно прогрессировал. И хотя осталось огромное количество заблуждений, традиционно сопровождающих новые технологии, в России существуют функционирующие RFID-системы, которые наглядно демонстрируют экономическую эффективность. Правда, таких предприятий не так много, и львиную долю занимают пилотные проекты.

Первыми опробовать все преимущества данной технологии отважились предприятия достаточно разного уровня и работающие в разных отраслях, от заводов по производству и обрабатывающих сырье предприятий до торгующих одеждой компаний, большинство из которых столкнулось с двумя проблемами. Первая – большинство компаний хочет оставить все без изменений, а внедрив RFID, получить ошеломляющие результаты. В первую очередь крайне необходимо максимально упорядочить, оптимизировать и сделать прозрачными те процессы, в область юрисдикции которых попадает внедрение RFID. Если, например, на складе беспорядок, никто ни за что не отвечает, и все протекающие процессы приемки хранения и отгрузки происходят хаотично, то RFID-системы внесут еще большую панику и неразбериху.

Многих пугает, что с внедрением RFID придется увеличить зону приемки или дополнительно выделить зону маркировки, четко выполнять инструкции, а предоставление точных и достоверных количественных и качественных показателей о работе склада кажется невыполнимым. В таком случае речь об использовании высокотехнологичного и точного инструмента управления идти не может. Даже если будет наведен четкий порядок, сама цепочка перемещения товаров должна предполагать возможность использования систем радиочастотной идентификации. Например, один из мощнейших российских перевозчиков отправляет грузы буквально с колес. Маркировать в данном случае некогда.

Вторая проблема. Сейчас заниматься RFID-системами действительно очень выгодно и модно. Количество компаний, которые стремятся занять нишу радиочастотной идентификации, растет с каждым днем. При этом большинство из них забывают о том, что интеграция RFID-систем – дело очень сложное и ответственное. И чтобы иметь квалифицированный персонал и необходимые знания в данной области, требуются солидные финансовые вливания и некий период времени. Кроме того, надежность и финансовая ответственность компании-интегратора играют не последнюю роль при выборе поставщика оборудования. Огромное количество пилотных, а в некоторых случаях и полноценных проектов благополучно канули в лету из-за неспособности компании-интегратора развернуть систему так, как того требует специфика оборудования. Страдают в данных случаях только заказчики, выступающие в роли подопытных кроликов, поверившие амбициозным и утрированным заявлениям интеграторов. В результате заказчик несет солидные финансовые потери, да и к технологии формируется негативное отношение [3].

Технологию RFID нельзя ни недооценивать, ни переоценивать, одинаковых проектов не существует в принципе и существовать не может. Каждый склад, каждая производственная линия, каждая цепочка поставок – это организм, имеющий как общее сходство с ему подобными, так и присущую только ему индивидуальность и особенность. Поэтому лучший способ получить выгоду от новых технологий – это задуматься над целесообразностью их использования, консультируясь со специалистами в данной области.

Библиографический список

1. <https://ru.wikipedia.org/> .
2. <http://loginfo.ru/issue/101/1065>.
3. <http://habrahabr.ru/post/161401/>.
4. http://shtrih-center.ru/state/rfid_systemy_v_rossii.html.

*Дата поступления
в редакцию 04.06. 2015*

A. A. Baevskiy

RFID-TECHNOLOGY AND ITS PERSPECTIVES IN RUSSIA

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

Purpose: Consider the specificity of implementation RFID technologies in Russia.

Design/methodology/approach: The study was conducted on the basis of the experience of implementation in the territory of the Russian Federation of pilot projects with the use of RFID technology.

Findings: The results, for example, can be used in the implementation of these technologies in new and already functioning industries.

Research limitations/implications: In many functioning industries this technology can not be introduced.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving logistics within the companies.

Key words: RFID, tags, radio identification, contactless identification.

УДК 621.77

А.Н. Кочин, М.В. Желонкин, А.А. Головин

ВЛИЯНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены методы повышения эксплуатационных свойств деталей, рассмотрены виды чередующихся регулярных микронеровностей с полным, неполным и с отсутствием пересечением регулярных неровностей, приведено описание процесса виброобкатывания, исследованы параметры получения регулярного микрорельефа с использованием уравнения гармонических колебаний, разработано устройство для повышения износостойкости коренных и шатунных шеек коленчатых валов с описанием уравнений движения деформирующих элементов.

Ключевые слова: пара трения, регулярный микрорельеф, частично регулярный микрорельеф, коэффициент трения, вибронакатывание, обработка наружных цилиндрических поверхностей.

Эксплуатационные свойства деталей машин (износостойкость, долговечность, усталостная прочность и др.) во многом зависят от качества обработки поверхностей контактирующих деталей, к которым относятся геометрические параметры поверхностей (шероховатость и волнистость) и физико-механических свойств поверхностного слоя (микротвердость, остаточные напряжения и структурный и фазовый состав). Поверхностный слой детали или качество поверхности формируется под воздействием последовательно применяемых различных технологических методов, к которым относятся точение, фрезерование, шлифование и другие методы. В результате этих воздействий на обрабатываемой поверхности образовывается относительно тонкий поверхностный слой, отличающийся по своим признакам от лежащих слоев основного металла и фактически определяющий ресурс работы детали.

Комплексной характеристики состояния поверхностного слоя (шероховатость, волнистость и физико-механическое состояние поверхностного слоя) до настоящего времени не разработано, поэтому качество поверхности оценивается по каждой составляющей отдельно, хотя их взаимодействие между собой отмечается многими исследователями. Например, упрочнение поверхностного слоя, проводимое с целью повышения износостойкости поверхности, в значительной степени связано с улучшением геометрических параметров поверхности, а также с повышением микротвердости поверхностного слоя, которые формируются под действием обрабатывающего инструмента. Повышение эксплуатационных свойств поверхностей контактирующих деталей обеспечивается различными технологическими методами, которые подразделяются на шесть основных классов:

- 1) упрочнение с образованием износостойкой пленки на поверхности детали (хромирование, оксидирование, фосфатирование и др.);
- 2) упрочнение с изменением химического состава поверхностного слоя (борирование, цианирование, нитроцементация и др.);
- 3) упрочнение изменением структуры поверхностного слоя (лазерная закалка, дробеструйная обработка, вибрационная обработка и др.);
- 4) упрочнение с изменением энергетического запаса поверхностного слоя (термообработка, обработка магнитным полем и др.);
- 5) упрочнение с изменением микрогеометрии поверхностного слоя и наклепа (накачивание поверхности, обкатывание поверхности и др.);
- 6) упрочнение с изменением структуры детали по всему объёму (отпуск, улучшение, закалка холодом и др.).

Особое место среди этих методов занимает виброобкатывание – процесс, заключаю-

щийся в перемещении деформирующего инструмента по поверхности детали, которому дополнительно сообщается осциллирующее колебание. Параметры вибрации при обработке, например, наружных цилиндрических поверхностей: частота вращения заготовки, число осциллирующих двойных ходов, амплитуда, равная длине осциллирующего хода, подача на оборот заготовки и диаметр шарика. Режим обработки: рабочее давление выбираются в зависимости от диаметра шарика, обрабатываемого материала и жесткости металлообрабатывающего станка. Обработка ведется, как правило, на невысоких скоростях, что позволяет обеспечить повышение микротвердости поверхностного слоя на 10–25% и сжимающих остаточных напряжений в 1,3–1,7 раза. Кроме того, улучшается точность геометрической формы обрабатываемой поверхности и повышается класс шероховатости.

В результате сложного взаимодействия заданных параметров на обрабатываемой поверхности формируется микрорельеф, состоящий из синусоидальных канавок различной композиции и плотности. Основные виды канавок изображены на рис. 1. Образование на обработанной поверхности системы канавок, пересекающихся между собой с определенной закономерностью, улучшает процесс смазки трущихся пар. Установлено, что такие системы образуют искусственные «масляные карманы», в которых удерживается смазка, препятствующая «схватыванию» контактирующих поверхностей трущихся пар.

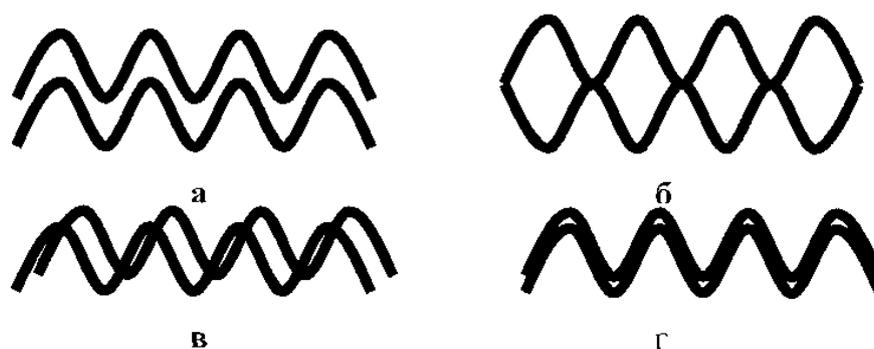


Рис. 1. Основные виды синусоидальных канавок:
 а – канавки не пересекаются; б – канавки касаются;
 в – канавки пересекаются; г – канавки накладываются

При виброобкатке наружных цилиндрических поверхностей обрабатывающий инструмент формирует на обрабатываемой поверхности канавку в виде синусоиды. Такая форма получается за счет возвратно-поступательного движения обрабатывающего инструмента по вращающейся наружной цилиндрической поверхности заготовки. Математически форма канавки описывается уравнением гармонического колебания

$$X = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где A – амплитуда колебаний; $(\omega t + \varphi_0)$ – фаза колебаний; t – время; ω – циклическая частота; φ_0 – начальная фаза колебаний.

Формирование нужного микрорельефа на обрабатываемой поверхности заготовки с целью образования «масляных карманов» достигается чередованием с определенным шагом следов обрабатывающего инструмента, полученных серией рабочих ходов. Каждый последующий рабочий ход должен отличаться от предыдущего начальной фазой колебаний, изменяющейся за счет разности между длиной волны рабочего хода λ и длиной окружности обрабатываемой наружной цилиндрической поверхностью заготовки πd . В этом случае на обрабатываемой поверхности образуются следы от действия обрабатывающего инструмента в виде синхронных колебаний, имеющих одни и те же параметры по амплитуде, частоте, периоду, но отличающихся тем, что последующий след формируется на поверхности с некоторым запаздыванием (рис. 2, б).

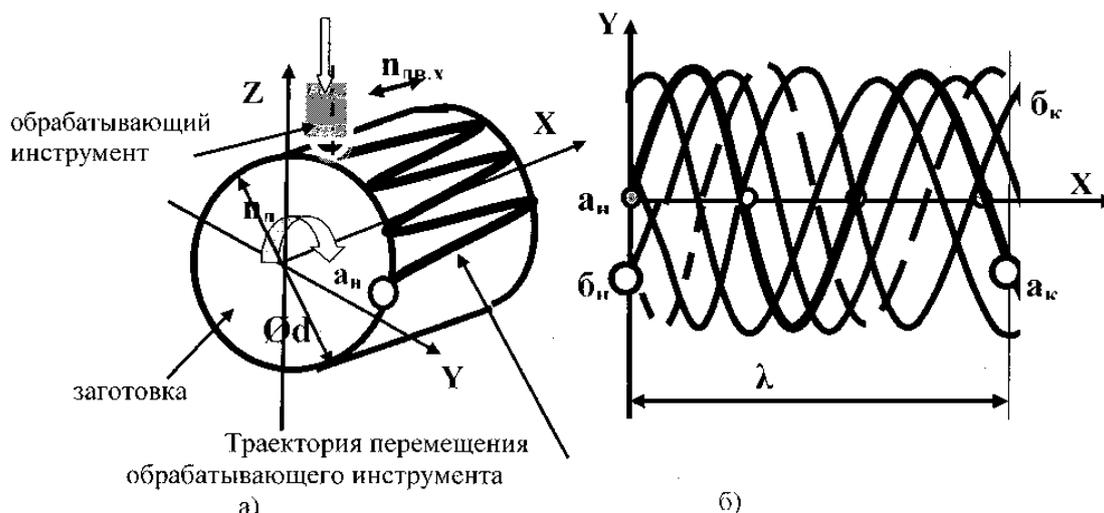


Рис. 2 Формирование микрорельефа поверхностного слоя:
а – схема рабочих движений при виброобработке; *б* – последовательность формирования микрорельефа поверхностного слоя

На рис. 2, *б* первый рабочий ход обработки поверхности заготовки начинается в точке a_n . Длина волны λ и длина окружности заготовки πd связаны между собой коэффициентом k , т.е. $\lambda = k \cdot \pi d$. Если k – целое число, то следующий рабочий ход начнется в той точке обрабатываемой поверхности, с которой начинался первый рабочий ход, т.е. в точке со смещением в точке a_n . В этом случае рабочий инструмент будет работать по уже пройденной траектории. При дробном значении коэффициента k рабочий ход обрабатывающего инструмента будет начинаться со смещением относительно точки a_n (общепринятый термин – запаздывание), т.е. в точке b_n . Чем меньше величина запаздывания, тем ближе будут располагаться следы на обрабатываемой поверхности. Расстояние запаздывания ($a_n b_n$) зависит от диаметра обрабатывающего инструмента (шарика) и глубины его внедрения (силы давления). Последующие рабочие ходы будут выполняться с таким же смещением. В результате на обрабатываемой поверхности образуется сетка следов, смещенных один относительно другого с постоянным шагом, т.е. практически одинаковый микрорельеф по всей поверхности.

С целью практического использования преимуществ виброобработки было разработано устройство для повышения износостойкости коренных и шатунных шеек коленчатых валов. Устройство содержит деформирующие элементы, дополнительно снабженные блоком обработки из воздействующих головок. Головки соединены трубками с емкостью гидропластмассы и с салазками продольного направления, которые, в свою очередь, соединены с виброгенератором. Внутри воздействующих головок находятся деформирующие элементы, расположенные в два ряда с относительным смещением, с толкателем и выступами корпуса, в которых деформирующие элементы располагаются с возможностью удержания их от выпадания, а также приводным блоком – двигателем, соединенный с редуктором, на выходном валу которого крепится патрон; центр расположен соосно патрону.

Приспособление работает следующим образом. Коленчатый вал *1* устанавливается в центр *2* и закрепляется с помощью патрона *3*. Главное движение сообщается через двигатель *4* с редуктором *5*. К шейкам подводится блок для обработки, состоящий из воздействующих головок с шариками *6*, системы салазок продольного направления *7*, на которую воздействует виброгенератор *8*. Виброгенератор сообщает осциллирующее движение двум рядам шариков *9*, разделенных сепаратором *10*, их расположение зависит от выбора желаемого микрорельефа и находится с помощью математической модели. Необходимую силу прижатия обеспечивает толкатель *11*, на который воздействует гидропластмасса *12*, подаваемая под давлением по трубкам *13* в головки с шариками.

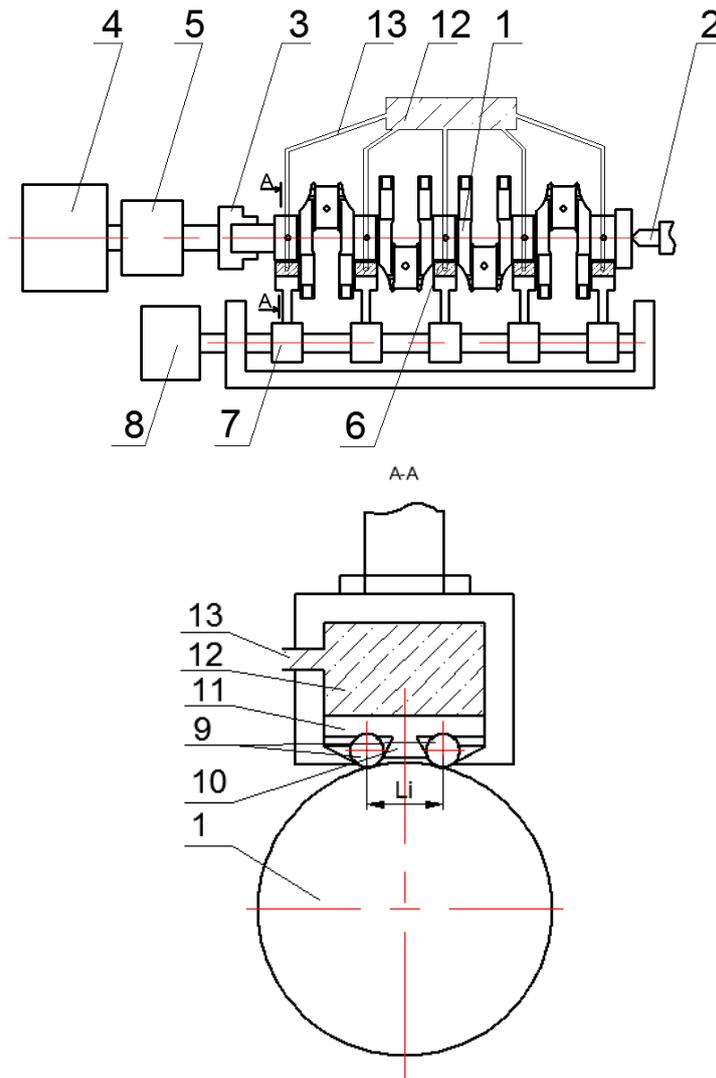


Рис. 3. Конструкция приспособления

Прижимная головка с шариками содержит два ряда роликов, разделенных сепаратором.

Расстояние между рядами, радиус шариков и их количество определяется коэффициентами (согласно ГОСТ 24773-81) осевого шага неровностей S_0 и величиной смещения i в уравнениях $y_1(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) \right]$ для первого шарика, $y_2(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) \right] + 2S_0$ – для второго шарика, $y_3(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) \right] + 4S_0$ – для третьего, $y_4(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{x}{S_k} \right) \right] + 6S_0$ – четвертого шарика первого ряда и уравнениями $y_{11}(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) + 2\pi i \right] + S_0$, $y_{22}(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) + 2\pi i \right] + 3S_0$, $y_{33}(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) + 2\pi i \right] + 5S_0$, $y_{44}(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{S_k} \right) + 2\pi i \right] + 7S_0$ для первого - четвертого шариков второго ряда соответственно. Оптимальное значение коэффициента величины смещения i , при котором обеспечивается наибольшее пересечение траекторий, принято 0,4–0,5. При заданном значении i расстояние между рядами шариков Li определяется как отношение радиуса шарика $r_{ш}$ к величине смещения i ($Li = \frac{r_{ш}}{i}$). Радиус шарика определяется как отношение длины шейки коленчатого вала $L_{ш}$ к количеству шариков, умноженному на 2 ($2n_{ш}$), и численно равен осевому шагу неровностей S_0 ($r_{ш} = S_0 = \frac{L_{ш}}{2 \cdot n_{ш}}$). Осциллирующее движение виброгенератора также задается параметрами кругового шага неровностей S_k и амплитудой осциллирующего движения инструмента A . При этом параметр A должен быть больше половины осевого шага неровно-

стей $S_0(A > S_0/2)$, а осевой шаг неровностей S_0 – меньше или равен межосевому расстоянию шариков первого и второго рядов ($S_0 \leq R_{12}$). Аргумент x в уравнении равен длине окружности обрабатываемой шейки. На рис.4 представлены параметры расположения шариков в воздействующих головках.

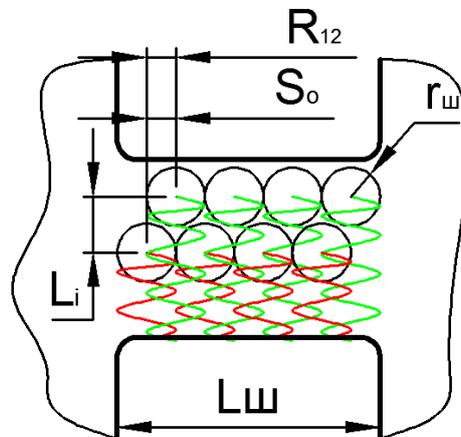


Рис. 4. Параметры расположения шариков в воздействующих головках

Математическая модель траекторий обработанной поверхности при параметрах $S_k=20$; $A=4$; $i=0,4$; $S_0=3$; $x=194$ показана на рис. 5.

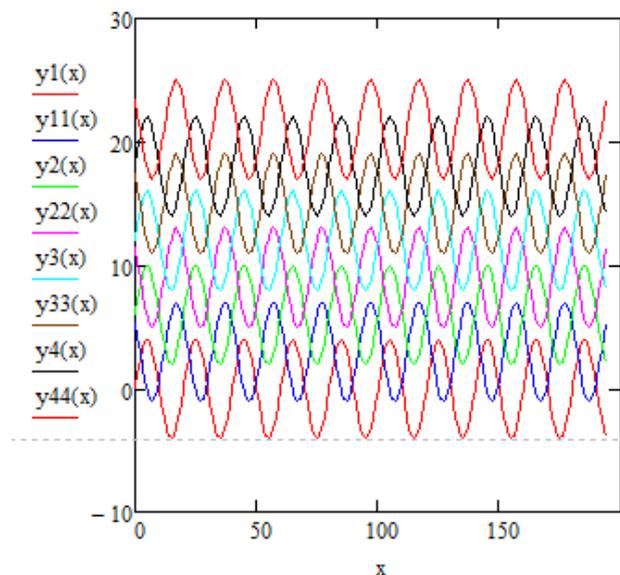


Рис. 5. Модель траекторий обработанной поверхности:

$y_1(x), y_2(x), y_3(x), y_4(x)$ – траектория движения шариков первого ряда;
 $y_{11}(x), y_{22}(x), y_{33}(x), y_{44}(x)$ – траектория движения шариков второго ряда

Практическое использование разработанного устройства в производственном процессе изготовления и ремонта коленчатых валов может повысить эксплуатационные качества деталей за счет:

- образования на рабочей поверхности деталей системы канавок и «масляных карманов», улучшающих процесс смазки трущихся поверхностей;
- сокращения времени приработки контактирующих поверхностей;
- образования напряжений сжатия в результате поверхностного наклепа рабочих поверхностей;
- упрочнения поверхностного слоя рабочих поверхностей.

Библиографический список

1. **Полетаев, В.А.** Методы обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей машин / В.А. Полетаев. – Иваново: ИГЭУ, 2010.
2. **Степанова, Т.Ю.** Технологии поверхностного упрочнения деталей машин / Т.Ю. Степанова. – Иваново: ИГЭУ, 2009. – 64 с.
3. **Овсеенко, А.Н.** Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения / А.Н. Овсеенко, В.И. Серебряков, М.М. Гаек. – М.: Янус-К, 2004. – 296 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.06. 2015*

A. N. Kochin, M. V. Zhelonkin, A. A. Golovin

EFFECT OF REGULAR MICRORELIEF ON PERFORMANCE MACHINE PARTS

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

Purpose: Improving the performance of machine parts.

Design/methodology/approach: Research the regular microrelief parameters of its application.

Findings: Creating a useful model for the treatment of crankshaft journals and the mathematical model with the processing parameters.

Research limitations/implications: Increase of operational properties of machine parts by application of methods of plastic deformation.

Originality/value: The article has scientific novelty and practical importance because at the moment the topic enhance the characteristics of the treated surfaces are paying a lot of attention.

Key words: friction pair, regular microrelief, partially regular microrelief, friction coefficient, vibro-knurling, processing of external cylindrical surfaces.

УДК 621.791.94

А. А. Москвичев, А.Р. Кварталов

ТЕНДЕНЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗВРЕДНОГО «СУХОГО РЕЗАНИЯ» МЕТАЛЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается возможность создания экологически безопасной механической обработки путем применения технологии «сухого резания» с полным отказом от применения СОТС. Показана возможность компенсации действия СОТС совмещением трех элементов в системе резания: режущего инструмента с многофункциональным покрытием; ионизирующей газовой среды, подаваемой в зону резания; ультразвуковых колебаний, накладываемых на режущий инструмент. Приводятся результаты исследования влияния сухого электростатического охлаждения на остаточные напряжения в поверхностных слоях детали. Даются рекомендации к применению экологически безопасного резания металлов в технологии обработки.

Ключевые слова: механическая обработка, контактные процессы, покрытие на инструменте, ультразвуковые колебания инструмента, электростатическое охлаждение.

Установлено, что контактные процессы при лезвийной обработке металлов существенно влияют на параметры работы системы резания. В то же время характер и содержание этих процессов в значительной степени зависят от проникающей способности смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), с использованием которых часто осуществляется процесс резания металлов.

В настоящее время промышленное производство России и зарубежных стран использует большое количество различных СОТС, наносящих огромный экологический ущерб окружающей среде. Применяемые в мировой практике металлообработки СОТС, особенно на масляной основе, чрезвычайно вредны для здоровья человека. В частности, трихлорэтилен, ортофосфаты способствуют возникновению депрессии нервной системы человека; нитриды и их комбинации с диэтанолaminaми являются сильнейшими канцерогенами; свинцовые мыла и хлорированный нафталин приводят к тяжелым кожным заболеваниям; сернистые соединения очень токсичны. В результате термодеструкции СОТС при резании металлов окружающая воздушная среда загрязняется химическими веществами типа масляных аэрозолей, альдегидов, хлористого водорода, формальдегидов, нитратов натрия, представляющих высокую угрозу здоровью человека и животных.

Мировая тенденция и стратегия ведущих стран мира при создании новых процессов механической обработки резанием металлов связана с частичным или полным отказом от применения СОТС, особенно содержащих хлор, серу, водные растворы электролитов и щелочей и др. [1-3]. Традиционные подходы к проблеме снижения вредного техногенного воздействия СОТС на окружающую среду в основном связаны с минимизацией количества СОТС, подаваемых в зону обработки, заменой токсичных компонентов СОТС на безвредные со сходным физическим действием, использованием методов активации СОТС и улучшения ее проникающей способности [1-4].

В последнее время все большее применение получают технологии «сухого резания» с полным отказом от СОТС. Технология «сухого резания» обычно включает применение новых инструментальных материалов (с износостойким многофункциональным покрытием, режущая керамика повышенной прочности, сверхтвердые материалы) или дополнительные источники энергии при комбинированном резании металлов [2,4,5].

В статье рассматриваются вопросы создания экологически безопасного высокоэффективного «сухого резания» для различных технологических операций механической обработки разнообразных материалов.

Известно [4], что применение СОТС при резании металлов существенно влияет на

контактные процессы, возникающие в зоне трения стружки, инструмента и обработанной поверхности. В результате интенсивной пластической деформации срезаемого слоя деформируемые объемы металла сильно разогреваются, причем особенно интенсивно в слоях, примыкающих к поверхностям трения. Пластическая деформация и сильный нагрев приводит поверхности трения металлов в состояние так называемой трибоплазмы. В частности, такие изменения контактных процессов связаны со значительным уменьшением энергетических затрат на упругопластическое деформирование срезаемого слоя и трение, что приводит к снижению термомеханической напряженности зоны резания, инструмента и обработанной поверхности детали (охлаждающий, смазочный и пластифицирующий эффекты). Это позволяет резко интенсифицировать процесс резания металлов, например, в результате увеличения скорости резания. Поэтому отказ от применения СОТС обуславливает альтернативную компенсацию упомянутых негативных эффектов.

В технологии экологически безопасного резания металлов предлагается применение трех основных элементов в системе резания, компенсирующих отсутствие СОТС: режущий инструмент с многофункциональным покрытием; ионизированная газовая среда, подаваемую в зону резания; ультразвуковые колебания, накладываемые на режущий инструмент (рис. 1).

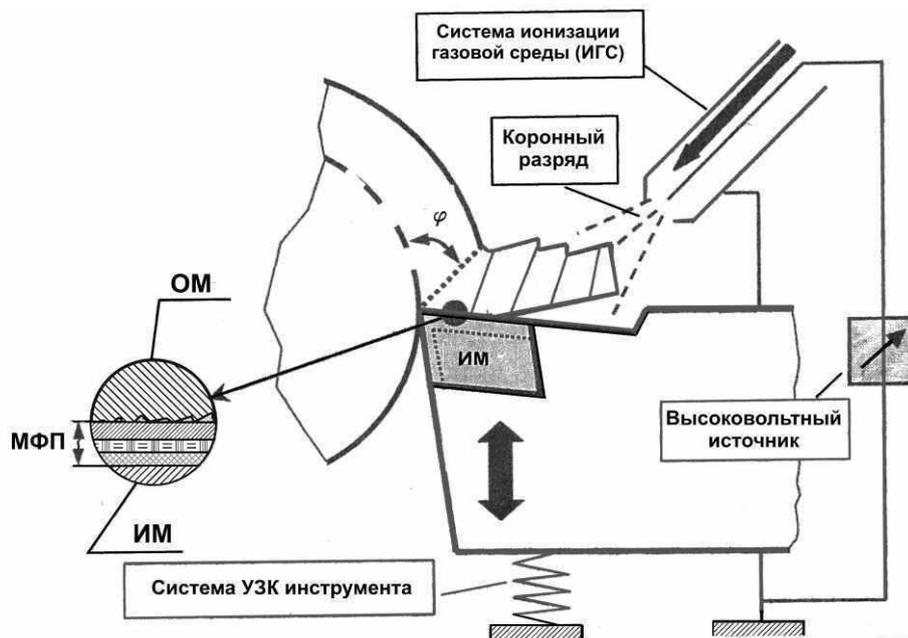


Рис. 1. Принципиальная схема элементов системы экологически безопасного резания металлов:

ОМ – обрабатываемый материал; ИМ – инструментальный материал;
УЗК – ультразвуковые колебания; МФП – многофункциональное покрытие

Ключевым элементом предлагаемой системы экологически безопасного «сухого резания» является режущий инструмент со специальным многофункциональным покрытием, включающим износостойкий, трибоактивный и активный слои, чередование которых в супермногослойной конструкции покрытия позволяет выполнить несколько функций. Износостойкий слой, имеющий повышенную твердость и термическую устойчивость, позволяет снизить интенсивность изнашивания инструмента в условиях повышенных термомеханических напряжений, характерных для «сухого резания». Трибоактивный слой, содержащий трибоактивные элементы (например, β -С, MoS_2 , соединения йода и др.), снижает трение и усиленное теплообразование основных фрикционных источников тепла, возмещая отсутствие смазочного эффекта СОТС.

Активный слой, содержащий активные элементы (Al, Ti и др.) в виде перенасыщенных твердых растворов в соединениях тугоплавких металлов, которые адаптированы для взаимодействия с элементами, проникающими из ионизированной газовой среды (например, O^{\pm} , C^+ , N^+ и др.) в зону контакта фрикционной пары. В результате взаимодействия элементов газовой среды и активного слоя многофункционального покрытия на контактных участках режущего инструмента непрерывно образуются тонкие пленки толщиной 50 – 100 нм, в виде твердых тугоплавких соединений (например, оксиды, оксинитриды, оксикарбиды и т.п.), что приводит к увеличению сопротивляемости инструмента изнашиванию и одновременному снижению трения, приводящего к износу.

Конструкция многофункционального покрытия на инструментальном материале основана на супермногослойной структуре с толщиной каждого слоя порядка 50–200 нм. Такая конструкция позволяет не только заметно повысить сопротивляемость макро- и микро-разрушению в условиях адгезионно-усталостных процессов и термоциклического нагружения инструмента, присущих процессам при резании металлов, но и формировать в объеме покрытия новое сочетание физико-механических свойств, резко повышающих его эффективность при лезвийной обработке. В частности, возможно получение более благоприятного соотношения таких характеристик покрытия, как твердость и пластичность. Вместе с тем, для супермногослойного покрытия характерна низкая дефектность и повышенная прочность, что обусловлено резким снижением количества дефектов по мере уменьшения толщины каждого слоя покрытия и возможностью выполнения прочностных свойств на уровне планируемых. Синтез такого супермногослойного многофункционального покрытия осуществляется с помощью специальной нанотехнологии, реализуемой в вакуумно-дуговых установках.

Существенным элементом экологически безопасного «сухого резания» являются ионизированные газовые среды, введение которых в зону резания необходимо для компенсации охлаждающего, смазывающего и пластифицирующего физических эффектов, присутствующих процессу резания с применением СОТС. Для увеличения проникающей способности элементов газовой среды и стимуляции физико-химических контактных процессов в зоне трения стружки с режущим инструментом производится активация газовой среды – ионизация ее с помощью электрических разрядов разных видов [5, 7].

Для повышения проникающей способности ионизированной газовой среды, особенно при высокоскоростной лезвийной обработке, предлагается использование ультразвуковых колебаний, накладываемых на режущий инструмент в направлении скорости резания, что способствует увеличению упругого контакта стружки с инструментом, стимулируя повышенное проникновение элементов ионизированной среды к активным слоям покрытия. Кроме этого, ультразвуковые колебания выполняют важную самостоятельную роль управления неустойчивых упругопластических деформаций. В частности, при наложении на режущий инструмент высокочастотных тангенциальных колебаний возможно устранение эффекта неустойчивости в зоне стружкообразования, если частота колебаний выше частоты неизо-термической неустойчивости деформационных процессов в получаемой стружке [7].

Исследование влияния сухого электростатического охлаждения (СЭО) на поверхностные остаточные напряжения, проведенные в НИИД [2], обнаружили, что резание металлов с таким охлаждением благоприятно сказывается на формировании поверхностных остаточных напряжений. Обрабатываемая трубная заготовка из нержавеющей стали 12Х18Н9Т была разделена на три участка, обработка которых производилась: первого – без охлаждения, второго – с сухим электростатическим охлаждением, третьего – с применением СОЖ «Укринол-1». Обработка осуществлялась на режиме резания: $V = 100$ м/мин, $S = 0,21$ мм/об, $t = 1,5$ мм. В качестве режущего инструмента применялся резец с неперетачиваемыми пластинками квадратной формы из твердого сплава ВК60М. Обработка каждого участка производилась острой режущей кромкой

с целью исключения влияния износа инструмента на формирование остаточных напряжений и позволяла учесть более точное воздействие особенностей охлаждения.

После резания из каждого участка электроэрозионным методом вырезалось по три образца для исследования каждого вида напряжений, которые проводились на автоматизированном комплексе «ПОВКОН «Тензор» [9]. Исследования остаточных напряжений обнаружили, что при обработке с использованием сухого электростатического охлаждения в поверхностном слое возникали благоприятные осевые остаточные напряжения сжатия с подслоиным максимумом 300–350 МПа на глубине 20 мкм. Сжимающие напряжения распространяются на глубину до 200 мкм (рис. 2, рис. 3).

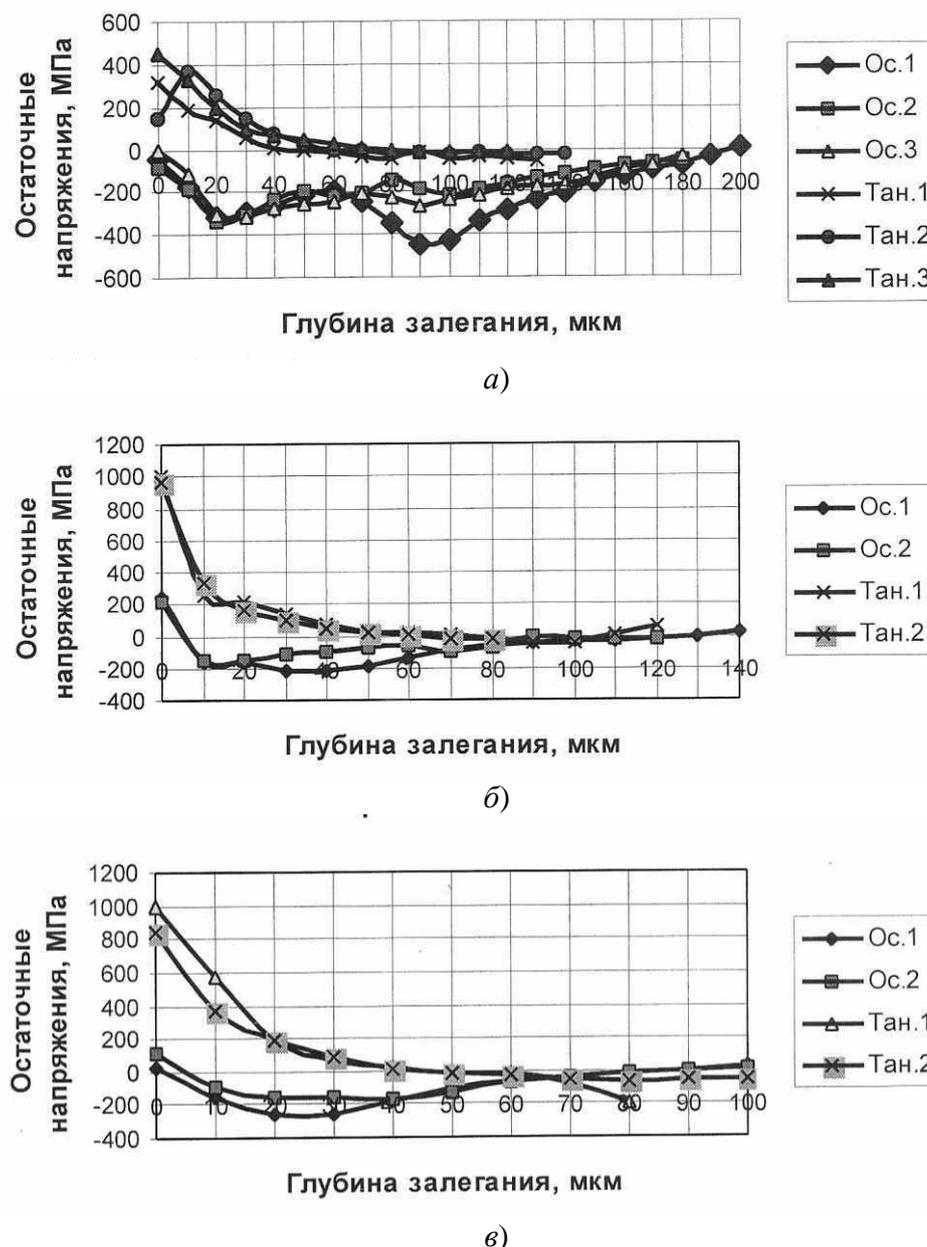


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое детали по глубине залегания при точении:
 а – с СЭО; б – всухую; в – с СОЖ

Важно отметить, что тангенциальные остаточные напряжения являются растягивающими, максимум которых (200–400 МПа) находятся на поверхности или глубине 40–50 мкм. При резании же с применением СОЖ или без охлаждения появлялись менее благоприятные

остаточные напряжения. Так, если величины максимальных осевых остаточных напряжений сжатия близки к таковым при обработке с использованием сухого электростатического охлаждения (150–300 МПа), то глубина их распределения в 2–3 раза меньше. Более того, на многих образцах на поверхности появились растягивающие напряжения до 200 МПа. Еще большая разница получена при определении тангенциальных окружных остаточных напряжений. Так, если при обработке с применением СОЖ и без охлаждения величины растягивающих напряжений в поверхностном слое достигли 800–1000 МПа при глубине их распределения 50–60 мкм, то при сухом электростатическом охлаждении их максимальные значения не превышают 200–400 МПа.



а)



б)

Рис. 3. Остаточные напряжения при точении стали 12Х18Н9Т:

а – осевые; б – тангенциальные

Кроме этого, при сухом электростатическом охлаждении на глубине 40–50 мкм эти напряжения превращаются в сжимающие. При этом тангенциальные растягивающие напряжения незначительной величины можно устранить последующей полировкой или упрочнением пластическим деформированием поверхностного слоя детали и изменением режима резания.

Таким образом, технология экологически безопасного резания металлов основывается на возможности управления контактными процессами, трением, стружкообразованием, направлением и интенсивностью тепловых потоков, износостойкостью режущего инструмента в процессе «сухого резания». В результате объединения нескольких механизмов взаи-

модействия элементов газовой среды, проникновение которых на контактные поверхности режущего инструмента с многофункциональным покрытием стимулируется ультразвуковыми колебаниями, возникает несколько физических эффектов, компенсирующих основные действия СОТС:

1. Формируются антифрикционные пленки и упрочняющие фазы соединений тугоплавких металлов, в результате этого за счет снижения адгезионной активности многофункционального покрытия уменьшается трение, мощность фрикционных источников тепла, термомеханические напряжения и интенсивность изнашивания контактных поверхностей режущего инструмента (смазывающий и пассивирующий эффекты).

2. Снижается поверхностная прочность прирезцової поверхности стружки благодаря высокой проникающей способности элементов газовой среды и последующего «расклинивающего» эффекта, в результате образуется элементная стружка, наиболее удобная для удаления из зоны резания (пластифицирующий эффект Ребиндера).

3. Перераспределяется направленность тепловых потоков и их интенсивность, что позволяет регулировать эффекты упрочнения и разупрочнения инструментального и обрабатываемого материалов, снижаются энергетические затраты на процесс резания за счет разупрочнения обрабатываемого материала в зоне обработки, увеличивается сопротивляемость инструментального материала макро- и микроразрушению (упрочняющий и разупрочняющий эффекты).

4. Увеличивается теплопроводность среды, окружающей зону резания, что позволяет существенно интенсифицировать теплоток в эту среду и снизить температуру в зоне обработки (охлаждающий эффект).

Для определения областей наиболее эффективного применения экологически безопасного «сухого резания» требуются масштабные лабораторно-промышленные исследования, однако проведенные испытания позволяют установить определенную эффективность этой технологии резания металлов. Отмеченное относится:

- к обработке небольших заготовок;
- финишной обработке на высоких и сверхвысоких скоростях резания;
- резанию труднообрабатываемых материалов;
- серийному производству, не требующему частой переналадки оборудования;
- обработке конструкционных материалов, которые не допускают применения СОТС.

Библиографический список

1. **Латышев, В. Н.** Экологически чистые смазочно-охлаждающие технологические средства / В. Н. Латышев [и др.] // Вестник машиностроения. 1999. № 7. С. 32–35.
2. **Поклад, В. А.** Экологически безопасная технология резания / В. А. Поклад [и др.] // Двигатели и экология: тез. докл. научно-технич. симпозиума. – М.: ВВЦ, 2000. С. 47–54.
3. **Матвиевский, Р. М.** Повышение экологической чистоты смазочных масел // Трение и износ. 1994. Т. 15. №5.
4. **Латышев, В. Н.** Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1985. – 65 с.
5. **Верещака, А. С.** Повышение эффективности лезвийной обработки применением экологически чистых сред / А. С. Верещака, А. К. Кириллов, Е. А. Чекалова // Новые технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг. Интерпартнет – 97: тр. VII междунар. науч.-техн. семинара. – Харьков: ХГПУ, 1997. С. 45–46.
6. **Козлов, А. А.** Численное моделирование процессов неизометрической неус-точивости пластической деформации металлов / А. А. Козлов, П. В. Кузин // Тр. Междунар. конф. – Варна. Болгария. 1989. С. 98–104.
7. **Подураев, В.Н.** Механическая обработка с охлаждением ионизированным воздухом / В. Н. Подураев, А. С. Татаринев, В. Д. Петрова // Вестник машиностроения. 1991. № 11. С. 27–31.
8. **Верещака, А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М.: Машиностроение. 1993. – 337 с.

9. Меркулова, Н.С. Контроль поверхностных остаточных напряжений в металлах и покрытиях // Гальванотехника и обработка поверхности. 1993. Т. 2. № 5.

*Дата поступления
в редакцию 04.06. 2015*

A. A. Moskvichev, A.R. Kvartalov

TENDENCIES ECOLOGICALLY HARMLESS "DRY CUTTING" OF METALS

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

Purpose: The possibility of creating environmentally friendly machining by the application of technology of "dry cutting" with a complete rejection of the use of COTS.

Approach: It is known that the use of COTS when cutting metals significantly affects the contact processes, which determine the elastoplastic deformation of the shear layer and the thermo-mechanical tensions in the cutting zone.

Findings: The possibility of compensation of action of COTS by the combination of three elements in the system of cutting: cutting tool with multifunction coating, ionizing the gaseous medium supplied to the cutting zone and ultrasonic vibrations are superimposed on the cutting tool.

Research implications: The results of using the tool with multi-functional coating comprising a wear-resistant, tabactivity and active layers in super multilayer coating structures and the influence of dry electrostatic cooling on the residual stress in the surface layers of a detail.

Value: Thus, the technology is environmentally safe metal cutting is based on the possibility of influence on the contact processes with the objective of increasing the wear resistance of the cutting tool. Recommendations for use of this method in processing technology.

Key words: machining, contact processes, the coating on the instrument, ultrasonic vibrations of the tool, the electrostatic cooling.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.С. Бородин, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Е.Н. Полозкова, О.Б. Солдаткин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

РАСЧЕТНО–ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГООБЛОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей течения теплоносителя в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С за пластинчатой дистанционирующей решеткой. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии газового трассера. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока и распространения концентраций трассера позволил детализировать картину течения теплоносителя в тепловыделяющей сборке. На основе полученных результатов сделаны рекомендации по уточнению методик определения расходов теплоносителя для программ поячеечного расчета активной зоны реактора КЛТ-40С. Результаты исследований приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов данного типа, а также включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов).

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующая решетка, гидродинамика теплоносителя.

Введение

В настоящее время в России идет завершающий этап строительства плавучего энергоблока «Академик Ломоносов», источник энергии которого – реактор КЛТ-40С. Главным конструктором и поставщиком оборудования для данной реакторной установки является АО «ОКБМ Африкантов».

В основе проекта реактора КЛТ-40С лежит переход от активной зоны канального типа традиционной ледокольной реакторной установки к активной зоне кассетного типа. Новая активная зона состоит из чехловых тепловыделяющих сборок (ТВС) с пластинчатыми дистанционирующими решетками (ДР) [1]. Конструктивные особенности кассетной активной зоны КЛТ-40С по сравнению с традиционными решениями активных зон атомных ледоколов обусловили необходимость оценки теплотехнической надежности.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете [2], который проводится с использованием программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов [3]. Большинство таких программ основаны на математических моделях, включающих в себя эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние различных конструктивных элементов ТВС на гидродинамику, тепло- и массообмен теплоносителя, что предполагает проведение дополнительных работ по их валидации.

Следовательно, особенности конструкции ТВС реактора КЛТ-40С требуют экспериментального исследования закономерностей формирования локальных гидродинамических

характеристик потока теплоносителя в пучках ТВЭЛов за ДР, что является актуальной задачей, решение которой позволит обосновать теплотехническую надежность активной зоны реактора КЛТ-40С.

Экспериментальный стенд и методика измерений

Для исследования гидродинамики теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления; ресиверная емкость; экспериментальная модель (ЭМ) (рис. 1, а); расходомерное устройство; система подачи и отбора трассера; измерительный комплекс.

Исследования проводились на 84-стержневой модели ТВС, выполненной с коэффициентом геометрического подобия 5,9 и имеющей длину 3 м. Экспериментальная модель состоит из ТВЭЛов-имитаторов диаметром $d=40$ мм, расположенных с шагом $s/d=1,46$ (s – расстояние между центрами ТВЭЛов-имитаторов), имитаторов стержней выгорающего поглотителя диаметром $d=26$ мм и поясов дистанционирующих решеток, представляющих собой трехуровневый набор пластин, заключенных в общий бандаж (рис. 1, б).

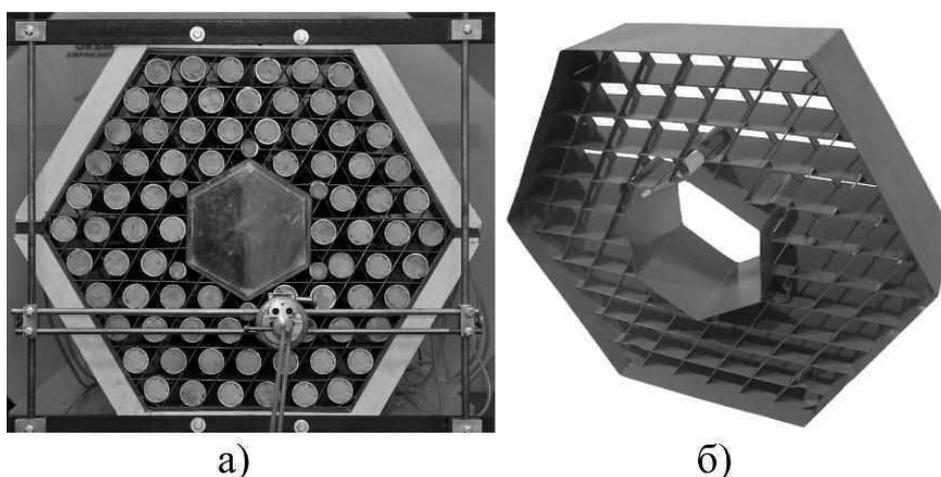


Рис. 1. Экспериментальная модель (а) и пояс дистанционирующей решетки (б)

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд; трубка Пито-Прандтля; блок аналоговых преобразователей давления; газоанализатор; расходомер газа; ЭВМ.

Измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газовой смеси осуществлялись газоанализатором посредством зонда, представляющего собой трубку Пито-Прандтля. Диапазон измеряемых концентраций составляет 0-10000ppm, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны $\pm 15\text{ppm}$ (0–1000ppm) и $\pm 1,5\%$ (1000–10000ppm) [6].

Поддержание заданного расхода трассера осуществлялось массовым расходомером. Погрешность измерения расхода газа составляла не более 0,5%.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом, который имеет пять стальных капилляров диаметром 0,8 мм, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Чувствительная часть зонда 20 мм. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку диаметром 5 мм. Общая длина зонда 600 мм. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Диапазон измерений данных преобразователей 0-4 кПа, предел допускаемой основной погрешности данных приборов $\pm 0,25\%$.

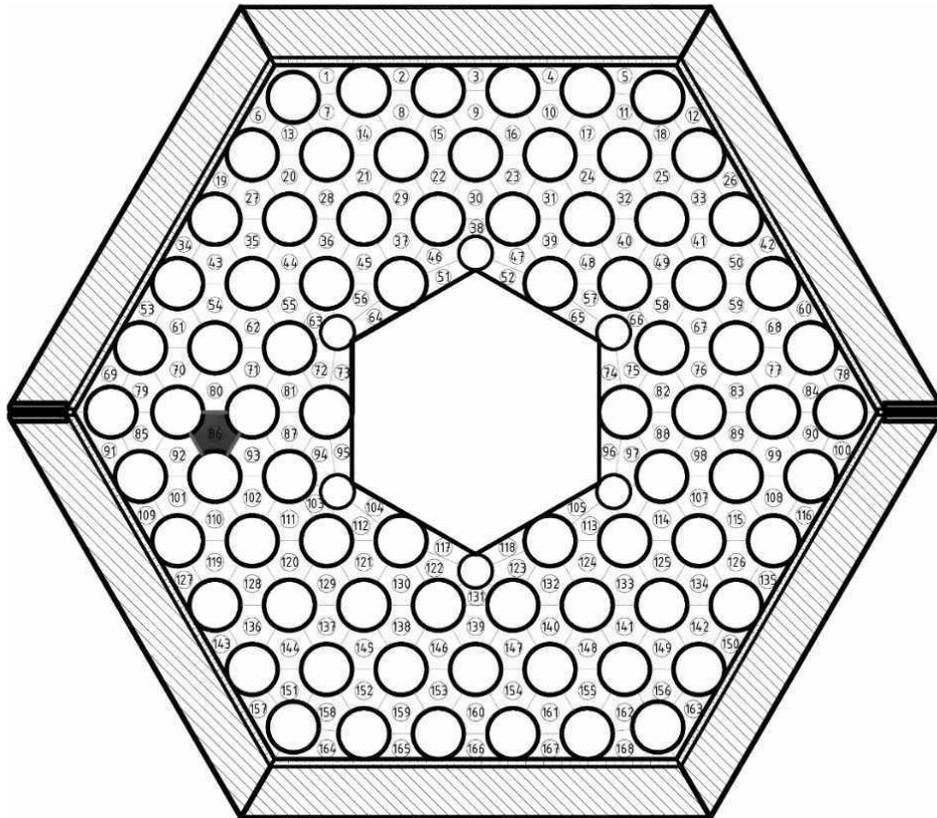


Рис. 2. Поперечное сечение ЭМ с расположением ячейки инжекции газа трассера

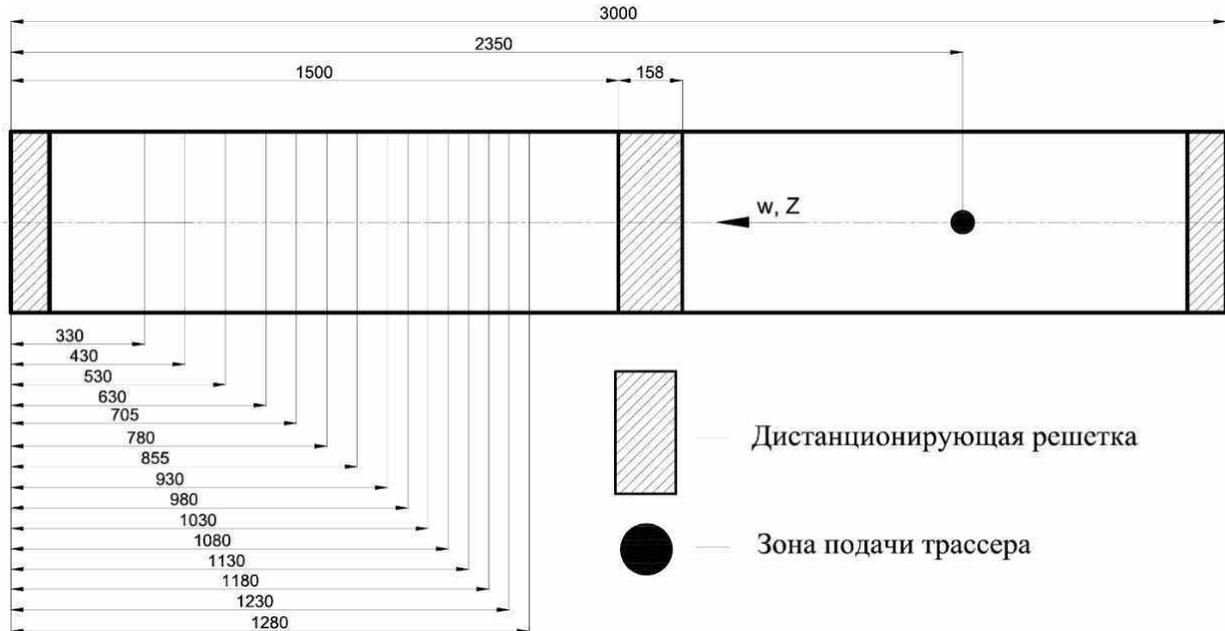


Рис. 3. Схема расположения сечений измерения концентрации трассера по длине ЭМ

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется воздухом, то на основе теории подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается практически неизменным. Следовательно, проведение исследований гидродинамики и межъячеечного массообмена потока на ЭМ в зоне автомодельности позволит перенести результаты эксперимента на

натурные условия течения теплоносителя в штатных активных зонах. Для этого был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в ЭМ, нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя. По полученным результатам область автомодельного течения в ЭМ начинается при числе Рейнольдса 55000, а все исследования проводились при числе Рейнольдса 90000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Значение среднерасходной скорости на входе в ЭМ составляло $\overline{W}_z = 34,5$ м/с.

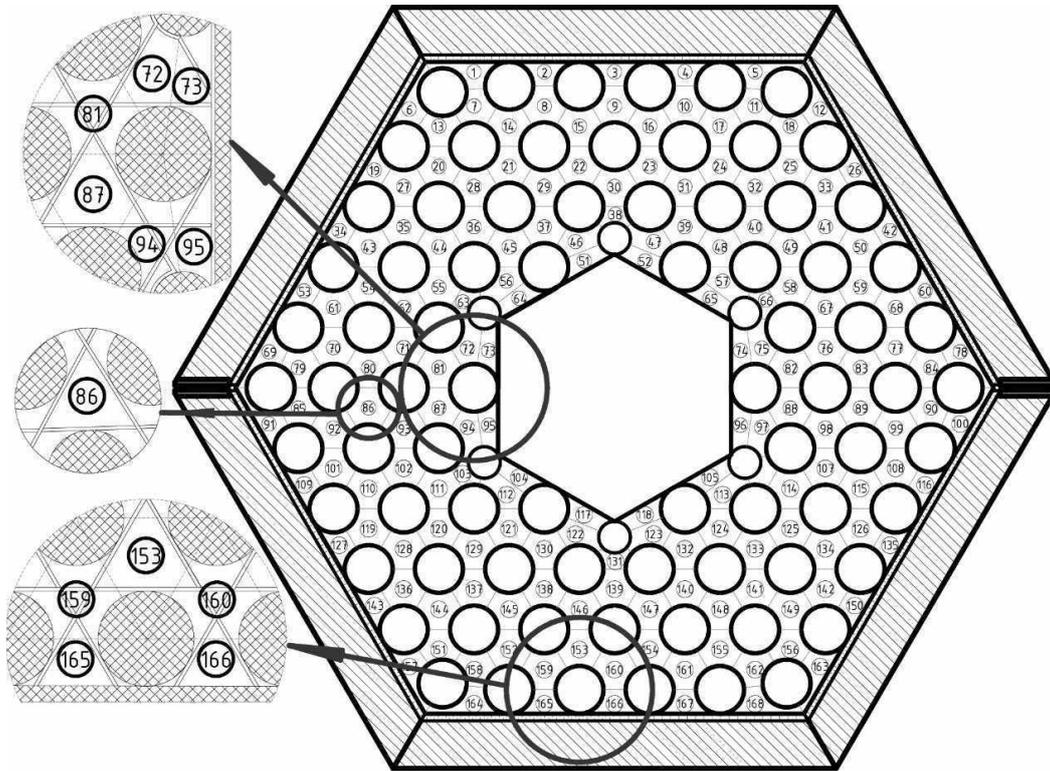


Рис. 4. Области измерения вектора скорости в поперечном сечении ЭМ



Рис. 5. Схема расположения сечений измерения гидродинамических характеристик по длине ЭМ

Также на аэродинамическом стенде был экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) пояса ДР. Проведение данных работ обусловлено тем, что обоснование представительности экспериментальных исследований требует соблюдения равенства КГС натуральных решеток и решеток ЭМ. Анализ результатов исследований КГС показывает, что выбранная конструкция и геометрические характеристики ДР в области автомодельного течения обеспечивают необходимое гидравлическое сопротивление, а полученное значение соответствует КГС натуральных решеток и составляет $\xi_{\text{ДР}} = 0,29$.

Изучение межъячеечного массообмена потока в ЭМ проводилось с применением метода диффузии примесей [5]. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации его концентрации. Исследования межъячеечного массообмена проводились при расположении ДР, моделирующем шаг между штатными решетками. Методика проведения исследований заключалась в следующем:

- газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку №86 ЭМ до пояса ДР по ходу течения потока теплоносителя (рис. 2);
- с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемым поясом ДР в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 3);

на основе полученных данных строились графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты.

Методика проведения исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя заключалась в следующем:

1) измерение локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом проводилось в выделенных областях поперечного сечения ЭМ (рис. 4);

2) в каждой из указанных областей измерения проводились непосредственно за исследуемым поясом ДР в 19 сечениях по длине модели (рис. 5).

Результаты исследования гидродинамики и межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С

Комплексный анализ результатов исследований гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С позволил заключить следующее:

1. Во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения, при этом поперечное перемешивание теплоносителя между ячейками происходит за счет естественной турбулентности потока.

2. В центре стандартных ячеек, где пластины практически не препятствуют прохождению теплоносителя (рис 6, а), наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму (рис. 7). Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения и составляет $(W_z / \overline{W_z}) = 1,1 \div 1,2$ от среднерасходной скорости (рис. 7). При этом аксиальная составляющая вектора скорости в таких типах ячеек на 10-15 % больше (рис. 8), чем в стандартных ячейках, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (рис. 6, б). Данное явление объясняется тем, что пластины ДР реактора КЛТ-40С создают дополнительное гидравлическое сопротивление потоку.

3. Анализ распределения расходов G_i / G_j (i, j – порядковый номер ячеек экспериментальной модели) в стандартных ячейках ТВС двух вариантов затеснения проходного сечения пластинами ДР показал, что через ячейки, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя, расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре (рис. 9).

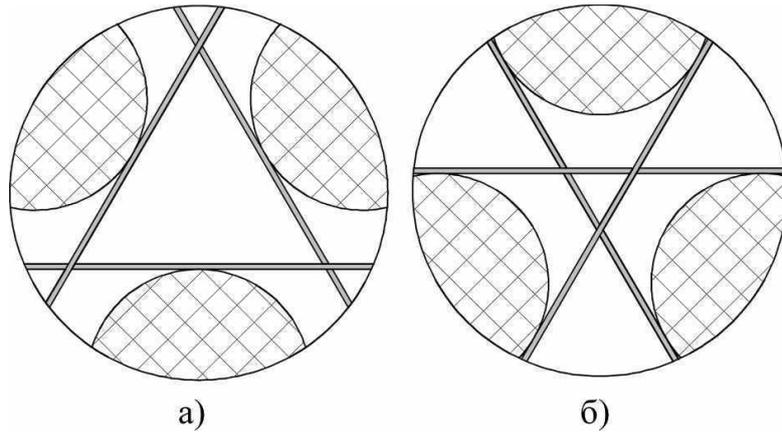


Рис. 6. Общий вид стандартных ячеек ЭМ:

a – пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя (тип 1);
б – пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (тип 2)

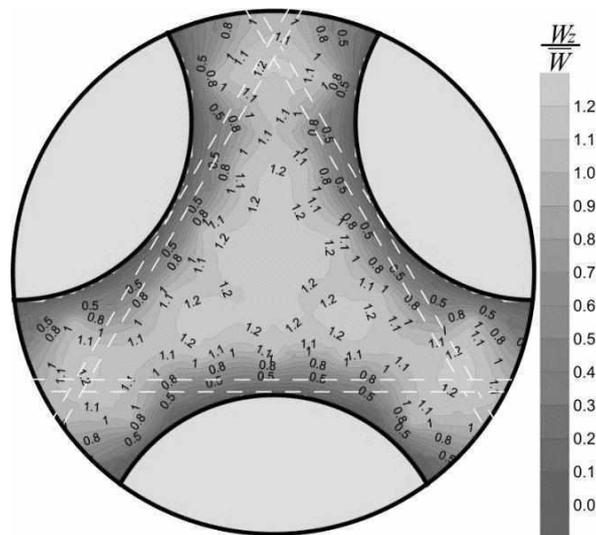


Рис. 7. Картограмма распределения аксиальной скорости потока теплоносителя для ячеек с пластинами ДР, практически не препятствующими прохождению теплоносителя

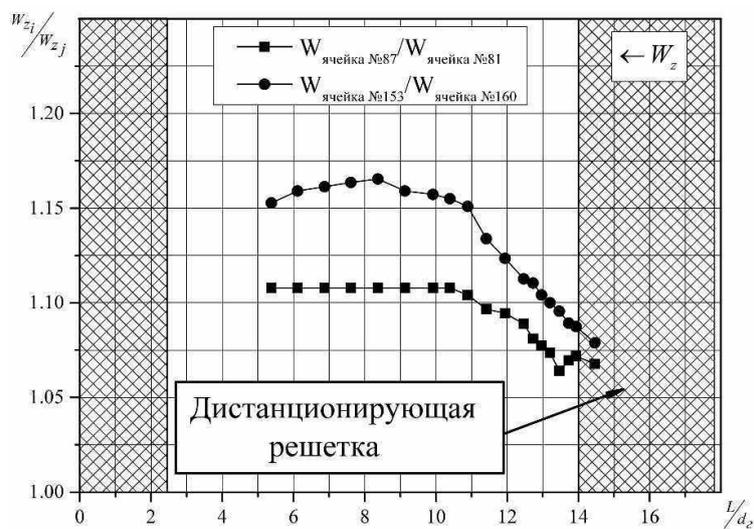


Рис. 8. Отношение аксиальной составляющей вектора скорости в стандартных ячейках двух вариантов затеснения проходного сечения: i, j – номера ячеек экспериментальной модели

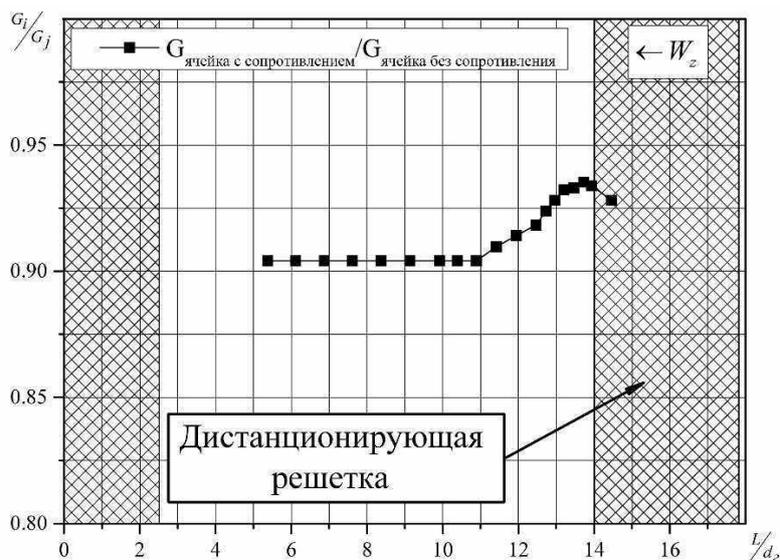


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через стандартные ячейки двух вариантов затеснения проходного сечения

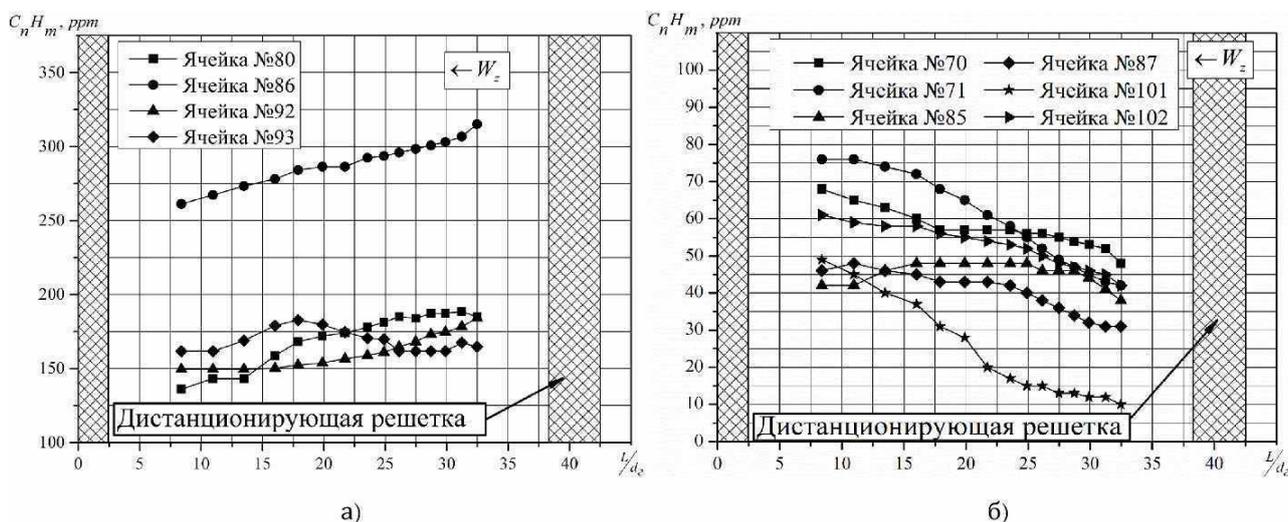


Рис. 10. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за поясом ДР

Комплексный анализ результатов исследований межъячеечного массообмена теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С позволил выявить основные закономерности движения потока теплоносителя за поясом ДР:

1. Посредством механизма турбулентного переноса за ДР экспериментальной модели часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в смежную с ней ячейку, смешиваясь при этом с основным осевым потоком. Трассер в ячейке инъекции 86 на расстоянии за ДР $L/d_2=32,5$ имеет значение 315 ppm. Из ячейки подачи трассер под воздействием турбулентного массопереноса распространяется в соседние ячейки 80, 92, 93 (рис. 10, а). Далее трассер из ячейки 80 переходит в ячейки 70, 71. Аналогично из ячеек 92 и 93 трассер распространяется в смежные ячейки 85, 101 и 87, 102 (рис. 10, б).

2. Дистанционирующая решетка ТВС реактора КЛТ-40С вносит возмущение в поток теплоносителя, вследствие чего возрастает интенсивность межъячеечного массообмена, характеризующая степень турбулентности потока. С другой стороны, наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, тем самым «сглаживая» возмущения, вносимые решеткой. На рис. 10, а виден характер затухания возмущений за поясом ДР.

3. Дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному

перемешиванию потока теплоносителя, так как распространение трассера в поперечном сечении ЭМ за ДР охватывает не более одиннадцати ячеек вокруг точки инъекции, обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой ДР, а также тем, что ТВС имеет раздвинутый пучок ТВЭЛов.

Анализ аксиальной скорости потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С с использованием расчетного кода КАНАЛ

Код КАНАЛ предназначен для поячейкового теплогидравлического расчета ТВС со стержневыми ТВЭЛами в стационарных режимах работы активных зон водо-водяных реакторов [7]. Анализ распределения аксиальной скорости потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С проводился с помощью кода КАНАЛ, адаптированного к расчетам гидродинамических характеристик воздушных потоков. Перед проведением расчетов аксиальной скорости в характерных ячейках за ДР модели ТВС реактора КЛТ-40С в программе КАНАЛ необходимо построить расчетную область В поперечном сечении расчетная область содержала все 168 ячеек модели ТВС реактора КЛТ-40С, включая ТВЭЛы, стержни выгорающего поглотителя и центральный вытеснитель.

Ячейки расчетной области были разделены на 14 характерных типов. Разделение ячеек основывалось на величине гидравлического сопротивления, обусловленного различной конфигурацией пластин ДР. В продольном сечении ТВС реактора КЛТ-40С была разбита на 32 расчетных участка. ДР задавалась массивом коэффициентов гидравлического сопротивления ячеек на расчетном участке, соответствующем ее расположению в ЭМ.

На основе анализа результатов экспериментального и расчетного распределения аксиальной скорости за ДР по длине модели ТВС реактора КЛТ-40С можно заключить следующее:

1. Коэффициент гидравлического сопротивления ДР, полученный на основе расчетных данных, составил 0,26. Погрешность относительно экспериментального значения коэффициента гидравлического сопротивления ДР, равного 0,29, составила 10%.

2. Расчетное и экспериментальное распределения аксиальной скорости по длине ЭМ за ДР в ячейках, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре, имеет различный характер (рис. 11а). В ячейках, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя, наблюдается совпадение характера расчетного и экспериментального распределения аксиальной скорости по длине ЭМ (рис. 11, б). Данный факт показывает то, что ячейки с различными типами затеснения поперечного сечения имеют различное гидравлическое сопротивление, что не учтено в коде КАНАЛ.

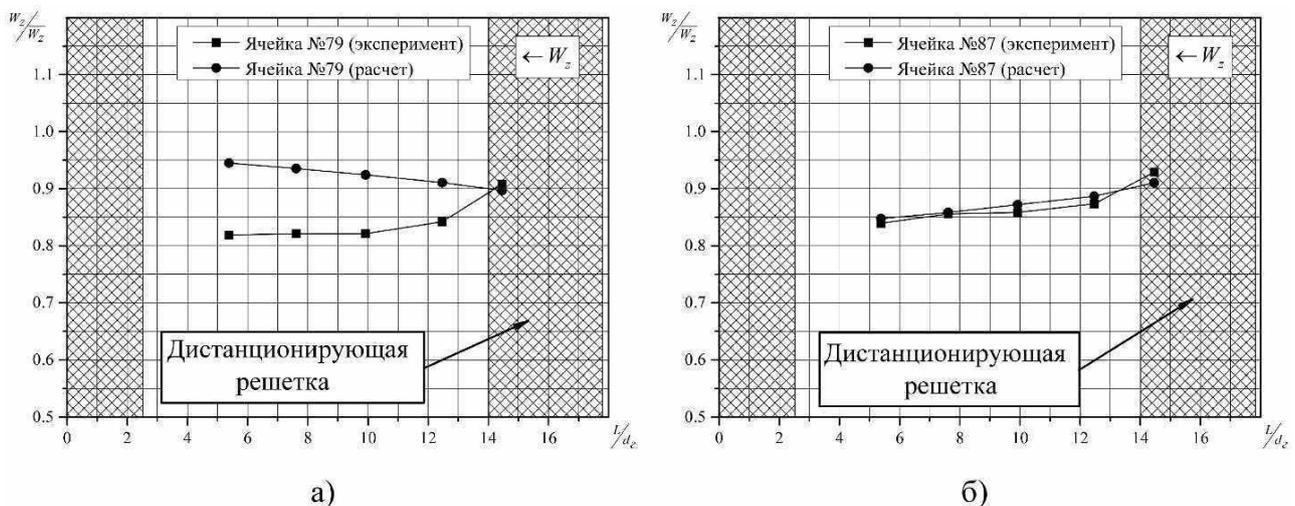


Рис. 11. Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной скорости:
 а – в ячейке, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре;
 б – в ячейке, где пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя

3. В выходном сечении модели ТВС реактора КЛТ-40С наблюдается схожий характер

распределения расчетного и экспериментального значений аксиальной скорости для всех исследованных ячеек (рис. 12).



Рис. 12. Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной скорости в выходном сечении ЭМ

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных и расчетных данных сделаны следующие выводы:

1. Во всех исследуемых областях ТВС КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения.

2. Выявлено, что в стандартных ячейках, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя, значения аксиальной составляющей вектора скорости на 10–15% больше, чем в ячейках, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение.

3. Определено, что через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя, расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение.

4. Дистанционирующая решетка ТВС реактора КЛТ-40С вносит возмущение в поток теплоносителя, вследствие чего возрастает интенсивность межъячеечного массообмена, характеризующаяся степенью турбулентности потока. С другой стороны, наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, тем самым «сглаживая» возмущения, вносимые решеткой.

5. Дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя, что обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой дистанционирующей решетки, а также тем, что ТВС имеет раздвинутый пучок ТВЭЛов.

6. Повышение точности расчета распределения аксиальной скорости потока теплоносителя по ячейкам за дистанционирующей решеткой ТВС реактора КЛТ-40С требует проведения комплекса экспериментальных исследований для определения коэффициентов гидравлического сопротивления ячеек всех вариантов затеснения поперечного сечения, которые используются в качестве исходных данных, входящих в замыкающие системы уравнений, используемых в программе КАНАЛ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013.
2. **Баринов, А.А.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
3. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–257.
4. **Варенцов, А.В.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. №8. С. 20–27.
5. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков [и др.] – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
6. **Бородин, С.С.** Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 5. Вып 3. С. 98–107.
7. **Дмитриев, С.М.** Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 / С.М. Дмитриев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2012. №1. С. 99–108.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

**S.S. Borodin, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova,
O.B Soldatkin, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov**

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW OF COOLANT IN THE REACTOR CORE FLOATING POWER

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

Purpose: The main objective of the research was to investigate the characteristics of mass transfer and hydrodynamics of the coolant flow in the fuel assembly KLT-40S reactor.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics and mass transfer in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. For the local characteristics of intercellular mass transfer and hydrodynamics of the heat carrier in the KLT-40S nuclear reactor FA research the gas diffusion method was used.

Findings: Experimental researches of heat carrier mass transfer in the nuclear reactor FA were organized. The heat carrier flow features in fuel assemblies of the KLT-40S reactor were revealed.

Research limitations/implications: The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the KLT-40S reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Join Stock Company OKBM Afrikantov.

Originality/value: Topically of this article is in heat carrier mass transfer research in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the KLT-40S reactor active zone.

Key words: nuclear reactor, core, fuel assembly, spacing grid, coolant hydrodynamics.

УДК 621.373.8

А.В. Назаров¹, Е.А. Попов², М.С. Рожкова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ НА ДИСПЕРСИОННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОСНОВНОЙ ВОЛНЫ КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО СЛОИСТОГО ФЕРРИТ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приводятся результаты исследования влияния величины внутреннего радиуса ферритовой трубки на спектральные и поляризационные свойства основной волны круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода при отсутствии и наличии магнитных потерь в феррите.

Ключевые слова: феррит-диэлектрический волновод, дисперсионная характеристика, поверхностная волна, поляризация электромагнитного поля.

Круглый открытый слоистый феррит-диэлектрический волновод представляет собой ферритовую трубку с внутренним и внешним радиусами a и b соответственно (рис. 1). Ферритовый слой намагничен до насыщения постоянным магнитным полем \vec{H}_0 , направленным вдоль оси z , в положительном направлении которой распространяется электромагнитная волна частоты ω . Постановка краевой задачи для рассматриваемой направляющей структуры приведена в [1]. При решении задачи используются метод частичных областей и метод укорочения дифференциального уравнения [2].

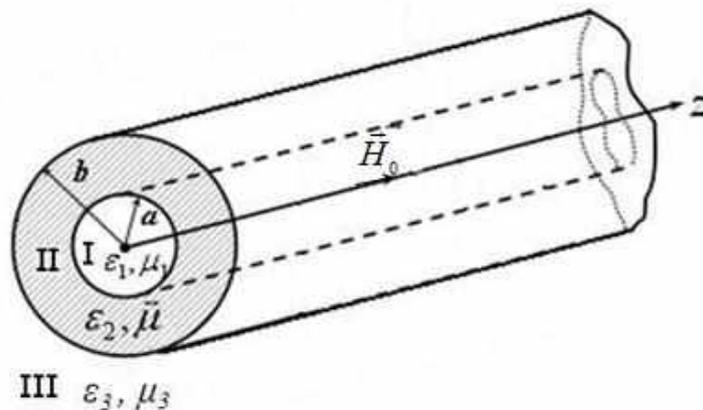


Рис. 1. Круглый открытый слоистый феррит-диэлектрический волновод

Поле электромагнитной волны в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе является всегда (и при отсутствии у него угловой зависимости) гибридным, поэтому соответствующая краевая задача является [3, 4] несамосопряженной как при отсутствии, так и при наличии потерь в образующих структуру средах. Поскольку [5] собственные значения несамосопряженной краевой задачи в общем случае комплексные, то наиболее общими решениями дисперсионного уравнения волн круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода будут комплексные волновые числа $\beta = \beta' + i\beta''$.

Подход к классификации волн рассматриваемой направляющей структуры изложен в [6], где также приведены результаты исследования дисперсионных свойств некоторых азимутально-симметричных и азимутально-несимметричных волн в отсутствие диссипации

энергии. В статье рассматривается влияние величины внутреннего радиуса a ферритовой трубки на дисперсионные и поляризационные свойства основной волны HE_{11} круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода как при отсутствии, так и наличии магнитных потерь в феррите.

На рис. 2 представлены дисперсионные характеристики волн $HE_{11}^{(+)}$ (рис. 2, а) и $HE_{11}^{(-)}$ (рис. 2, б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода без потерь при различных значениях внутреннего радиуса a ферритовой трубки ($b = 0,02$ м; $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_0$; $\varepsilon_2 = 14,8\varepsilon_0$; частота ферромагнитного резонанса $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1,76$ ГГц; намагниченность насыщения феррита $M_s = 103,5$ кА/м).

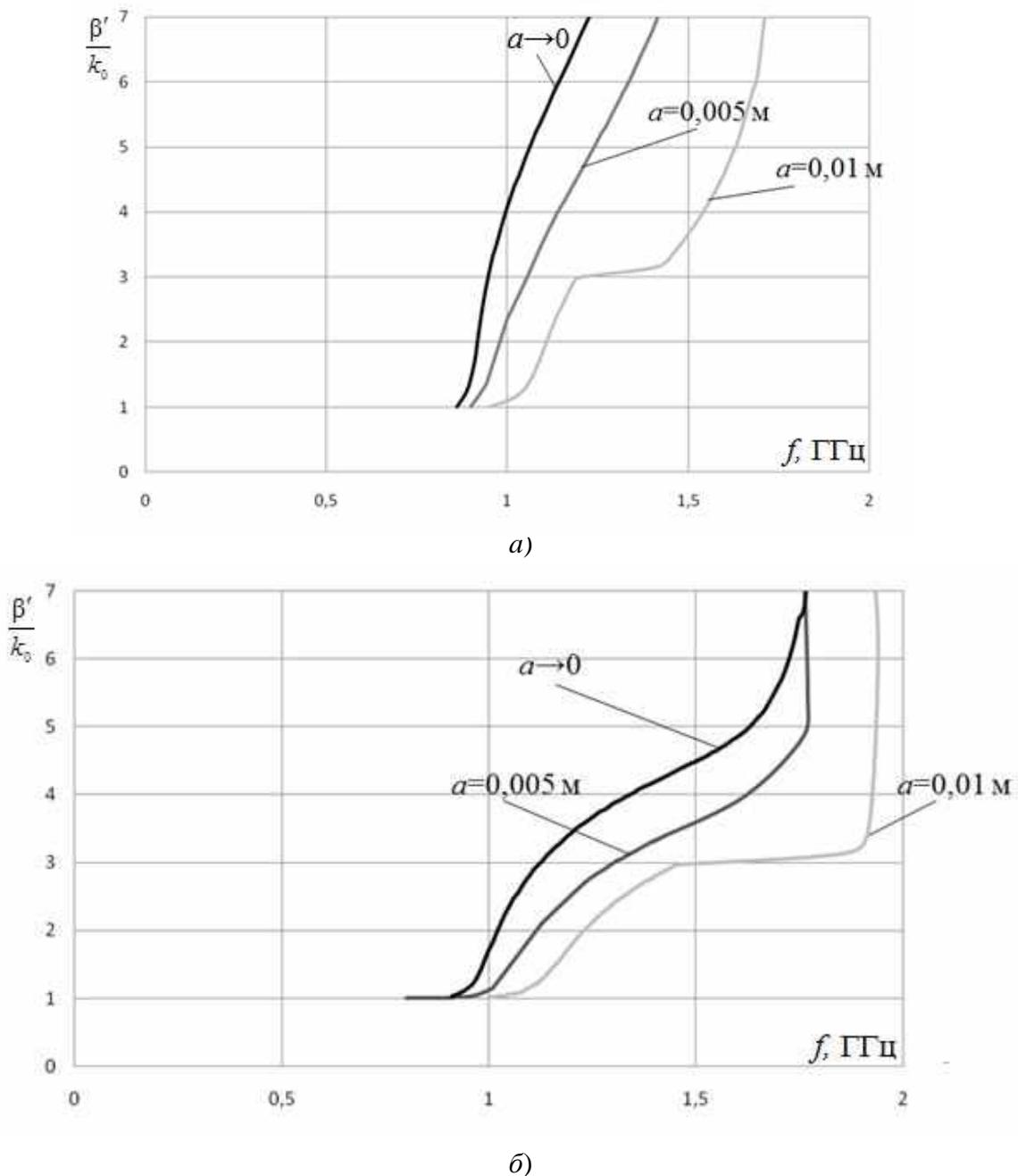


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волн $HE_{11}^{(+)}$ (а) и $HE_{11}^{(-)}$ (б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода без потерь

Из рис. 2 видно, что при увеличении внутреннего радиуса a ферритовой трубки дисперсионная характеристика основной волны исследуемой структуры смещается в более высокочастотную область. При данных значениях a волна $HE_{11}^{(+)}$ обладает нормальной дисперсией, и при стремлении частоты электромагнитного поля к частоте ферромагнитного резонанса слева её дисперсионная характеристика терпит разрыв. Дисперсионные характеристики волны $HE_{11}^{(-)}$ при $a = 0,005$ м и $a = 0,01$ м имеют участки с аномальной дисперсией в резонансной области частот.

Поскольку постоянные распространения азимутально-несимметричных волн с левым $HE_{nm}^{(+)}$ и правым $HE_{nm}^{(-)}$ вращением плоскости поляризации в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе различны, то плоскость поляризации изначально линейно поляризованной волны HE_{nm} , образуемой суперпозицией двух циркулярно поляризованных волн с левым и правым вращением, будет поворачиваться относительно первоначального положения на угол, определяемый по формуле

$$\theta = \frac{\beta^- - \beta^+}{2} L, \quad (1)$$

где β^+ и β^- – продольные волновые числа волн $HE_{nm}^{(+)}$ и $HE_{nm}^{(-)}$ соответственно; L – длина волновода.

На рис. 3 представлены графики зависимости погонного угла поворота плоскости поляризации $\phi = \theta/L$ от частоты для волны HE_{11} волновода без потерь.

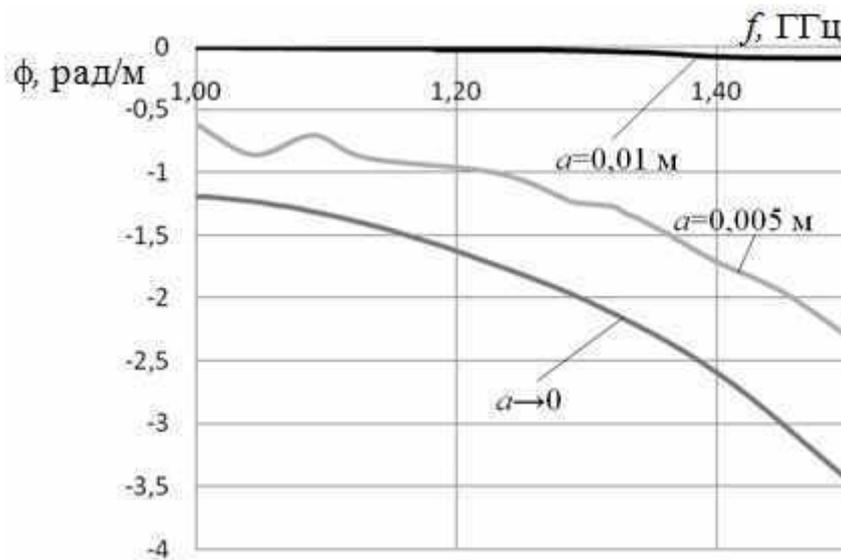


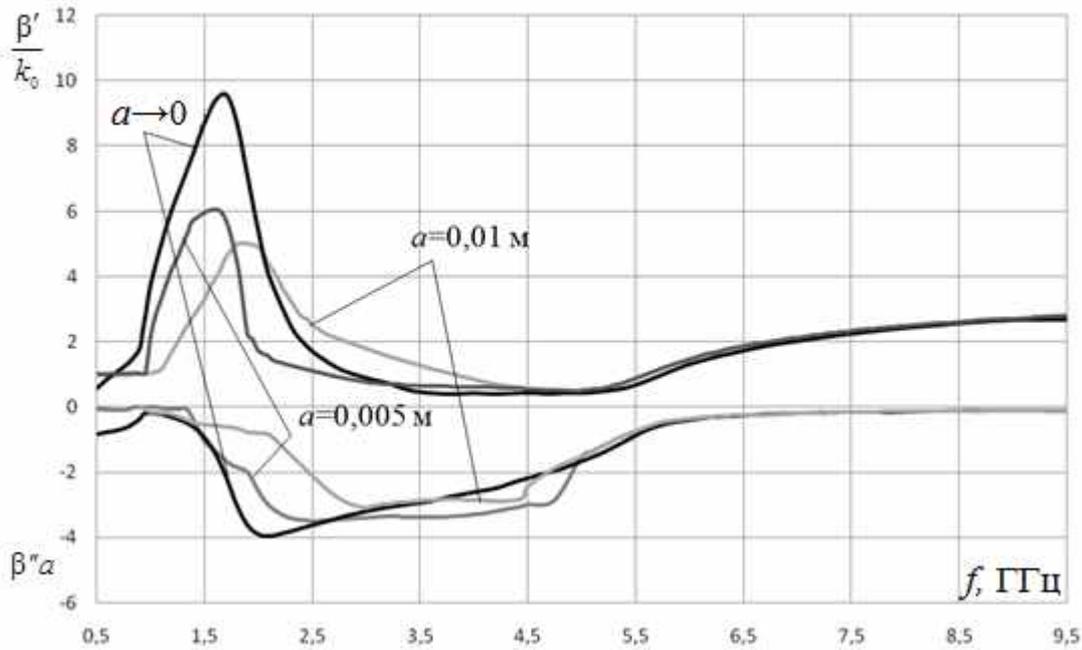
Рис. 3. Зависимость угла ϕ от частоты для волны HE_{11} волновода без потерь

Как видно из рис. 3, при увеличении внутреннего радиуса a трубки угол поворота плоскости поляризации уменьшается. При $a = 0,01$ м угол поворота $\phi \ll 1$ рад.

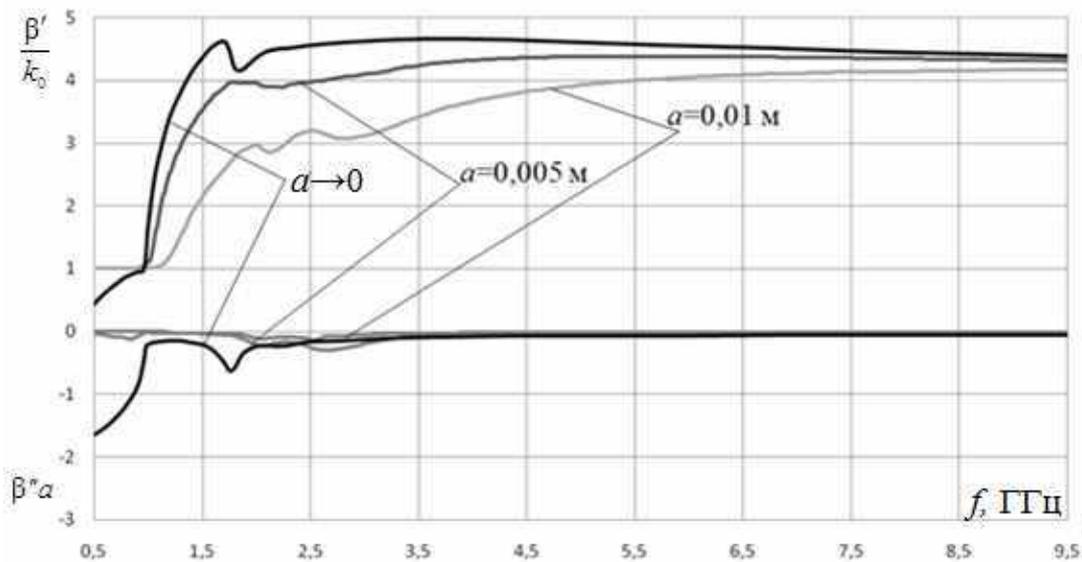
На рис. 4 представлены дисперсионные характеристики волн $HE_{11}^{(+)}$ (рис. 4, а) и $HE_{11}^{(-)}$ (рис. 4, б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода с потерями (ширина кривой ферромагнитного резонанса по половинному уровню $\Delta H = 8$ кА/м).

Из рис. 4, а видно, что при всех рассмотренных значениях a дисперсионные характеристики волны $HE_{11}^{(+)}$ имеют максимум вблизи частоты ферромагнитного резонанса. При

$a = 0,01$ м и $a = 0,005$ м дисперсионные характеристики волны $HE_{11}^{(+)}$ рассматриваемой структуры ведут себя качественно одинаково. При $a \rightarrow 0$ дисперсионная характеристика волны $HE_{11}^{(+)}$ в области низких частот имеет продолжение в виде быстрой собственной волны.



а)



б)

Рис. 4. Дисперсионные характеристики волн $HE_{11}^{(+)}$ (а) и $HE_{11}^{(-)}$ (б) круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода с потерями

Из рис. 4, б видно, что, как и в случае волн с левым вращением поля, при $a \rightarrow 0$ дисперсионная характеристика волны с правым вращением $HE_{11}^{(-)}$ в области низких частот имеет продолжение в виде быстрой собственной волны. При $a = 0,005$ м и $a = 0,01$ м волна

$HE_{11}^{(-)}$ является медленной во всём частотном диапазоне. Из рис. 4 следует, что во всём рассмотренном диапазоне частот при уменьшении внутреннего радиуса a ферритовой трубки коэффициент затухания волн $HE_{11}^{(+)}$ и $HE_{11}^{(-)}$ возрастает.

Поскольку азимутально-несимметричные волны с левой и правой круговой поляризацией имеют различные постоянные распространения и коэффициенты затухания (рис. 4), то при распространении в рассматриваемой структуре изначально линейно поляризованной волны будет происходить изменение её поляризации – волна станет эллиптически поляризованной. При этом большая полуось эллипса будет поворачиваться относительно первоначального направления колебаний на угол θ , определяемый по формуле (1). Эксцентриситет эллипса определяется по формуле

$$e = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}, \quad (2)$$

где $D = A[\exp(\beta''^- L) + \exp(\beta''^+ L)]$ и $d = A|\exp(\beta''^- L) - \exp(\beta''^+ L)|$ – большая и малая полуоси эллипса поляризации; A – амплитуда циркулярно-поляризованной волны на входе волновода; β''^+ и β''^- – мнимые части продольных волновых чисел волн $HE_{11}^{(+)}$ и $HE_{11}^{(-)}$ соответственно.

На рис. 5 представлены графики зависимости погонного угла поворота большой полуоси эллипса поляризации от частоты для волны HE_{11} волновода с потерями.

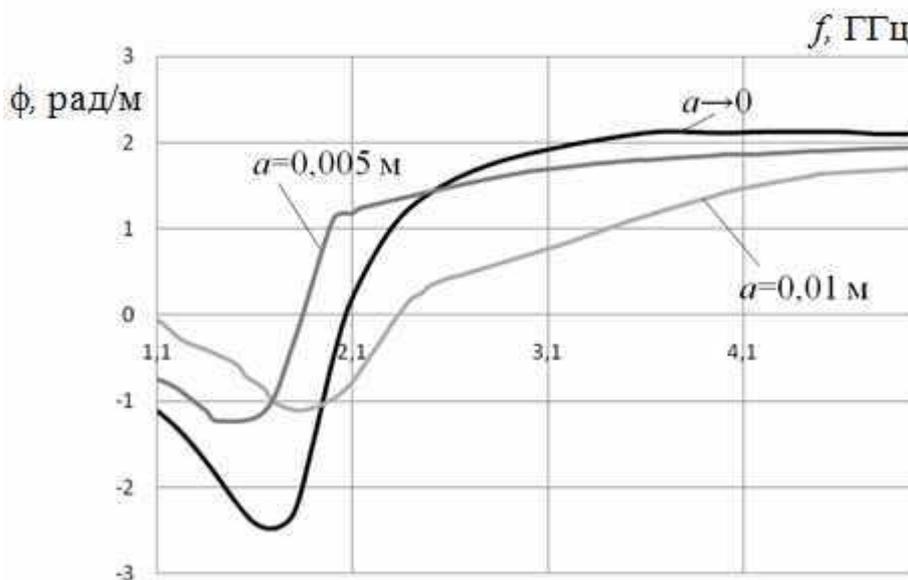


Рис. 5. Зависимость угла ϕ от частоты для волны HE_{11} волновода с потерями

Из рис. 5 следует, что в ферритовой трубке с потерями поворот большой полуоси эллипса поляризации может происходить в различных направлениях в зависимости от частотного диапазона использования структуры. В дальних дорезонансной и зарезонансной областях при увеличении радиуса a угол поворота ϕ уменьшается.

На рис. 6 представлены графики зависимости эксцентриситета эллипса e от частоты для волны HE_{11} волновода с потерями длиной $L = 0,05$ м.

Из рис. 6 видно, что при увеличении радиуса a значение эксцентриситета e стремится к единице. При $a = 0,01$ м в рассмотренном диапазоне частот эксцентриситет изменяется незначительно.

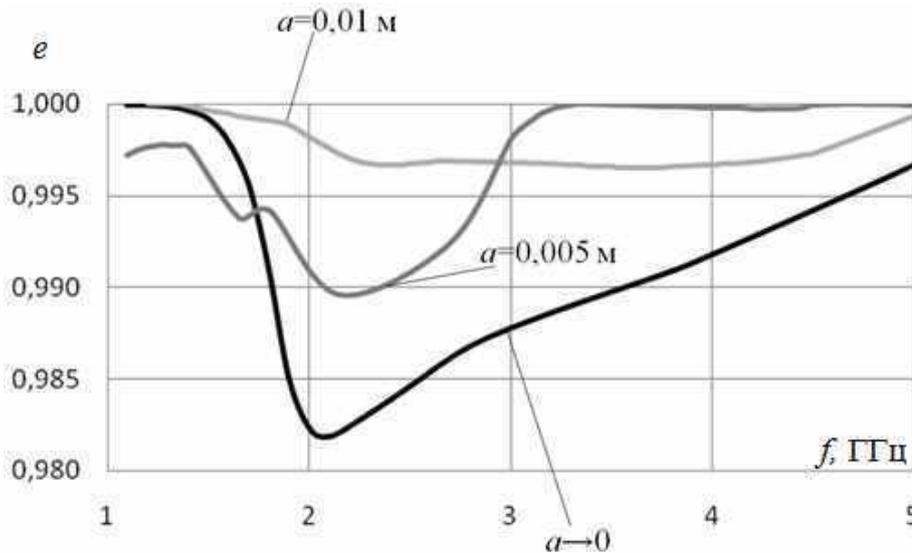


Рис. 6. Зависимость эксцентриситета эллипса поляризации от частоты для волны HE_{11} волновода с потерями

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при отсутствии потерь в ферритовом слое увеличение внутреннего радиуса ферритовой трубки приводит к значительному уменьшению величины погонного угла поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной волны, распространяющейся в волноводе. При наличии потерь в дальней зарезонансной области частот дисперсионные и поляризационные свойства основной волны практически не зависят от величины внутреннего радиуса ферритовой трубки. В случае волновода малой длины ($L = 2,5b$) при всех рассмотренных значениях a эксцентриситет эллипса поляризации волны близок к единице, даже на частотах, близких к частоте ферромагнитного резонанса, поэтому при поступлении на вход такого волновода линейно-поляризованной волны HE_{11} на выходе поляризация последней практически не изменится и будет квазилинейной, а величина угла поворота плоскости поляризации не превысит 7° .

Библиографический список

1. Катин, С.В. Электромагнитные волны в круглом открытом слоистом феррит-диэлектрическом волноводе / С.В. Катин [и др.] // Антенны. 2012. Вып. 8 (183). С. 20–24.
2. Сул, Г. Вопросы волноводного распространения электромагнитных волн в гиротропных средах / Г. Сул, Л. Уолкер. – М.: Иностран. лит-ра, 1955.
3. Веселов, Г.И. Комплексные волны в поперечно-неоднородных направляющих структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. 1987. Т. 42. № 8. С. 64–67.
4. Веселов, Г.И. Слоистые металло-диэлектрические волноводы. / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Раевский, А.С. Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010.
6. Назаров, А.В. Дисперсионные и поляризационные свойства азимутально-несимметричных волн круглого открытого слоистого феррит-диэлектрического волновода / А.В. Назаров, Е.А. Попов, М.С. Рожкова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 3. С. 22–26.

Дата поступления
в редакцию 25.06.2015

A.V. Nazarov¹, E.A. Popov², M.S. Rozhkova¹

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE FILLING PARAMETERS TO THE
DISPERSION AND POLARIZATION CHARACTERISTICS OF FUNDAMENTAL
MODE OF AN OPEN CIRCULAR LAYERED FERRITE-DIELECTRIC WAVEGUIDE**

Scientific research Institute of measuring systems n.a. J. E. Sedakov¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: To investigate the influence of the ferrite tube internal radius influence to the spectral and polarization characteristics of the fundamental mode propagating in an open circular layered ferrite-dielectric waveguide with and without losses.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is based on the standard methodology using method of the partial areas and differential equation contraction method.

Findings: There is significant reducing of the rotation angle of the polarization plane if the internal radius of the ferrite tube without losses is increased. If the waveguide structure with losses is not so long. When the HE_{11} mode with the plane polarization propagates in the structure with losses, the polarization plane is still quasi-linear in the wide frequency band regardless of the internal ferrite tube radius if the length of the structure is not so long.

Research limitations/implications: The results will be used in subsequent works.

Originality/value: Moreover the data can be useful for development of the microwave ferrite devices.

Key words: ferrite-dielectric waveguide, dispersion characteristic, surface mode, polarization of the electro-magnetic field.

УДК 621.039

А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.М. Илютина, И.В. Каратушина,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена исследованию влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Актуальность работы вызвана стремлением повысить конкурентоспособность отечественных тепловыделяющих сборок на мировом рынке для реакторных установок западного дизайна. Кратко описаны стенд и экспериментальная модель, представлены методики проведения исследований и обоснована представительность проводимых экспериментов. Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных поячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

Введение

На сегодняшний день потенциал России по созданию ядерного топлива отечественного дизайна составляет 17% мирового рынка топлива. Это 76 энергетических реакторов в России и 14 в других странах мира (Финляндия, Болгария, Венгрия, Словакия, Чехия, Украина, Армения и Китай). Однако более 80% мирового рынка энергетических реакторов используют конструкцию топлива так называемого квадратного сечения. Поэтому дальнейшее увеличение доли присутствия России на рынке мирового ядерного топлива связано с созданием и экспортом отечественных разработок топлива западного дизайна за рубеж.

Для достижения поставленной цели по заданию топливной компании «ТВЭЛ» АО «ОКБМ Африкантов» была разработана конструкция тепловыделяющей сборки квадратного сечения (ТВС–Квадрат), ориентированная на западный рынок потребителей ядерного топлива. В основе конструкции ТВС–Квадрат специалистами АО «ОКБМ Африкантов» были использованы апробированные решения по каркасу и дистанционирующим решеткам, получившие распространение для ТВС реакторов ВВЭР. Так же в конструкции ТВС-Квадрат предусмотрено наличие перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и дополнительно устанавливаемых перемешивающих решеток, которые имеют дефлекторы, выступающие в роли турбулизаторов потока теплоносителя и интенсификаторов теплообмена. Использование подобных элементов направлено на решение ряда вопросов, а именно: снизить неравномерности теплогидравлических характеристик теплоносителя; выровнять температуру (энтальпию) теплоносителя по поперечному сечению сборки; повысить запас до кризиса теплоотдачи. Благодаря этому становится возможным повышение критического теплового потока в активной зоне и, следовательно, увеличение удельной тепловой мощности реактора.

В ТВС–Квадрат реакторов PWR применяются пластинчатые решетки, снабженные дефлекторами типа split vane, позволяющими одновременно создать круговые поперечные течения теплоносителя вокруг ТВЭЛов и закрутку потока в межТВЭльном пространстве. Особое внимание следует уделить профилю дефлекторов и выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения теплоносителя, так как эти факторы в значительной степени

влияют на гидравлическое сопротивление сборки. Таким образом, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС–Квадрат требуют поиска оптимального конструктивного решения, которое благоприятнейшим образом сказывалось на сочетании таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Оценка влияния перемешивающих устройств на критические потоки тепла возможна только на теплофизических стендах при натуральных условиях течения теплоносителя, а изучение гидродинамики сборок ТВЭЛов и активных зон реакторов целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет на аэро- и гидродинамических стендах [1, 2]. Поэтому экспериментальное исследование закономерностей формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках ТВЭЛов ТВС–Квадрат при использовании перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой позволяет обосновать теплотехническую надежность активных зон реакторов PWR.

Описание экспериментального стенда

Для определения влияния перемешивающих дистанционирующих решеток на поток теплоносителя в ТВС–Квадрат на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан экспериментальный стенд [3, 4]. Он представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1). Организация течения теплоносителя следующая: воздух посредством радиального вентилятора высокого давления 5 нагнетается в ресиверную емкость 6 и далее, пройдя расходомерный коллектор 4 и экспериментальную модель 3, выбрасывается в атмосферу. Для измерения перепадов давлений по длине ЭМ 2, а так же вектора скорости за дефлекторами ПДР разработан измерительный комплекс, в состав которого входит: пятиканальный пневмометрический зонд 1; блок аналоговых преобразователей давления 8; координатное устройство; базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A 9; ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением 10.

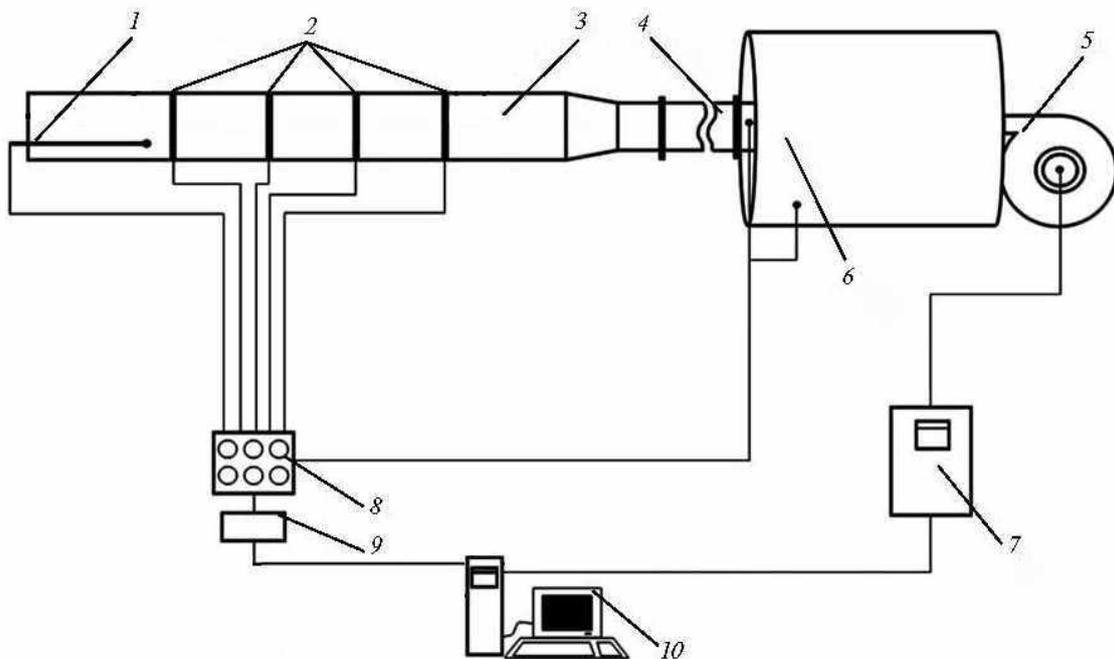


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – пятиканальный пневмометрический зонд; 2 – статические отборы;
3 – экспериментальная модель; 4 – участок стабилизации потока; 5 – вентилятор высокого давления;
6 – ресиверная емкость; 7 – преобразователь частоты; 8 – датчики давления; 9 – базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 10 – ЭВМ

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда, представляет собой масштабный фрагмент ТВС-Квадрат реактора типа PWR, выполненный в полном геометрическом подобии натурной ТВС [5]. Коэффициентом геометрического подобия $K_T = 4,2$. ЭМ состоит из сорока пяти цилиндрических ТВЭЛ-имитаторов, четырех имитаторов направляющего канала, поясов перемешивающих и дистанционирующих решеток.

Исследуемые пояса ПДР представляют собой пластинчатые решетки, состоящие из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования ТВЭЛ-имитаторов. К верхним кромкам пластин в местах их пересечения приваривались дефлекторы различного конструктивного исполнения.

В работе рассматривались три варианта дефлекторов типа split vane:

1) первоначальный вариант дефлектора высотой 9 мм, углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины (9/25) (рис. 2, 1);

2) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/8/15) (рис. 2, 2);

3) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к ТВЭЛу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/21/15) (рис. 2, 3).

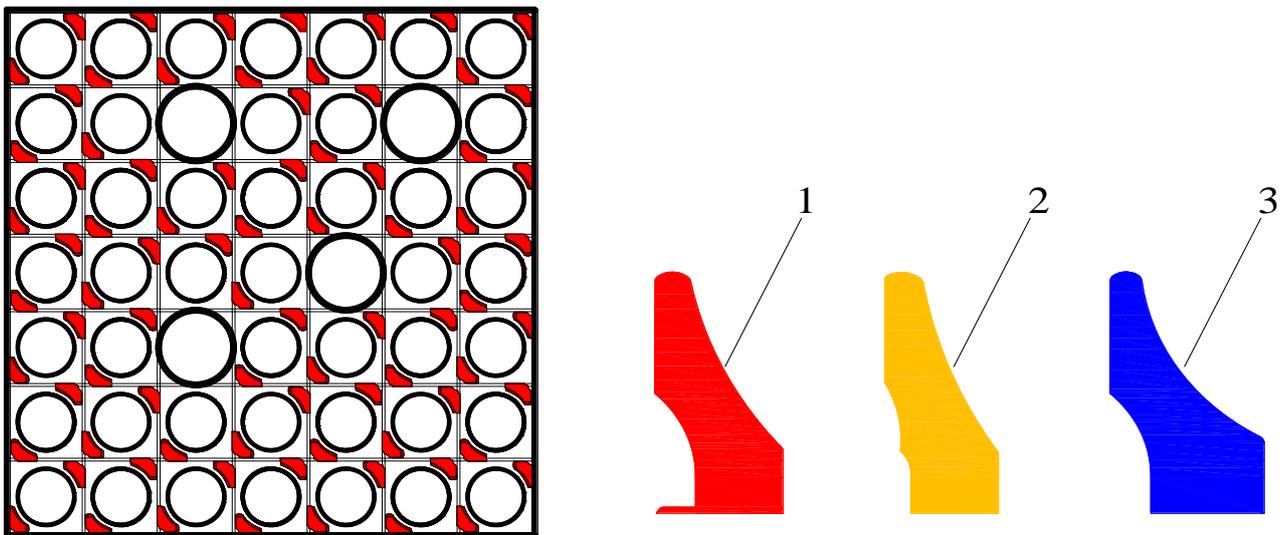


Рис. 2. Перемешивающая дистанционирующая решетка фрагмента ТВС – Квадрат:
тип дефлектора: 1 – прямой гиб; 2 – косой гиб; 3 – обратный гиб

Измерительный комплекс

Для измерения вектора скорости, а также давления в пространственном потоке использовался пятиканальный пневмометрический зонд с конической чувствительной частью, имеющий пять приемных отверстий [6, 7]. Относительная погрешность измерения проекций вектора скорости W_x , W_y , W_z с учетом предварительной тарировки в аэродинамической трубе с заранее известной среднерасходной скоростью, соответствующей скорости на входе в ЭМ, составила 2, 2, 2,5% соответственно.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления, представляющего собой набор преобразователей избыточного давления и разности давлений. Предел допускаемой основной погрешности составляет $\pm 0,25\%$.

Обоснование представительности проводимых исследований

Важным этапом любых исследований является подтверждение их представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса достигает $4,5 \cdot 10^5$, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в экспериментальной модели моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, включающем в себя кинематическое и геометрическое подобие, то в области автомодельности профиль относительной скорости ($W_{лок}/W_{ср.расх}$) остается неизменным [8]. Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС-Квадрат. Соответственно для обоснования представительности исследований были проведены эксперименты по определению участков гидродинамической стабилизации потока [5] и границ зон автомодельного течения.

Начало зоны автомодельного течения воздуха в ЭМ было определено на основе результатов измерения гидравлического сопротивления поясов ПДР с различными типами дефлекторов. На рис. 3 приведена иллюстрация массива точек коэффициента гидравлического сопротивления ПДР ЭМ в зависимости от числа Re . Из рис. 3 видно, что переходная область турбулентного течения наблюдается при числах Re до $7 \cdot 10^4$, при числах Re свыше $7 \cdot 10^4$ наступает область автомодельного течения теплоносителя. Необходимость данных исследований вызвана тем, что для обоснования представительности проводимых исследований необходимо равенство коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) ПДР ЭМ и ПДР натуральных ТВС-Квадрат.

Анализ результатов исследования коэффициентов гидравлического сопротивления показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ в области автомодельного течения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат реактора PWR. Кроме того, методики экспериментальных исследований были апробированы для подтверждения достоверности результатов, определена погрешность измеряемых величин. Погрешности аксиальной составляющей скорости, вычисленные сравнением расходов воздуха на входе в модель и по ячейкам, не превышала 5%.

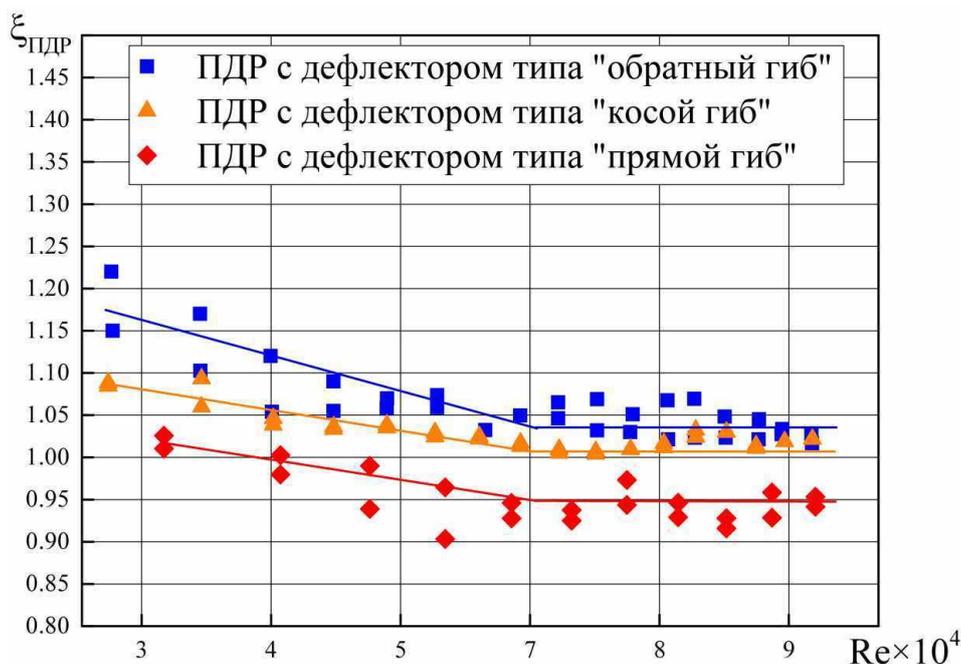


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ от числа Re

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ЭМ за перемешивающей решеткой заключались в измерении модуля и направления вектора скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке пучка стержней. Поэтому условно поперечное сечение ЭМ было разбито на ячейки, каждой из которых был присвоен свой порядковый номер. В качестве характерной ячейки для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на поток теплоносителя была выбрана регулярная ячейка. Контур и границы регулярной ячейки представлен на рис. 4. Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР регулярная ячейка была разделена на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости измерялся в 15-ти сечениях по длине модели (рис. 4).

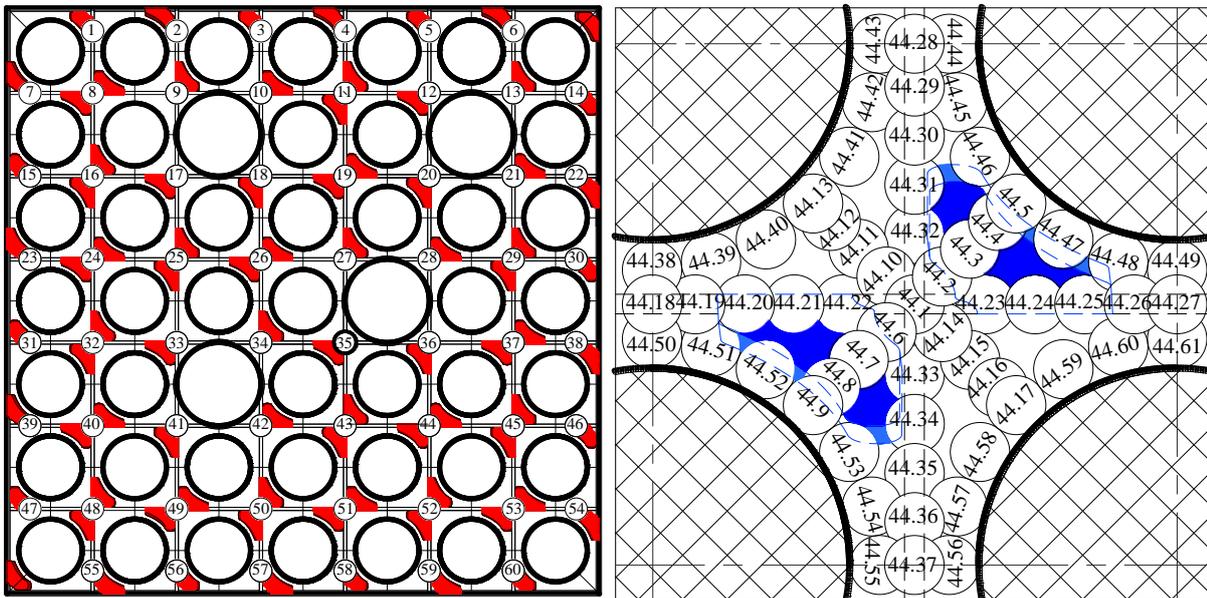


Рис. 4. Расположение зон измерений гидродинамических характеристик в поперечном сечении модели ЭМ

Результаты исследований

На основе результатов измерения вектора скорости за ПДР в стандартной ячейке (рис. 5 – рис. 7) ТВС–Квадрат сделаны следующие выводы:

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии $\Delta l/d_r=3-5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб» и на расстоянии $\Delta l/d_r=10-12$ за дефлекторами типа «прямой гиб».

2. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $\Delta l/d_r=14\div 15$, а за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии $\Delta l/d_r=24$.

Ввиду этого экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС-Квадрат с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» показали, что на интенсивность межъячейкового обмена, помимо угла отгиба, влияет площадь профиля дефлектора, которая перекрывает проходное сечение ячеек ТВС, а на структуру и форму вихря в центре ячейки ключевое влияние оказывает линиягиба дефлектора.

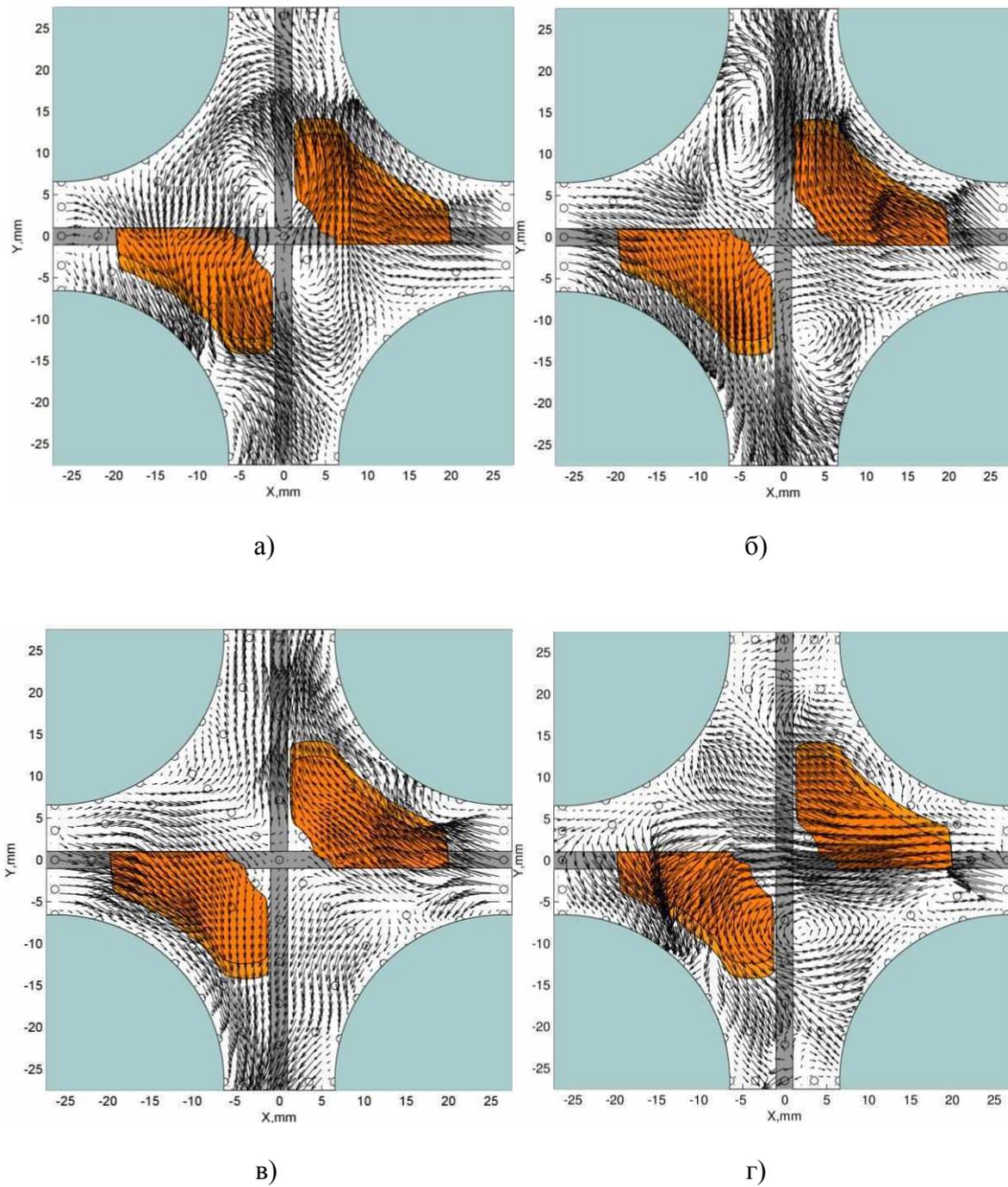


Рис. 5. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» в стандартной ячейке:
a – $\Delta L/D_x=1,3$; *б* – $\Delta L/D_x=2,6$; *в* – $\Delta L/D_x=5,2$; *г* – $\Delta L/D_x=14,0$ ($\bar{W} = 41,46$ м/с, $Re = 105100$)

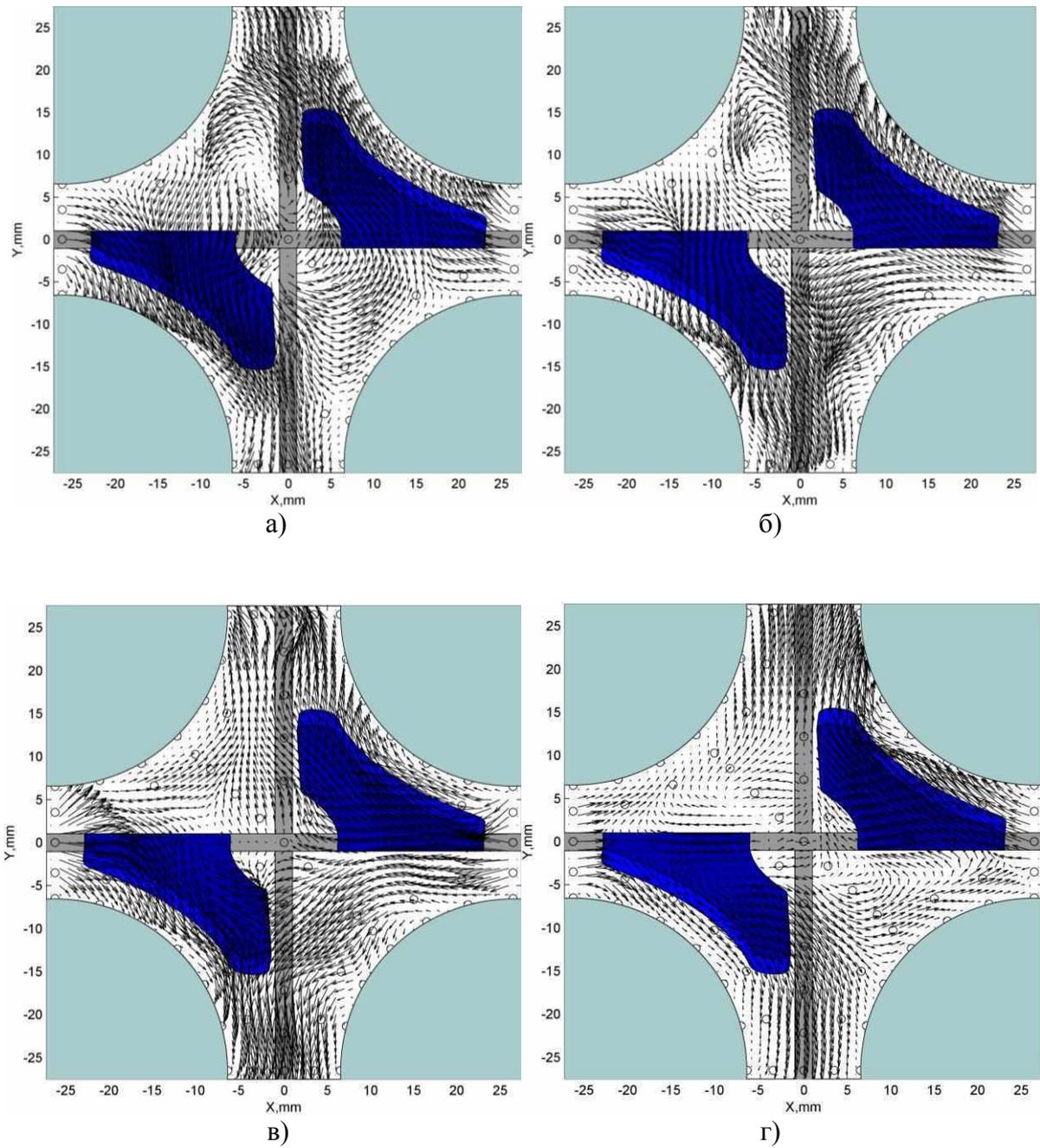


Рис. 6. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» в стандартной ячейке:
a – $\Delta L/D_x=1,3$; *б* – $\Delta L/D_x=2,6$; *в* – $\Delta L/D_x=5,2$; *г* – $\Delta L/D_x=23,6$ ($\bar{W} = 37,74$ м/с, $Re = 95670$)

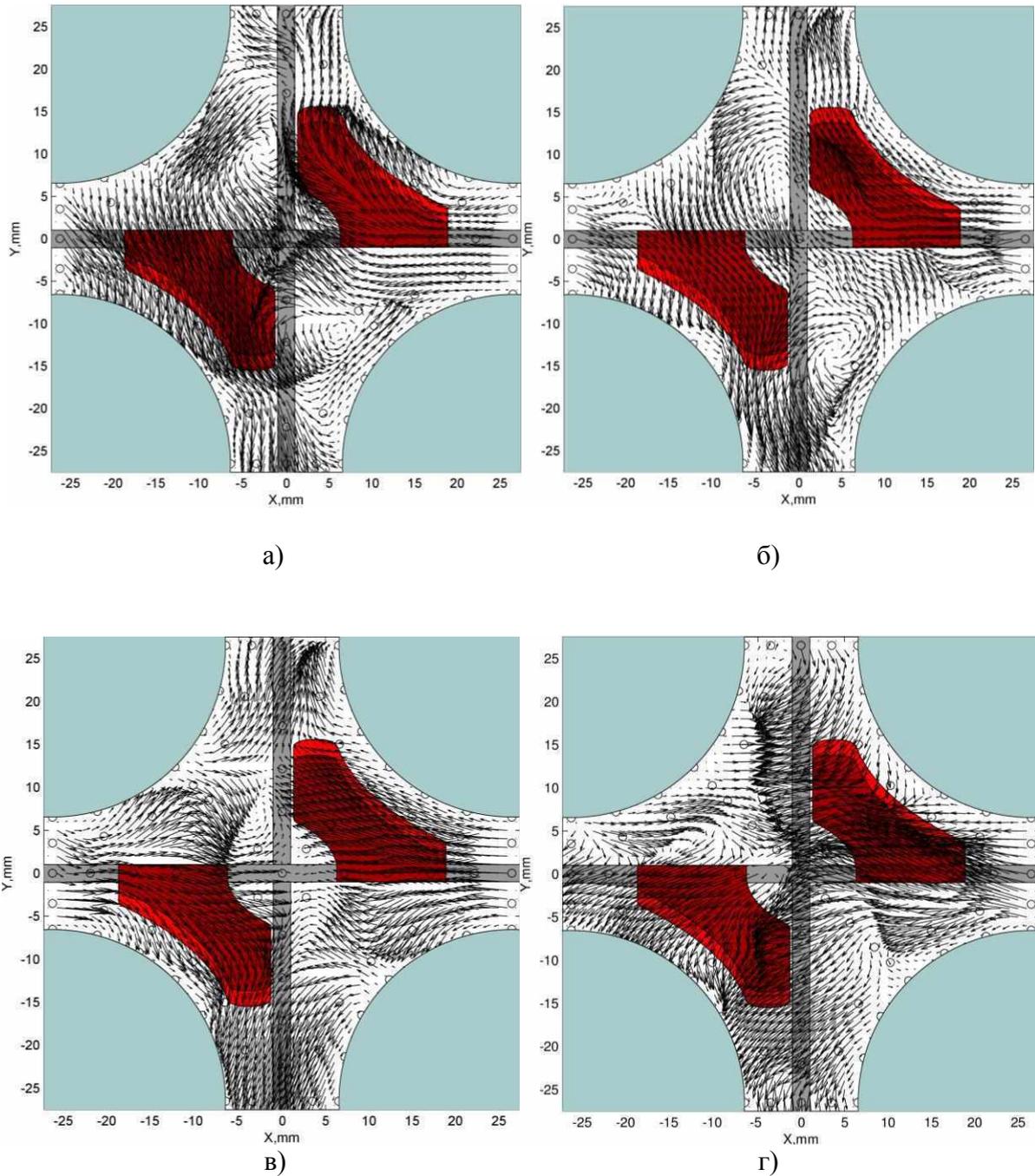


Рис. 7. Векторные поля за ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» в стандартной ячейке:

a – $\Delta L/D_x=1,3$; *б* – $\Delta L/D_x=2,6$; *в* – $\Delta L/D_x=5,2$; *г* – $\Delta L/D_x=14,0$ ($\bar{W} = 37,90$ м/с, $Re = 96080$)

Выводы

1. Проведены комплексные исследования, определены локальные гидродинамические характеристики потока теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС–Квадрат реактора PWR. По результатам исследований были выявлены следующие закономерности течения теплоносителя в ТВС–Квадрат:

- перемешивающая дистанционирующая решетка вносит возмущения в поток теплоносителя. При этом возмущения в основном генерируются дефлекторами решетки, которые создают конвективные турбулентные течения. Интенсивность и направленность конвективных течений определяются профилем и ориентацией

дефлекторов относительно осевого направления движения теплоносителя. Наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, что быстро уменьшает интенсивность поперечных конвективных течений, создаваемых дефлекторами решетки, но при этом сама исследуемая решетка создает достаточно высокую интенсивность перемешивания;

- за любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии $\Delta l/d_T = 3 - 5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии $\Delta l/d_T = 10 - 12$ за дефлекторами типа «прямой гиб»;
- затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $\Delta l/d_T = 14 - 15$, а за ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 24$.

2. Экспериментально определен в области автомодельного течения коэффициент гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС–Квадрат с различными типами дефлекторов:

- КГС ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» – 0,95;
- КГС ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» – 1,01;
- КГС ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» – 1,04.

3. Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС–Квадрат с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» показали, что на интенсивность межъячейкового обмена, помимо угла отгиба, влияет площадь профиля дефлектора, которая перекрывает проходное сечение ячеек ТВС, а на структуру и форму вихря в центре ячейки ключевое влияние оказывает линиягиба дефлектора. При этом следует отметить, что наибольшая длина затухания гидродинамических характеристик отмечается за дефлекторами типа «обратный гиб».

Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных ячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. № 218)

Библиографический список

1. **Балыбердин, А.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР / А.С. Балыбердин [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 1. С. 42-48.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 252–256.
3. **Варенцов, А.В.** Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 1 (94). С. 107–113.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов типа PWR. / С.М. Дмитриев [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 751–753.
5. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27.
6. **Бородин, С.С.** Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими

- вающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2015. № 4. С. 177–182.
7. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования поля скорости потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР и ВБЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 113–118.
 8. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1973.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

**A. V. Varentsov, E. M. Plutina, I. V. Caratushina,
D.V. Doronkov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov**

FEATURES OF THE FLOW INSIDE TVS-KVADRAT PWR REACTOR WITH STAGED MIXING SPACER DECI-CURRENT WITH VARIOUS TYPES OF BAFFLES

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

Subject, theme, aim of study:The article is dedicated to research of local hydrodynamics of coolant in FA Kvadrat-type of PWR at fitted spacer mixing grids with different type of deflectors.

Method and methodology study performance:Experimental researches of local hydrodynamic characteristics of coolant flow in EM (experimental model) behind mixing grid consisted in measurement of velocity vector module, total pressure and static pressure by means of fivechannel pneumatic probe into a bunch of fuel rods of EM.

Results and their application field:The obtained experimental information has been generalized. And a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations of the PWR reactor core containing Kvadrat FAs aimed at estimating the reactor core thermal reliability has been established.

Conclusions:Based on the researches findings constructions of type of deflectors under investigation have been analysed and main factors of influence different deflectors of mixing grid on coolant flow in FA Kvadrat-type of PWR have been elicited.

Key words: nuclear reactor, a fuel Assembly, fluid flow heat carrier, mixing spacer grid.

УДК 621.039

В.А. Фарафонов, А.В. Зинин, Е.И. Семёнова, А.В. Комаров

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ТВЭЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР. СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЛЬЦЕВЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложен метод значительного увеличения удельной мощности реакторной установки при одновременном повышении уровня безопасности, который заключается в использовании кольцевых тепловыделяющих элементов. Также представлены преимущества и недостатки кольцевых тепловыделяющих элементов перед традиционными тепловыделяющими сборками.

Ключевые слова: мощность, температура, топливо, теплоноситель, энтальпия, безопасность.

Введение

Последние достижения в области разработки и производства материалов оболочек ТВЭЛОВ и ядерного топлива позволяют реализовать эффективный метод значительного увеличения (до 50%) удельной мощности реакторной установки при одновременном повышении уровня безопасности. Он заключается в использовании кольцевых ТВЭЛОВ, в которых теплосъем осуществляется как с внешней, так и внутренней теплоотдающих поверхностей, причем теплоноситель внутри ТВЭЛА и снаружи движется в одном направлении. Так же применение кольцевых ТВЭЛОВ позволяет существенно снизить максимальную температуру топлива (более чем на 1000 °С при увеличенной до 150% мощности РУ). Температура топлива уменьшается, так как более двух раз снижается толщина топливного слоя, кроме того, теплопроводность UO₂ при снижении температуры растет; снизить энтальпию (запасенную энергию) топлива более двух раз, что повышает безопасность РУ при авариях с потерей теплоносителя и таким образом появляется возможность оптимизации (уменьшения стоимости) систем безопасности.

Наконец, первичный термомеханический анализ показывает существенное улучшение вибрационных характеристик ТВС. Это повышает долговечность конструкции активной зоны, что особенно важно в условиях увеличения расхода теплоносителя через активную зону (до 50%), аналогично росту мощности.



Рис. 1. Конструкция кольцевого и стержневого ТВЭЛ

Однако есть ряд проблем применения ТВЭЛОВ подобной конструкции. Необходимо определить запасы до кризиса кипения на внешней и внутренней поверхностях теплообмена.

Оптимизация ТВС должна быть направлена на выравнивание этих запасов, при этом величина запаса должна превышать значение 40%. При определении запасов следует учитывать неравномерность энерговыделения в активной зоне по высоте и радиусу. Кроме того, в процессе эксплуатации за счет разбухания и теплового расширения топлива изменяются толщины газовых кольцевых зазоров – внешний газовый зазор уменьшается, внутренний увеличивается. Это сопровождается перераспределением тепловых потоков, возрастает доля тепла, отводимого с внешней поверхности.

На рис. 1 схематично представлена конструкция кольцевого и стержневого ТВЭЛов.

Расчет кольцевого тепловыделяющего элемента реактора ВВЭР

Целью данного расчета является определение тепловой мощности кольцевого ТВЭЛа для реактора ВВЭР и сравнение ее с мощностью стержневого топливного элемента. В ходе расчета определяется распределение тепловых потоков и температур по высоте ТВЭЛа, устанавливается максимально допустимая температура топлива, проводится расчет коэффициентов запаса до кризиса теплообмена, в том числе максимально нагруженных топливных элементов. В завершении проводится расчет тепловой мощности ТВС с кольцевыми ТВЭЛами и проводится сравнение с классической ТВС со стержневыми при условии их равного объема при постановке в корпус серийного реактора установки ВВЭР-1000.

Исходные данные и методика расчета

Все расчетные параметры – тепловые потоки, температуры, параметры теплоносителя – определяются для усредненного по активной зоне и максимально нагруженного ТВЭЛа; последние из таких обозначаются индексом max. Расчет проводится для девяти точек по высоте активной зоны с координатами $z = -1,75; -1,50; -1,00; -0,50; 0,00; 0,50; 1,00; 1,50; 1,75$ м. На небольшом участке теплопередающей поверхности возможно поверхностное кипение теплоносителя, но ввиду того, что зона кипения в водо-водяных реакторах обычно мала, это явление не учитывается. Результаты расчета сведены в таблицы и представлены графически.

Приведем основные характеристики реактора, используемые в расчете:

Активная зона

Тепловая мощность реактора,

рассчитанная итерационным методом..... $Q_T = 4300$ МВт

Высота активной зоны..... $H_0 = 3,5$ м

Экстраполированная добавка к размерам зоны... $\delta = 0,08$ м

Теплоноситель

Среднее давление в активной зоне..... $p = 16$ МПа

Температура воды на входе в реактор..... $T_{вх} = 563$ К

Температура воды на выходе из реактора..... $T_{вых} = 595$ К

Геометрические характеристики ТВС

Материал оболочек ТВЭЛ Циркониевый сплав Э110

Ядерное топливо..... Диоксид урана (UO₂)

Расположение ТВЭЛов в решетке (упаковка).. Треугольное

Доля энерговыделения в ТВЭЛе..... $\kappa = 0,94$

Количество ТВС: $n_{ТВС} = 163$

Количество ТВЭЛ:..... $n_{ТВЭЛ} = 217$.

В табл. 1 и 2 представлены параметры, необходимые для расчетов.

Таблица 1

Параметры теплоносителя

Параметр		Т/Н
Температура насыщения	T_s, K	620,507
Теплота парообразования	$r, \text{кДж/кг}$	$9,311 \cdot 10^5$
Теплоемкость	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$9,473 \cdot 10^3$
Удельная энтальпия	$h_{уд}, 10^6 \text{ Дж/кг}$	1,65
Температура средняя	$T_{сред}, \text{K}$	579
Плотность	$\rho, \text{кг/м}^3$	715,128
Удельный объем	$\nu, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	0,0014
Энтальпия входа	$h_{вх}, \text{кДж/кг}$	1,283
Энтальпия выхода	$h_{вых}, \text{кДж/кг}$	1,463
Энтальпия средняя	$h_{ср}, \text{кДж/кг}$	1,369
Теплопроводность	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	0,55
Число Прандтля	Pr	1,435
Динамическая вязкость жид-	$\mu_f, 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$	8,641
Динамическая вязкость стен	$\mu_w, 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$	7,997
Кинематическая вязкость	$\nu, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1,208

Таблица 2

Геометрические параметры ТВЭЛ и ТВС

Параметр	Значение
Размер «под ключ»	$H_{ТВС} = 0.238 \text{ м}$
Шаг решетки	$\chi = 1.1$
Наружный диаметр оболочки ТВЭЛа	$d_2 = 0.015 \text{ м}$
Толщина газовой прослойки	$\delta_r = 0.00005 \text{ м}$
Толщина оболочки ТВЭЛа	$\delta_{об} = 0.0006 \text{ м}$
Диаметр внутренней оболочки	$d_1 = 0.008 \text{ м}$

Теплогидравлический расчет кольцевого ТВЭЛа для реактора ВВЭР [1],[2],[3]

Расчет геометрических характеристик кольцевого ТВЭЛа

Шаг решетки

$$h_{ТВЭЛ} = d_2^{ТВЭЛ} \cdot \chi = 0,017 \text{ м.}$$

Внутренний радиус ТВЭЛа

$$r_1 = \frac{d_1^{ТВЭЛ}}{2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Наружный радиус ТВЭЛа

$$r_2 = \frac{d_2^{\text{ТВЭЛ}}}{2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для расчета используем следующие формулы,
Внутренний и наружный диаметр наружной и внутренней оболочки соответственно:

$$d_{1,2}^{\text{ВН}} = d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - 2 \cdot 2\delta_{\text{об}}. \quad (1)$$

Радиус оболочки ТВЭЛа

$$r_{1,2}^{\text{ВН}} = \frac{d_{1,2}^{\text{ВН}}}{2}.$$

Наружный и внутренний диаметр сердечника

$$d_{1,2}^{\text{сер}} = d_{1,2}^{\text{ВН}} - 2\delta_r. \quad (2)$$

Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛе

$$d_2^{\text{зазор}} = 0,5(d_2^{\text{ВН}} + d_2^{\text{сер}}). \quad (3)$$

Площадь ячейки ТВС

$$f_{\text{яч}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H_{\text{ТВС}}}{2} \right)^2. \quad (4)$$

Площадь, занимаемая ТВЭЛом, полый трубкой, нк,

$$f_{\text{пол}} = \frac{\pi}{4} \left(n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \left(d_2^{\text{ТВЭЛ}^2} - d_1^{\text{ТВЭЛ}^2} \right) + n_{\text{нк}} d_{\text{нк}}^2 + n_{\text{тр}} d_{\text{тр}}^2 \right), \quad (5)$$

где $n_{\text{нк}}$ – количество направляющих каналов; $d_{\text{нк}}^2$ – диаметр направляющего канала;
 $n_{\text{тр}} = 1$, $d_{\text{тр}} = 0,016$ м.

Площадь прохода теплоносителя в ТВС снаружи и внутри ТВЭЛа:

$$f_{\text{прох}} = f_{\text{яч}} - f_{\text{пол}}, \quad (6)$$

$$f_{\text{прох1}} = f_{\text{прох}} - f_{\text{прох2}}, \quad (7)$$

$$f_{\text{прох2}} = f_{\text{прох}} - n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^{\text{ТВЭЛ}^2}. \quad (8)$$

Коэффициент разделения потоков снаружи и внутри ТВЭЛа:

$$u_2 = \frac{f_{\text{прох2}}}{f_{\text{прох}}} \quad u_1 = \frac{f_{\text{прох1}}}{f_{\text{прох}}}. \quad (9)$$

....

Таблица 3

Расчетные геометрические характеристики

Название параметра	Обозначение	Результат
1	2	3
Наружный диаметр внутренней оболочки	$d_1^{\text{ВН}}$, мм	9,2
Внутренний диаметр наружной оболочки	$d_2^{\text{ВН}}$, мм	13,8

Окончание табл. 3

1	2	3
Наружный радиус внутренней оболочки	r_1^{BH} , мм	4,6
Внутренний радиус наружной оболочки	r_2^{BH} , мм	6,9
Внутренний диаметр топливного сердечника	d_1^{cep} , мм	9,3
Наружный диаметр топливного сердечника	d_2^{cep} , мм	13,7
Наружный радиус топливного сердечника	$r_2^{\text{UO}_2}$, мм	6,85
Внутренний радиус топливного сердечника	$r_1^{\text{UO}_2}$, мм	4,65
Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛ для наружной оболочки	$d_2^{\text{зазор}}$, мм	13,75
Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛ для внутренней оболочки, мм	$d_1^{\text{зазор}}$, мм	9,25
Площадь ячейки ТВС	$f_{\text{яч}}$, м ²	0,048
Площадь прохода т/н в ТВС	$f_{\text{прох}}$, м ²	0,02491
Площадь прохода т/н в ТВС снаружи ТВЭЛа	$f_{\text{прох1}}$, м ²	0,01
Площадь прохода т/н в ТВС снаружи ТВЭЛа	$f_{\text{прох2}}$, м ²	0,015
Коэффициент разделения потоков снаружи ТВЭЛа	u_1	0,412
Коэффициент разделения потоков внутри ТВЭЛа	u_2	0,588

Расчет коэффициентов теплоотдачи

Расход теплоносителя через активную зону, ТВС, ТВЭЛ равен:

$$G_{\text{AZ}} = \frac{Q}{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}} = 2,386 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (10)$$

$$G_{\text{ТВС}} = \frac{G_{\text{AZ}}}{n_{\text{ТВС}}} = 146,383 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (11)$$

$$G_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{G_{\text{ТВС}}}{n_{\text{ТВЭЛ}}} = 8,217 \frac{\text{М}}{\text{с}}. \quad (12)$$

Скорость движения теплоносителя

$$\omega = \frac{G_{\text{ТВС}}}{f_{\text{прох}} \cdot \rho} = 146,383 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (13)$$

Расход теплоносителя через внутреннюю и наружную стороны:

$$G_{1,2} = G_{\text{ТВЭЛ}} \cdot u_{1,2}, G_1 = 0,295 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; G_2 = 0,422 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (14)$$

$$C_t = \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11} = 1,009.$$

Для внутреннего и наружного диаметра эквивалентный диаметр ТВЭЛа

$$d_{2\text{экв}} = d_2^{\text{ТВЭЛ}} \cdot (1,103 \cdot \chi^2 - 1) = 5,689 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (15)$$

Используя критерии Рейнольдса и Нуссельта, находим коэффициент теплоотдачи:

- для наружного диаметра оболочки ТВЭЛ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$:

$$\alpha_2 = A \frac{\lambda}{d_{2\text{экв}}} \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}, \quad (16)$$

где $A = 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91 \cdot \chi^{-2}) \cdot \chi^{0,15} = 0,0215$; $\text{Re}_2^{0,8}$ – число Рейнольдса; $\text{Pr}^{0,4}$ – критерий Прандтля. Число Рейнольдса для наружной стороны

$$\text{Re}_2 = \frac{w \cdot d_{2\text{экв}}}{\nu} = 2,717 \cdot 10^5; \quad (17)$$

- для внутреннего диаметра, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$,

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_1 \cdot \lambda}{d^{\text{ТВЭЛ}}_1}, \quad (18)$$

где число Нуссельта для внутренней стенки

$$\text{Nu}_1 = 0,023 \cdot \text{Re}_1^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t = 769,698; \quad (19)$$

число Рейнольдса для внутренней стороны

$$\text{Re}_1 = \frac{w \cdot d_1^{\text{ТВЭЛ}}}{\nu} = 4,776 \cdot 10^5, \quad (20)$$

λ – коэффициент теплопроводности для внутренней стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$.

Получаем

$$\alpha_2 = 5,981 \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}; \quad \alpha_1 = 5,87 \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Эффективные коэффициенты теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$,

$$\frac{1}{\alpha_{1,2\text{эфф}} d_{1,2}^{\text{сее}}} = \frac{1}{\alpha_{1,2} (d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{корп}})} + \frac{1}{2\lambda_{Zr}} \cdot \ln\left(\frac{d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}}}{d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - \delta_{\text{корп}}}\right) + \frac{\delta}{\lambda_{Ar} d_{1,2}}, \quad (21)$$

где $\lambda_{Zr} = 21,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $\lambda_{Ar} = 0,0385 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$.

Из полученной зависимости (20) следует, что эффективный коэффициент теплоотдачи для наружного диаметра $\alpha_{1\text{эфф}} = 742,831 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Аналогично для внутреннего диаметра

$$\alpha_{2\text{эфф}} = 755,384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Расчет сечения с максимальной температурой и объёмного тепловыделения

На рис. 2 представлено сечение кольцевого ТВЭЛа и распределение температур в этом сечении.

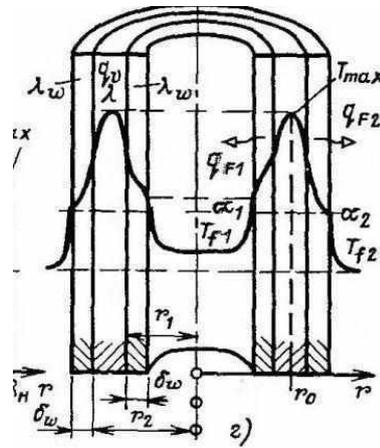


Рис. 2. Сечение кольцевого ТВЭЛ

Принимаемы значения температуры $T_{срре} = 873\text{К}$.

Коэффициент теплопроводности топлива

$$\lambda_{UO_2} = \frac{4 \cdot 10^3}{130 + \left(\frac{T_{сее}}{K}\right)} + 3.4 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_{сее}}{K}\right)^4 = 4,008 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}. \tag{22}$$

Координата сечения, где температура максимальна, определяется формулой

$$r_0 = \sqrt{\frac{\left[\frac{r_{1UO_2}}{\alpha_{1ЭКВ}} + \frac{r_{2UO_2}}{\alpha_{2ЭКВ}} + \frac{1}{\lambda_{UO_2}} \cdot (r_{2UO_2}^2 - r_{1UO_2}^2) \right]}{\left(\frac{1}{\alpha_{1ЭКВ} r_{1UO_2}} + \frac{1}{\alpha_{2ЭКВ} r_{2UO_2}} + \frac{1}{\lambda_{UO_2}} \cdot \ln\left(\frac{r_{2UO_2}}{r_{1UO_2}}\right) \right)}} = 6,111 \text{ мм}. \tag{23}$$

Максимальная температура при $r = r_0$ равна

$$T_{\text{max}} = T_{срре} + \frac{q_v \cdot r_{1UO_2}}{2\alpha_{1ЭКВ}} \cdot \left(-1 + \frac{r_0^2}{r_{1UO_2}^2}\right) + \frac{q_v}{4\lambda_{UO_2}} \cdot \left[r_0^2 \cdot \ln\left(\frac{r_0^2}{r_{1UO_2}^2}\right) - (r_0^2 - r_{1UO_2}^2) \right]. \tag{24}$$

Из (24) следует, что объёмная плотность тепловыделения ТВЭЛа $q_v = 4,648 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

Тепловая мощность единичного ТВЭЛа, кВт, определяется формулой

$$Q_{\text{ТВЭЛ}} = V_{сее} q_v, \tag{25}$$

где объём топливного сердечника

$$V_{сее} = \pi \frac{d_{2сее}^2}{4} H_0 - \pi \frac{d_{1сее}^2}{4} H_0 = 0,00028 \text{ м}^3, \tag{26}$$

$$Q_{\text{ТВЭЛ}} = 129.304 \text{ кВт},$$

тогда найдем тепловую мощность ТВС, кВт,

(27)

$$Q_{\text{ТВС}} = n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot Q_{\text{ТВЭЛ}}.$$

Получаем $Q_{\text{ТВЭЛ}} = 129,304 \text{ кВт}$, $Q_{\text{ТВС}} = 26380 \text{ кВт}$, тогда тепловую мощность активной зоны можно найти по формуле

$$Q_{\text{аз}} = n_{\text{ТВС}} \cdot Q_{\text{ТВС}} = 4,3 \cdot 10^3 \text{ МВт}. \quad (28)$$

Тепловую мощность, передаваемую на внутреннюю и наружную стороны ТВЭЛа определяем из соотношения

$$Q_{\text{кол}} = Q_1 + Q_2,$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\left(\frac{d_2^{\text{сеп}}}{2}\right)^2 - r_0^2}{r_0^2 - \left(\frac{d_1^{\text{сее}}}{2}\right)^2}, \quad (29)$$

где $Q_1 = 80,374 \text{ кВт}$ - тепловая мощность, передаваемая на внутреннюю сторону; $Q_2 = 48,929 \text{ кВт}$ - тепловая мощность, передаваемая на наружную стороны

Расчет коэффициента запаса до кризиса теплообмена кольцевого ТВЭЛа

Оптимизация ТВС должна быть направлена на выравнивание этих запасов, при этом величина запаса должна превышать значение 1,30. При определении запасов следует учитывать неравномерность энерговыделения в активной зоне по высоте и радиусу. Кроме того, в процессе эксплуатации за счет разбухания и теплового расширения топлива изменяются толщины газовых кольцевых зазоров – внешний газовый зазор уменьшается, внутренний увеличивается. Это сопровождается перераспределением тепловых потоков, возрастает доля тепла, отводимого с внешней поверхности.

Проведем расчет тепловых потоков и параметров теплоносителя по высоте ТВЭЛа в девяти точках с координатами $z = -1,75; -1,5; -1; 0,5; 0; 0,5; 1; 1,5; 1,75$.

Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте равен $K_z = 1.5$. Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны принимаем равным $K_v = 2,8$.

Тепловой поток на ТВЭЛе рассчитывается по формуле

$$q_{l1} = \frac{K_z Q_1}{H_0} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right]. \quad (30)$$

Значения линейных тепловых потоков в расчетных точках по высоте активной зоны определяются по следующим формулам для внутренней и наружной стороны соответственно:

$$q_l(z) = q_l \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right),$$

$$q_{l\text{max}}(z) = q_{l\text{max}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right). \quad (31)$$

Распределение тепловой нагрузки на единицу поверхности ТВЭЛа:

$$q_s(z) = k \frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}},$$

$$q_{s\text{max}}(z) = k \frac{q_{l\text{max}}(z)}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}}}. \quad (32)$$

Тепловой периметр для внутренней и наружной стороны $\Pi t = \pi(n_{\text{ТВЭЛ}} d_{\text{ТВЭЛ}})$ где $\Pi t_2 = 5,127$ м - для наружной стороны; $\Pi t_1 = 9,613$ м - для внутренней стороны.

Распределение энтальпии теплоносителя по высоте ТВЭЛа для каждого участка определяется формулой

$$h(z) = h_{\text{вн}} + \frac{q_l}{G_{\text{ТВЭЛ}}} \cdot \frac{H}{\pi} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi H_0}{2H}\right) + \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right], \quad (33)$$

где $G_{\text{ТВЭЛ}}$ – расход теплоносителя через ТВЭЛ; q_l – линейный тепловой поток; H_0 – высота АЗ; H – экстраполированная высота.

Распределение относительных энтальпий по высоте ТВЭЛа

$$x_{1,2}(z)_{\text{реал}} = \frac{h_{1,2}(z) - h_{\text{вод}}}{rS}. \quad (34)$$

Распределение относительных энтальпий по высоте ТВЭЛа для внутренней и наружной стороны

$$x_{1,2}(z)_{\text{реал_max}} = \frac{h_{1,2}(z)_{\text{max}} - h_{\text{вод}}}{rS}.$$

Тепловой диаметр пучка ТВЭЛ в ТВС $Dt = \frac{4f_{\text{прох1,2}}}{\Pi t_{1,2}}$, где $Dt_1 = 8$ мм – для внутренней стороны; $Dt_2 = 6,1$ мм – для наружной.

Критический тепловой поток

$$q_{\text{кр}}(z) = \frac{\left(1 - \frac{X_{1,2}(z)}{3,5}\right)^{1,3}}{320 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54}\right)} \rho_{\text{вод}} rS \left[gDt_{1,2} (gAS)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} Re_{1,2\text{кр}}^{\frac{1}{5}} Pr_{\text{вод}}^{\frac{1}{3}}, \quad (35)$$

где $Re_{1,2\text{кр}} = \frac{wDt_{1,2}\rho_{\text{ср}}}{\mu_{\text{вод}}}$ – число Рейнольдса для критических тепловых потоков для q_1 и q_2 соответственно

$$X(z) = x(z)_{\text{реал}} \left[\frac{[Dt(w\rho_{\text{ср}})^2]^{\frac{1}{5}}}{\sigma S \rho_{\text{вод}}} \right]^{\frac{1}{5}}.$$

После указанных расчетов можно определить коэффициенты запаса до кризиса теплообмена по формуле

$$k_{\text{зап}}(z) = \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q_s(z)}. \quad (36)$$

Распределение значений критических тепловых потоков и коэффициентов запаса до кризиса теплообмена приведено в табл. 4.

Таблица 4

Значения критического и поверхностного теплового потока q_1 и q_2 , коэффициента запаса до теплообмена

z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
q_{s1} , кВт/м ²	88,4	360,1	842,2	1171,5	1288,3	1171,5	842,2	360,1	88,4
$q_{кр1}$, кВт/м ²	3466,57	3433,07	3252,67	2955,64	2601,99	2259,12	1987,05	1828,55	1799,67
$q_{кр1}^{max}$, кВт/м ²	6495,59	6431,44	6086,02	5517,56	4841,15	4185,91	3666,49	3364,14	3309,07
q_{s1}^{max} , кВт/м ²	165	672,1	1572	2186,8	2404,9	2186,8	1572	672,1	165
$K_{зап1}$	39,215	9,534	3,862	2,523	2,02	1,928	2,359	5,078	20,359
$K_{зап1}^{max}$	39,365	9,569	3,871	2,523	2,013	1,914	2,332	5,005	20,054
q_{s2} , кВт/м ²	53,8	219,2	325,7	453	498,3	453	325,7	139,3	34,2
q_{s2}^{max} , кВт/м ²	100,5	409,2	957	1331,2	1464	1331,2	957	409,2	100,5
$q_{кр2}$, кВт/м ²	2889,56	2877,96	2815,22	2710,86	2584,62	2459,79	2358,67	2298,78	2287,77
$q_{кр2}^{max}$, кВт/м ²	2613,56	2594,79	2493,51	2326	2125,1	1928,49	1770,9	1678,31	1661,37
$K_{зап2}$	53,696	13,13	5,491	3,801	3,296	3,449	4,601	10,487	42,513
$K_{зап2}^{max}$	26,018	6,342	2,606	1,747	1,452	1,449	1,85	4,102	16,539

На рис. 3 представлены графики зависимости тепловых потоков для внутренней и наружной стороны ТВЭЛа в зависимости от координаты.

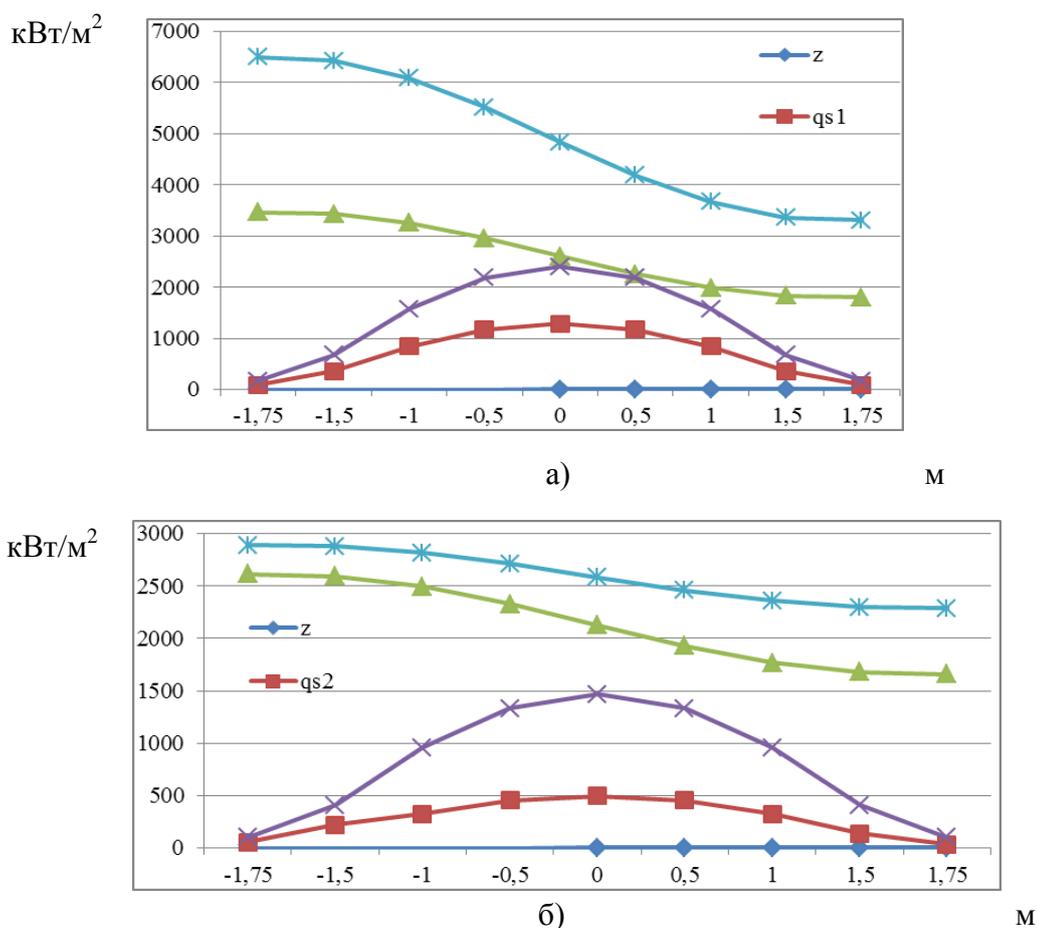


Рис. 3. График зависимости тепловых потоков:
а – для внутренней стороны ТВЭЛ от координаты; б – для наружной

Выводы

При проведении расчета были получены следующие результаты:

1. Идеей нашего расчета являлось сравнение мощностей кольцевого и стержневого ТВЭЛов для реактора ВВЭР. Тепловая мощность единичного кольцевого ТВЭЛов $Q_{ТВЭЛкол} = 129$ кВт. Для сравнения тепловая мощность стержневого ТВЭЛа в серийном реакторе ВВЭР-1000 $Q_{ТВЭЛстер} \approx 60$ кВт. Увеличение тепловой мощности достигается за счет двустороннего отвода тепла в ТВЭЛах кольцевого типа.

2. Тепловая мощность ТВС с кольцевыми топливными элементами $Q_{ТВС} = 26380$ кВт, что превышает тепловую мощность ТВС-2М в серийном реакторе ВВЭР-1000 $Q_{ТВС-2М} \approx 18400$ кВт.

Параметры ТВС подобраны с условием равенства ее габаритных размеров серийной ТВС-2М. Следует отметить увеличение плотности решетки ТВЭЛов, уменьшение их количества с 312 в ТВС-2М до 217 в ТВС с кольцевыми топливными элементами. Причина подобных мер – увеличение внешнего диаметра ТВЭЛа с 9,1 мм в стержневых до 15 мм в кольцевых.

3. Наблюдается так же увеличение тепловой мощности активной зоны с использованием ТВС с кольцевыми топливными элементами $Q_{АЗкол} = 4300$ МВт. Для сравнения тепловая мощность серийного реактора установки ВВЭР-1000 $Q_{АЗ} \approx 3000$ МВт. При этом объемы активных зон для обеих установок равны, следовательно, возможно использование серийных реакторов с применением в них кольцевых ТВЭЛов. Увеличение мощности составляет $\Delta Q = 43\%$.

4. Следует отметить увеличение скорости потока теплоносителя в активной зоне с топливными элементами кольцевого типа, возникающее как следствие увеличения тепловой мощности активной зоны, $V_{АЗкол} = 8,217$ м/с.

5. Полученные запасы до кризиса теплообмена свидетельствуют о возможности использовании ТВЭЛов предложенного типа. В результате проверочного расчета были получены минимальные коэффициенты запаса для максимально нагруженных топливных элементов по внешнему и внутреннему диаметру $K_{запл}^{max} = 2,01$; $K_{запл}^{max} = 1,45$.

6. Использование ТВС с кольцевыми топливными элементами позволяет существенно уменьшить количество делящегося топлива в активной зоне уменьшить его температуру, тем самым увеличив теплопроводность, что в повышает безопасность реакторной установки. В полученной активной зоне достигнуто сокращение объемов оксида урана на 40 %

7. Использование кольцевых ТВЭЛов может быть эффективно в установках с кипением теплоносителя и выработкой перегретого пара – в реакторах со сверхкритическими параметрами или в прямом газотурбинном цикле. Так же можно рекомендовать оребрение или навивку внутренней и внешней поверхности ТВЭЛа, ввод во внутреннюю полость топливных элементов шнековых вставок. Данные мероприятия проводятся с целью интенсификации теплообмена и увеличения тепловой мощности топливных сборок и реактора в целом.

Библиографический список

1. **Афров, А.М.** ВВЭР-1000: Физические основы, эксплуатация, ядерное топливо, безопасность / А.М. Афров [и др.]. – М.: Логос, 2006. – 504 с.
2. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчётам / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

3. **Дмитриев, С.М.** Краткий курс тепломассообмена: учеб. пособие / С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2008. – 144 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

V. A. Farafonov, A. V. Zinin, E. I.Semenov, A. V. Komarov

**DETERMINATION OF THERMAL POWER ANNULAR FUEL ELEMENTS.
COMPARISON OF THE THERMAL POWER OF THE CORE USING THE ANNULAR
AND ROD FUEL ELEMENTS**

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

Purpose: This article contains a calculation of power heat of annular fuel rods for VVER-type reactor. The calculation was carried out with the aim of substantiating theoretically the increasing of power heat due to the replacement pin-type fuel assembly with fuel assembly with annular fuel rods.

Design/methodology/approach: Fuel assemblies are formed in accordance with the geometric parameters of TVS-A at using similar materials. The calculation was carried out using classical coolant temperature and isotopic composition of the fuel for such type of reactors.

Originality/value: The originality of this article is to identify the benefits of the annular fuel rods in VVER reactors.

Key words: power, temperature, fuel, coolant, enthalpy, safety.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

**В.Е. Колотилин, А.В. Михеев, П.О. Береснев, А.М. Беляев, А.В. Папунин,
В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, А.А. Куркин**

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, МАССОВО-ИНЕРЦИОННЫХ И МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА РОТОРНО-ВИНТОВЫХ ДВИЖИТЕЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются зависимости и делаются выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения транспортно-технологических машин, оснащенных роторно-винтовым двигателем, к обуславливающим их подвижность, технологическую производительность и эффективность. Приводится методика рационального выбора типа машины, систем управления маневренностью, обеспечение общей потребной мощности, грузоподъемности, максимальной скорости движения.

Ключевые слова: роторно-винтовой движитель, мощность, масса, диаметр ротора, высота лопасти, угол наклона винтовой линии.

Разнообразные природно-климатические и геофизические (опорно-профильные ледово-снежные грунтовые) условия требуют для решения важных производственных задач специальных мобильных технических средств. В сильно заснеженных, заболоченных и заилиных районах обычные машины с колёсным или гусеничным двигателем не могут работать достаточно эффективно. В этих условиях применяются машины с нетрадиционными опорно-тяговыми системами, одной из которых является роторно-винтовой движитель (РВД). Конструкция транспортного средства, оснащенного роторно-винтовым (шнековым) двигателем, представляет собой два винта или две пары винтов Архимеда, выполненных из особо прочного материала и установленных на жёсткой раме. «Шнекоход» очень хорошо зарекомендовал себя при езде по сыпучим и обводнённым грунтам, по песку, снегу, шуге (микс льда и воды). Он обладает способностью преодолевать крутые подъёмы, водные преграды. Однако шнек – роторно-винтовой движитель медлительный, расходующий энергию не только на перемещение транспортного средства, но и на повреждение (экскавацию) материала опорного основания, по которому он движется, поэтому непригоден для езды по асфальту или бетону. Для транспортировки шнекохода на твердых поверхностях обычно используется специальная платформа.

Впервые такой движитель на транспортном средстве применил Дж. Стивенс. В 1804 г. он построил пароход с роторно-винтовым двигателем и испытал его на реке около Нью-Йорка. В 1874 году в Канаде Августину С. Труделу был выдан патент на транспортное средство, приводимое в движение роторно-винтовым двигателем (рис. 1). При этом история создания первого «сухопутного шнекохода» весьма запутана.

Считается, что первый «сухопутный шнекоход» (рис. 3) был изобретён в 1868 г. американским инженером швейцарского происхождения Дж. Дж. А Моратом (J.J. A. Morath) в США в Сент-Луисе как «сельскохозяйственная машин, приводимая в движение Архимедовым винтом» (Agricultural Machine). Однако патент был получен Моратом только в 1899 г. Другая версия о создании первого «сухопутного шнекохода» относится к 1898 г. к временам Золотой лихорадки Клондайка. Это была машина, оснащенная деревянными шнеками (рис. 4). Есть предположение, что она приводилась в движение паром, однако более подробной информации не имеется.

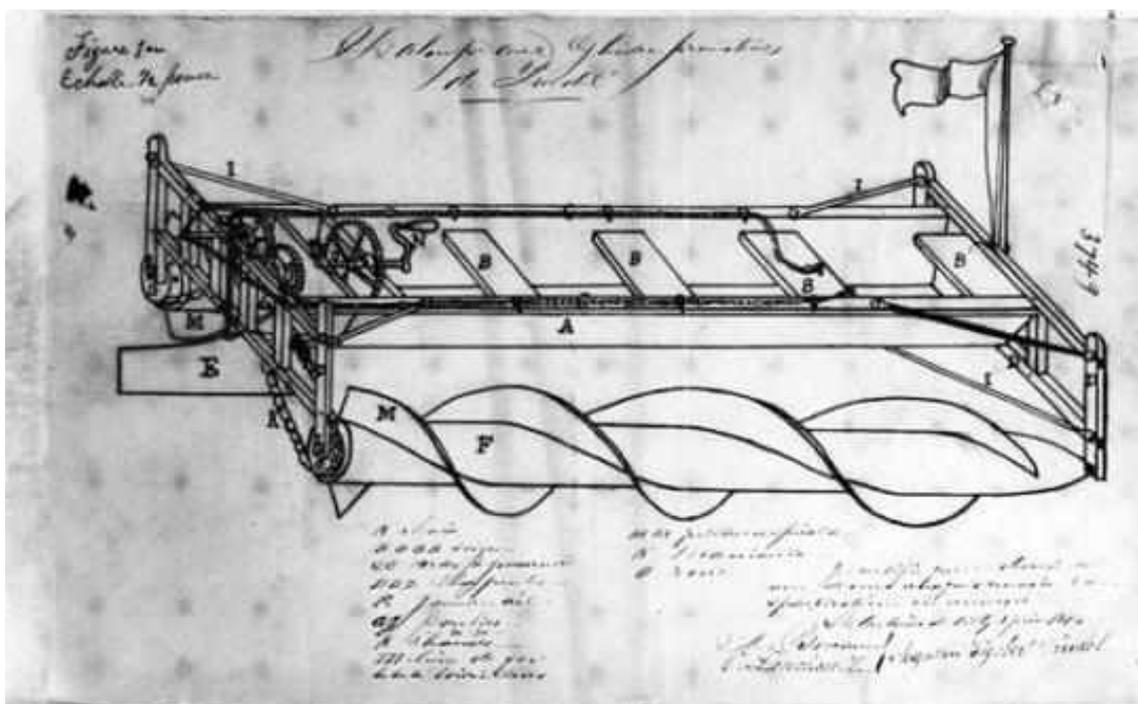


Рис. 1. Одна из первых схем транспортного средства, оснащенного роторно-винтовым движителем (патент 1874 г. А.С. Трудела)

Мората считают первым изобретателем «сухопутного шнекохода», но по ряду интернет-источников [http://www.tankovedia.ru/pulication/boevye_shnekoходы, дата доступа 10.07.2015] это не так. За 1,5 г. до машины Мората в 1897–1898 гг. патент под номером US600672 на изобретение Ice or Snow Locomotive (ледяной или снежный локомотив) получил Уильям Генри Харви из Торонто (Канада). Впрочем, истинному изобретателю шнекохода, Томасу Л. Джонсу, он годится во внуки. Патент под номером US2727 на своё изобретение тот получил 16 июля 1842 г., причём шнековый движитель Томас Л. Джонс предлагал как для наземных машин, так и кораблей (рис. 2).

В России первый патент на «сухопутный шнекоход» был выдан в 1900 г. русскому изобретателю Ф. Дергинту (рис. 5). Конструкция была смонтирована на базе обычных крестьянских саней, полозья которых были укорочены и на линии их продолжения установлены тяговые винты, вращающиеся от двигателя. Поворот саней осуществлялся с помощью подрезов (коньков). Сведений о практическом использовании машины Ф. Дергинта не имеется [2].

За создание шнекоходов брались многие конструкторы разных стран (Канады, Германии, Франции, Швеции, США, Японии, Австралии и России) они получали соответствующие патенты и привилегии (рис. 6–10), но информации о первых снегоходах на РВД не так и много.

Так, в 1907 г. был выдан патент на четырехшнековый снежных локомотив. Однако

само создание этой тяговой машины на РВД относится к 1900 г. Существует фотографическое изображение, выполненное в 1915 г., снегохода И. Пиви, который в начале прошлого века некоторое время конкурировал с Ломбардом на ниве создания «сухопутных паровозов». Но, если Ломбард строил классических «полугусей» (полугусеничные машины), то мистер Пиви решил сделать «ход конем» и выполнить ходовую часть своей техники из минимального количества деталей. Вместо гусениц на сложных тележках он поставил два шнека противоположного вращения (рис. 11). Пробовал он создавать машины на РВД и с паровым мотором, и с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). В конечном итоге И. Пиви не выдержал конкуренции с Ломбардом. Машина Пиви была построена в одном экземпляре и часто во время эксплуатации застревала в снегу. Возможно, проблема была в том, что шнеки были слишком малы в диаметре.

Во время первой мировой войны канадец С. Коди, работающий на Детройтском заводе по производству боеприпасов, построил маленькую модель (прототип) «сухопутного шнекохода» с полностью закрытой кабиной, предназначенную как амфибийное мобильное десантное средство (рис. 12), и пытался продать идею американским военным. Однако они не заинтересовались, поэтому его идея не была реализована.

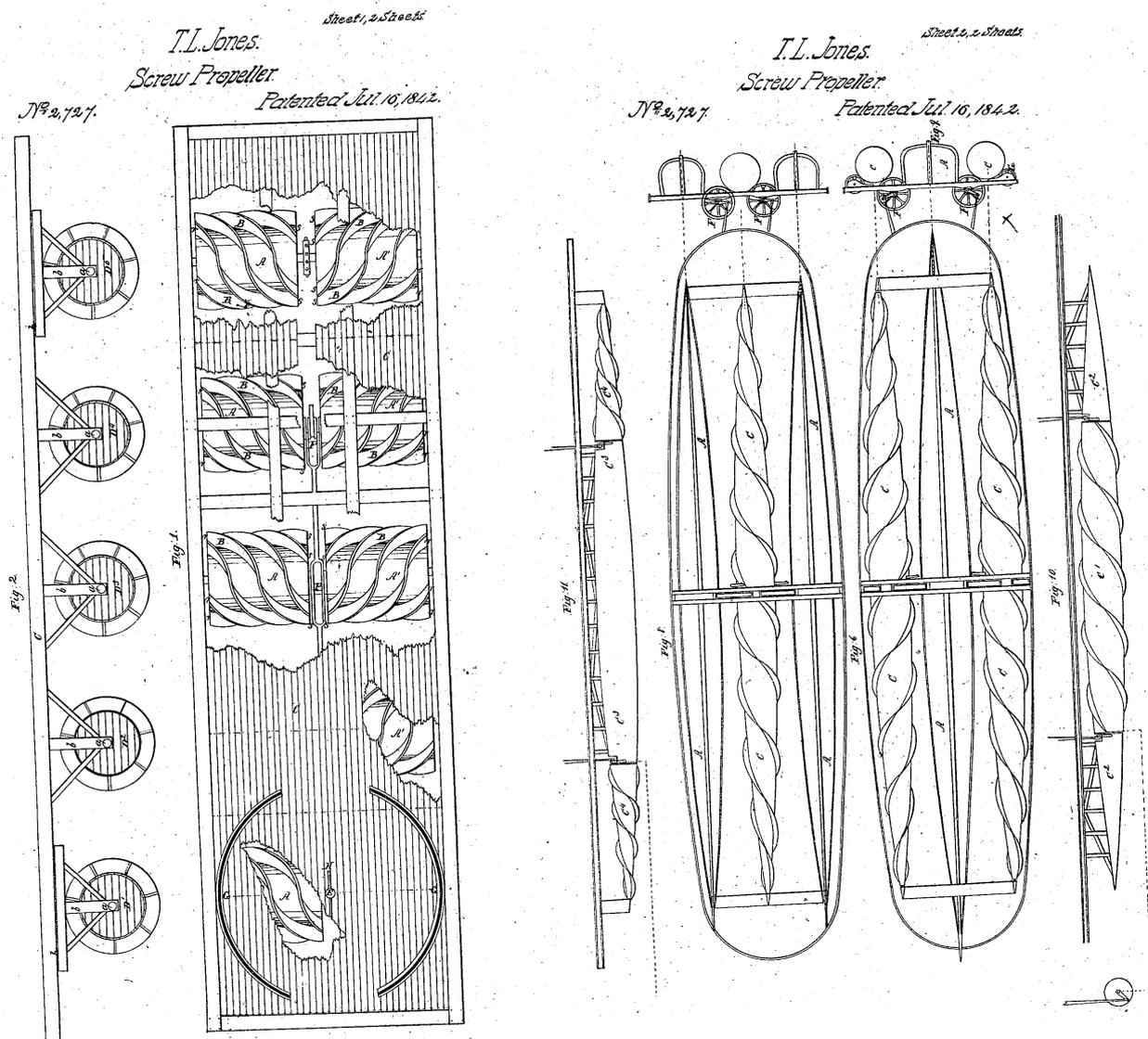


Рис. 2. Патент US2727A – «универсальный шнекоход» Т.Л. Jones (1842 г.)

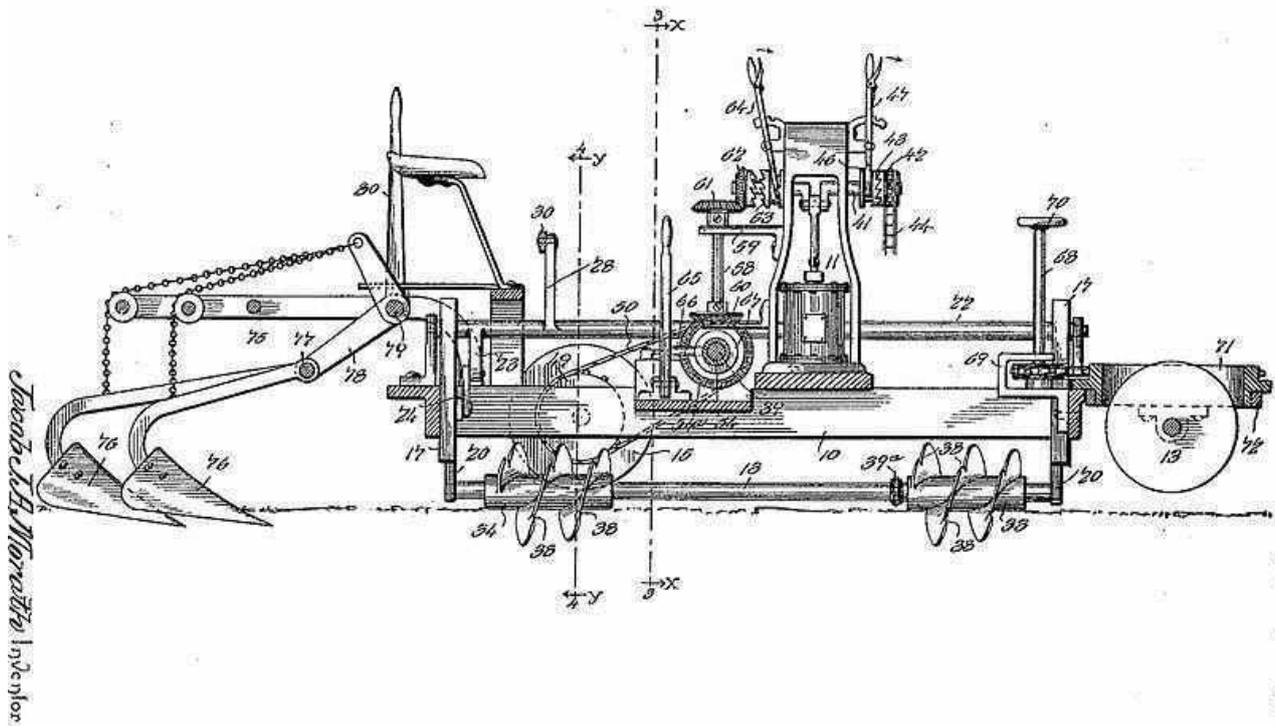


Рис. 3. Сельскохозяйственный шнекоход Дж. Дж. А. (Якоба) Мората (US635501 patent, Сент-Луис, США, 1868-1899 гг.)



Рис. 4. The Klondike Wood Screw (1898 г.)

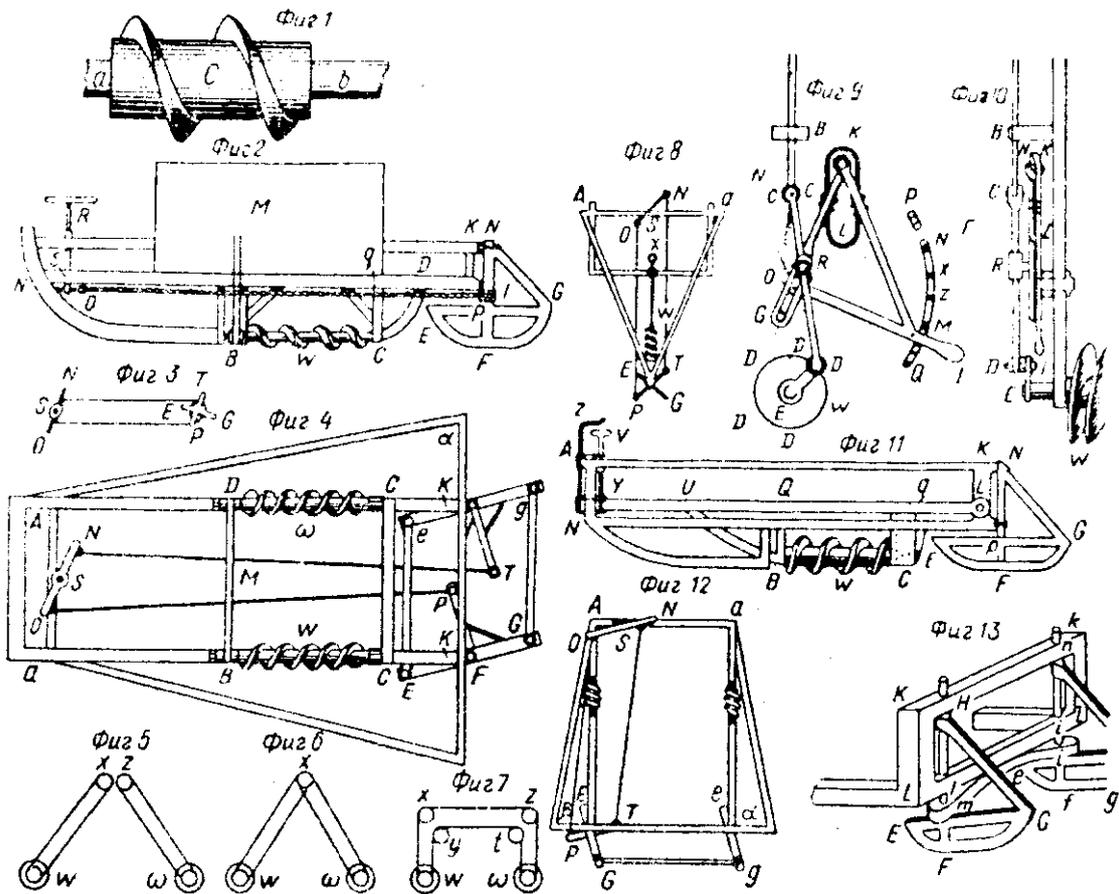


Рис. 5. Из патента на мотосани Ф. Дергинга (1900 г.)

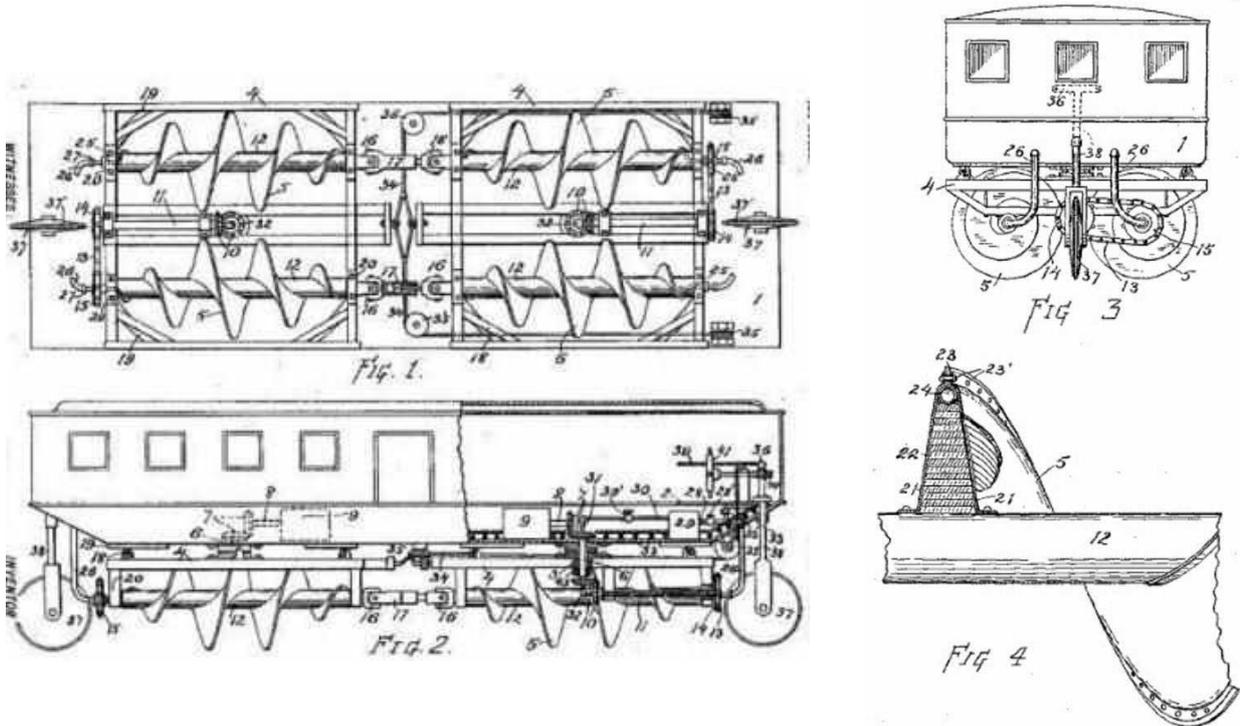


Рис. 6. Шнекоход Screw Locomotive С.Е.С. Burch с управляемыми колесами (US669210 patent, 1901 г.)

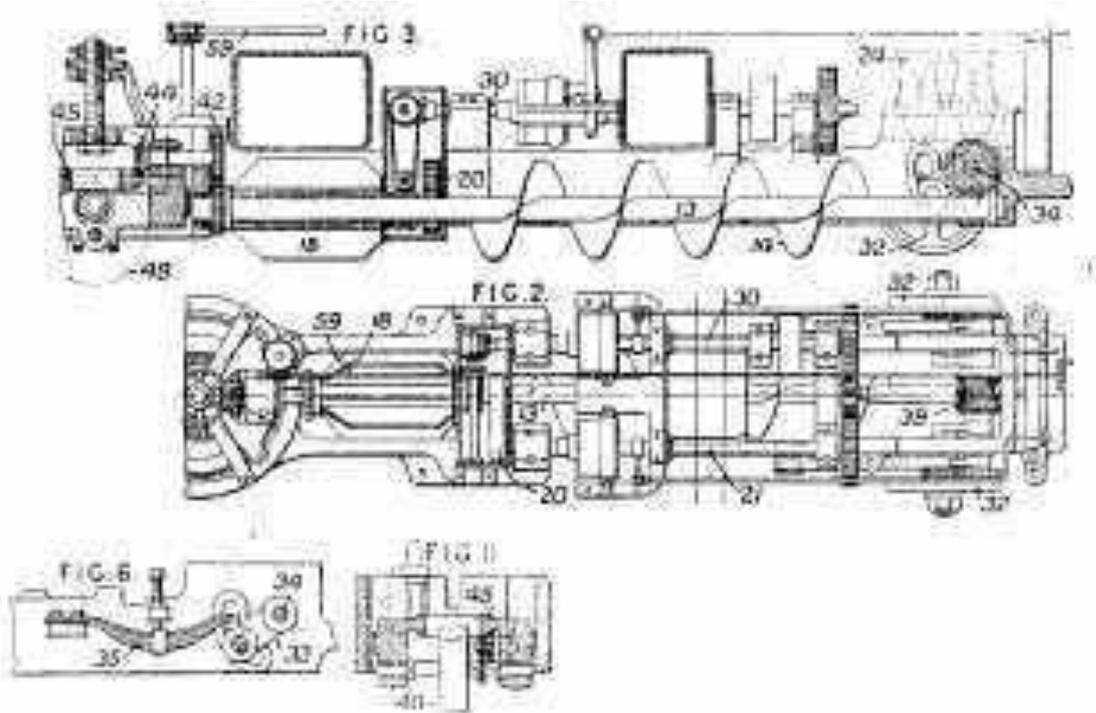


Рис. 7. Патент на улучшение сельскохозяйственных тракторов изобретателя из Англии Д. А. Блокс (GB18674 patent, 1914 г.)

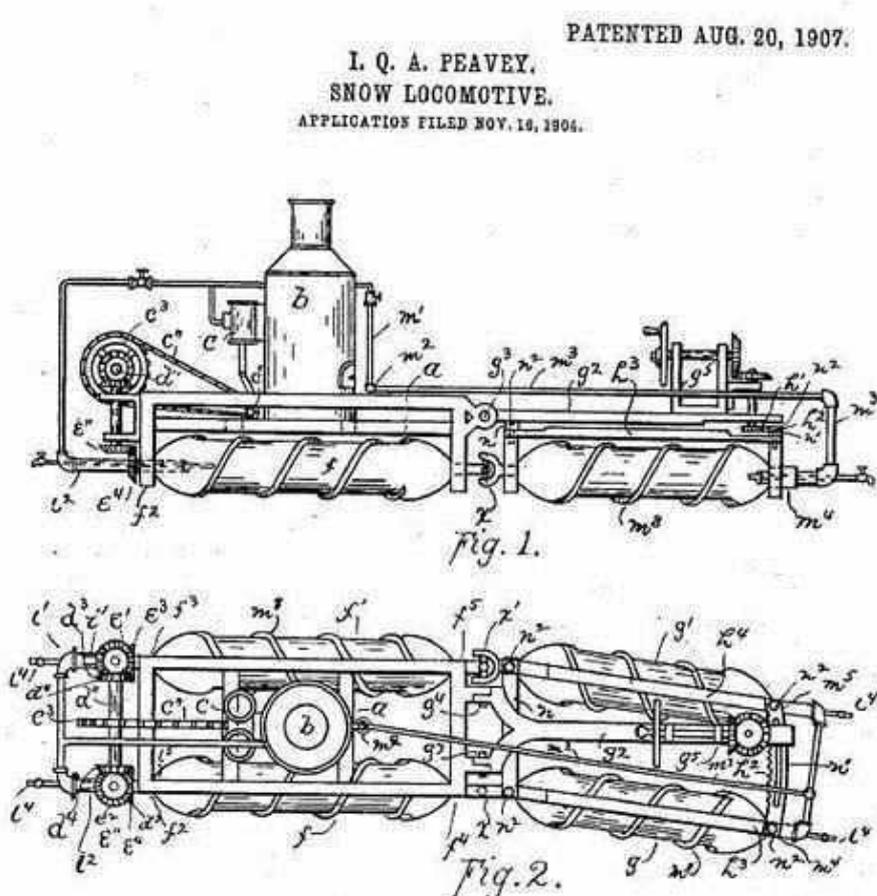


Рис. 8. Из патента И. Пиви на паровой сочлененный шнековый снежный локомотив SNOW LOCOMOTIVE (US864106 patent, 1907 г.)

F. R. BURCH,
MOTOR SLED.
APPLICATION FILED SEPT. 27, 1917.
Reissued Jan. 8, 1918.
14,418.
2 SHEETS—SHEET 1.

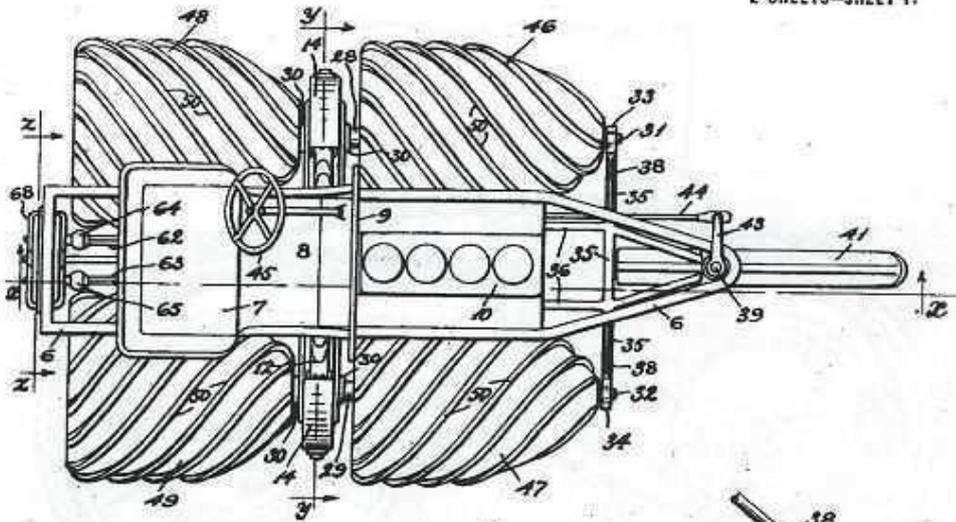


FIG. 1.

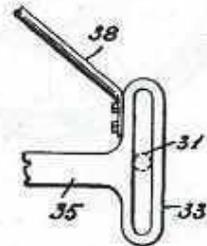


FIG. 3.

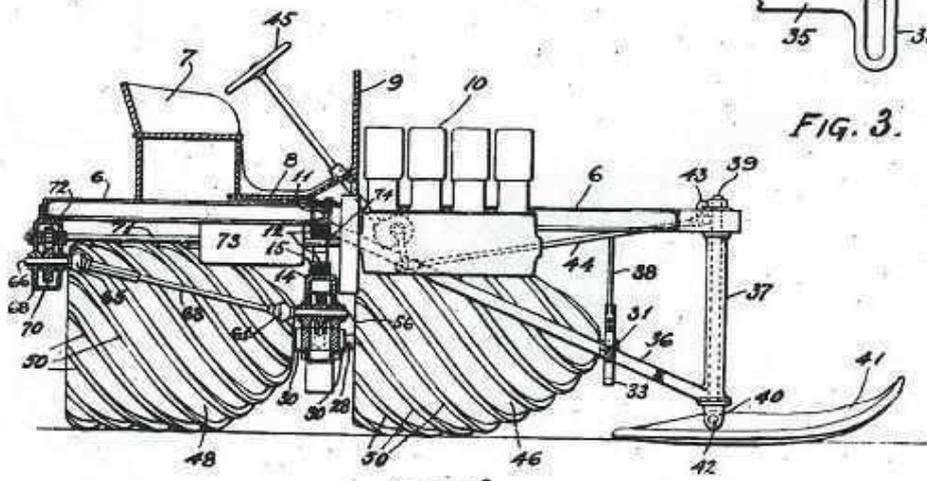


FIG. 2.

Witness

Johnson

By

Inventor
Frederick R. Burch

C. D. Hutchins
Attorney

Рис. 9. Оригинальный РВД-снегход Ф.Р. Бурча (1918 г.)

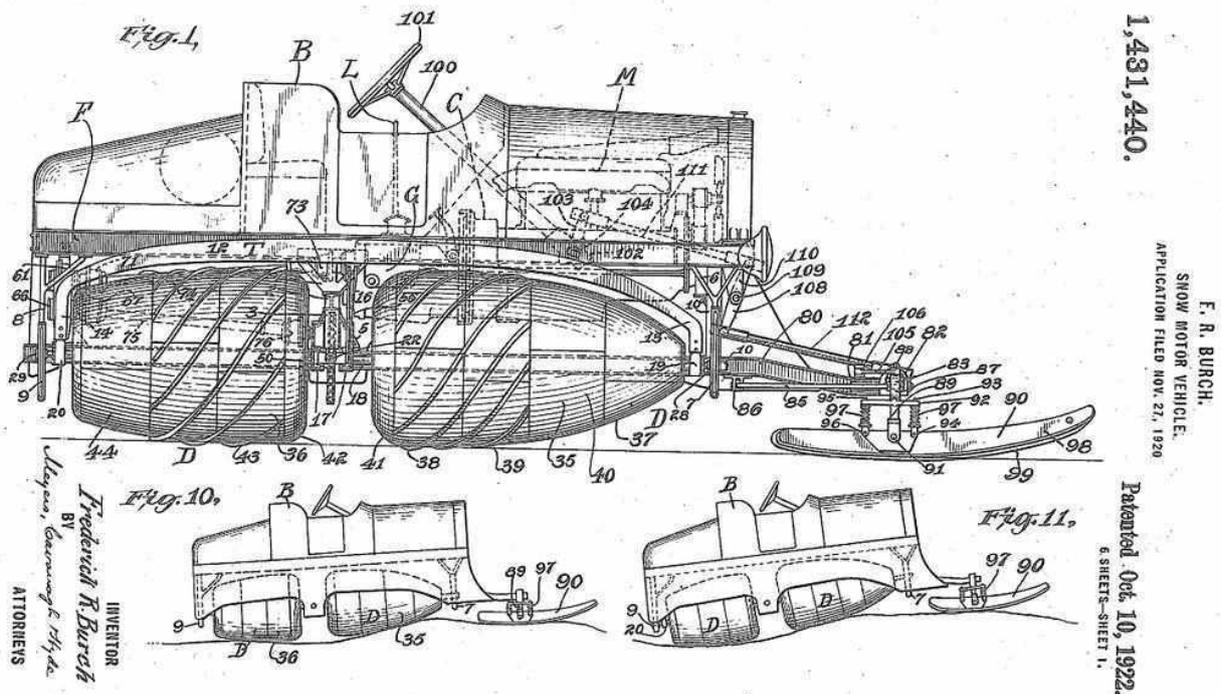


Рис. 10. Снегоход Ф.Р. Бурча «SNOW MOTOR VEH»(1922 г.)

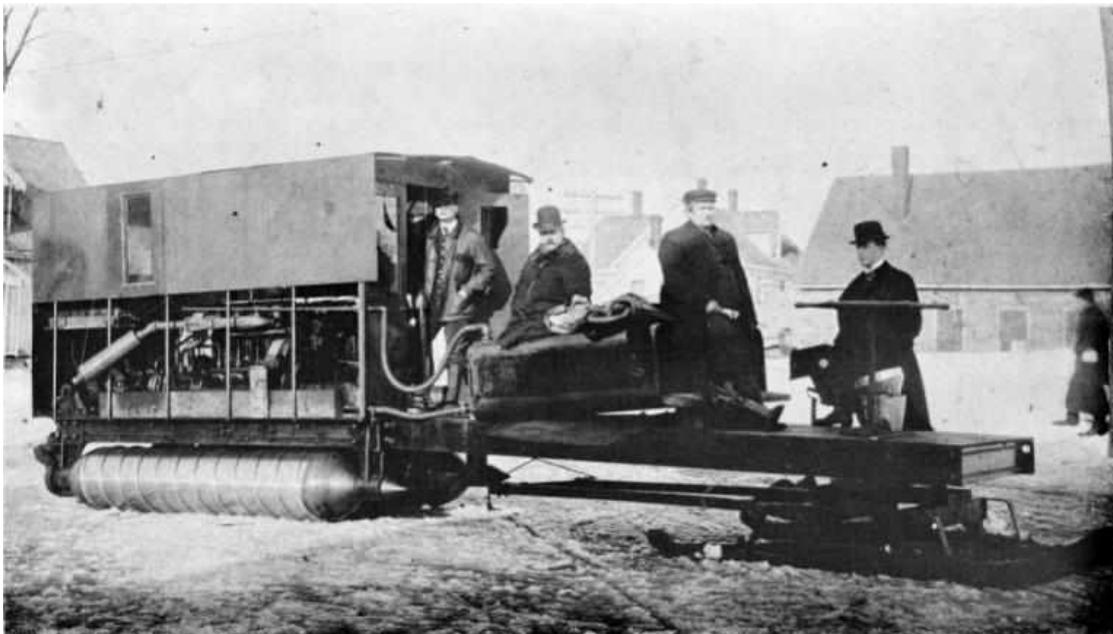


Рис. 11. Снегоход И. Пиви со шнековым движителем и ДВС (США, 1915 г.)

В этот период во Франции и Швеции появляются шнековые движители, приспособленные к автомобилям (рис. 13) и предназначенные для обеспечения возможности передвижения по снегу. Эти машины имели винтовой движитель, установленный между задними колесами автомобиля. Шнек приводился во вращение от двигателя через специальную передачу.

Первоначально на автомобили ставился один такой движитель, а позднее два параллельных. Шнеки на автомобили устанавливались на шарнирной подвеске, водитель машины посредством системы рычагов мог опускать и поднимать их, то есть регулировать высоту по отношению к колесам автомобиля. При движении по глубокому, рыхлому снегу достаточно было опустить шнек, чтобы он погружался в более плотный слой, обеспечивая лучшее сцеп-

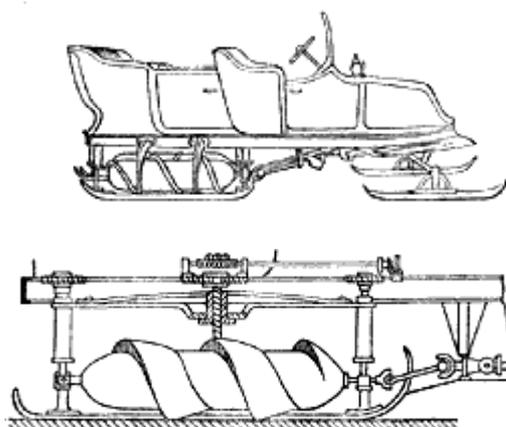
ление с полотном пути. Позднее шнек начали ставить на пружинной подвеске, и та же операция выполнялась автоматически, упразднялась сложная рычажная система управления положением движителя относительно грунтово-дорожного основания.



Рис. 12. Жестяная модель плавающего танка Коди со шнековым движителем (Канада, 1918 г.)



a)



б)

Рис. 13. Автомобиль с РВД-лыжным движителем:

a – общий вид автомоиля на РВД-лыжном движителе; *б* – установка шнека на автомобиль

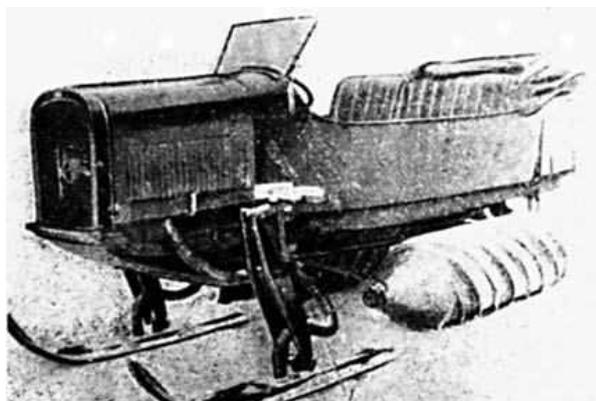
В первых вездеходах, оснащенных РВД, шнек работал недостаточно надежно, а сами машины имели слишком узкие управляемые колеса, которые под весом автомобиля глубоко погружались в снег и создавали большое сопротивление движению. Да и конструкция шнека была также несовершенна. Небольшого диаметра стержень и высокое узкое ребро его винтовой нарезки не уплотняли снег, а на твердом насте автомобиль мог перемещаться и без такого движителя.

Следующий этап развития шнекового транспорта - увеличение диаметра винтового движителя, резкое уменьшение высоты спирального ребра и замена колес на лыжи. Эти усовершенствования резко повысили эффективность работы шнека. Теперь он превратился в цилиндр большого диаметра, который при перемещении хорошо уплотнял снег, а винтовое ребро, хотя и было меньшей высоты, работало значительно лучше. Испытания показали, что сцепление такого шнека с грунтом возрастает с увеличением приходящейся на него нагрузки.

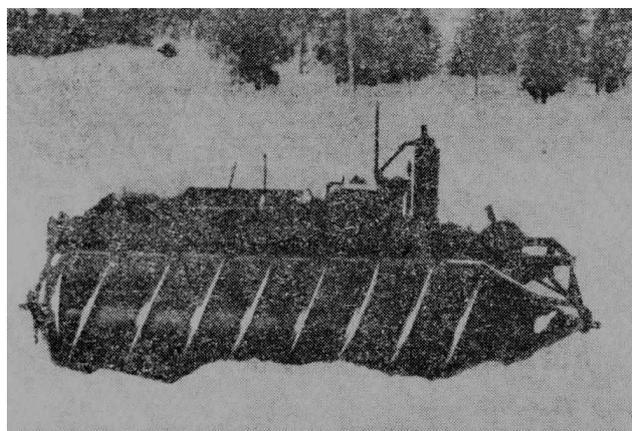
Это наблюдение привело к этапу развития вездеходов рассматриваемого типа, который можно назвать *современным*, так как он захватывает и сегодняшний день. Конструкторы

отказались от приспособления шнекового движителя к автомобилю и стали строить специальные машины, в которых вся масса распределяется между двумя винтовыми движителями и передними управляемыми лыжами.

В 1922 г. Дж. Тьюкер создал «Мотобоб» (Motobob) - машину на роторно-винтовом движителе (рис. 14, а), в котором два винтовых ротора крепились к консольным рессорам параллельно направлению движения. Привод на роторы шел от двигателя с воздушным охлаждением, при этом основной вес приходился на лыжи. Мотосани «Мотобоб» были спроектированы только для передвижения по снегу. Конструкция движителя несколько отлична от предыдущей. Перед винтовыми барабанами были установлены лыжи для управления движением и уплотнения снежного покрова. Диаметр барабанов 400 мм, угол подъема винтовой линии 40° . В 1926 г. в конструкцию опорно-тягового механизма были внесены изменения, в результате чего остались только одни винтовые роторы (рис. 14, б).



а)



б)

Рис. 14 Снегоходы Тьюкера:

а - Мотобоб» (Motobob) (1922 г.);

б - снегоход с роторно-винтовым движителем (1926 г.)

Таким образом, появилась и еще одна разновидность шнековых машин, у которых уже не было ни колес, ни лыж, а движители представляли собой цилиндры большого диаметра с трех-, четырехзаходной навивкой рабочего ребра. Управление осуществлялось как на гусеничных машинах – торможением одного из шнеков. Такая конструкция считается наиболее перспективной, поскольку дает возможность использовать подобные машины не только зимой, но и в условиях полного бездорожья.

В 1929 г. появился шнековый трактор «Снежный дьявол», который производился серийно компанией Armstead Snow Motor на базе трактора Fordson (рис. 15). Трактор Fordson имел в качестве движителя два несущих барабана с винтообразными зацепами. Подвеска винтовых барабанов жесткая, без упругих элементов. Винтовые барабаны – стальные, пустотелые, с диаметром 700 мм и углом наклона винтовой линии зацепов 28° .

Поворот трактора осуществлялся торможением одного из движителей. Существенным недостатком конструкции являлась недостаточная устойчивость прямолинейного движения. При увеличении скорости устойчивость еще более уменьшалась, и только опытный водитель мог управлять машиной, поддерживая прямолинейность движения. Устойчивость прямолинейного движения еще более ухудшалась при движении с малым погружением движителя в грунт. На рыхлом однородном снежном покрове при погружении на четверть диаметра и более устойчивость была удовлетворительной.

При испытаниях на снежной целине у трактора Fordson с роторно-винтовым движителем были более высокие тягово-сцепные показатели, чем у такого же трактора с гусеничным

двигателем (при одинаковых показателях экономичности). Тяговое усилие, развиваемое трактором на РВД, позволило буксировать несколько санных прицепов общим весом 3280 кг по снежной целине и проселочной дороге со средней скоростью 4,5 км/ч.

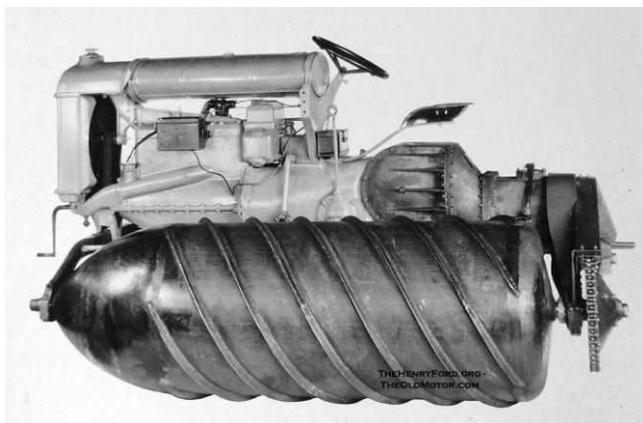


Рис. 15. Трактор «Fordson» на РВД «Снежный Дьявол» (1929 г.)

Снегоходные машины с роторно-винтовым двигателем – мотосани Motobob и трактор тягач Fordson – были испытаны А.А. Крживицким [3] в середине 20-х годов XX в.

На испытаниях при общей массе с тремя пассажирами 840 кг и мощности двигателя внутреннего сгорания 15,96 кВт (21,7 л.с.) Motobob имел более высокую скорость, чем трактор Fordson»: по снежной целине – 10 км/ч, по уплотненному снегу с ветровым настом – 20,7 км/ч, по заснеженному шоссе – 32,4 км/ч. При движении по снежной целине устойчивость движения Motobob была удовлетворительной, однако на укатанной снежной дороге устойчивость прямолинейного движения зачастую не выдерживалась. Трактор тягач Fordson, построенный на базе американского трактора Ford, имевший в качестве двигателя два несущих шнека диаметром 700 мм, мог буксировать по снежной целине санный прицеп массой 3280 кг со скоростью 4,5 км/ч.

Рекламный проспект 20-х годов XX в. утверждал, что трактор Fordson» на роторно-винтовом двигателе мог тянуть 20 т бревен. Заказы на поставку этих машин приходили в США из Канады, Норвегии, Швеции, Аляски, а также известно, что шнековый трактор Fordson прошел большую промышленную апробацию в России.

Машины со шнековыми двигателями имеют ряд преимуществ: относительная простота, плавность хода, хорошее тяговое усилие. Но тогда же вскрылись и минусы, в основном заключающиеся в небольшой скорости, плохой маневренности, недостаточной надежности конструкции. Немаловажным фактором явилась и ограниченность мест целесообразного

использования шнекоходов по сравнению с гусеничными машинами и автомобилями повышенной проходимости. Все это послужило причиной ослабления внимания к роторно-винтовому движителю.

Мало что известно о машинах на роторно-винтовых движителях периода с 1929 г. по 1936 г. и времен второй мировой войны (1936-1945 гг.). Известно, что попытки использования роторно-винтовых машин в качестве военных тягачей предпринимались как в США, так и Германии.

Американский изобретатель Э. Такер-старший разработал множество прототипов автомобилей для снега, в том числе SNO JEEP (рис. 16), что привело к созданию в конце 30-х годов его компании, ставшей всемирно известной как Tucker Sno-Cat Corporation и выпускавшей гусеничные снегоходы.

На рис. 18 представлена боевая машина Вермахта на РВД периода 1941–1945 гг., однако о её конструкции и тактико-технических характеристиках нет информации.

В 1944 г. ветераном первой мировой войны, немецким солдатом Й. Рейделем, была разработана SchneeMaschine (рис. 19). Эта идея ему пришла в голову, когда он увидел бедственное положение немецких войск в глубоком российском снегу. Он убедил немецкое командование в Берлине позволить ему создать опытный образец машины и провести её испытание в тирольских горах. Однако машина оказалась мало-скоростной и развивала тягу в одну тонну, имела погружение в снег на 0,3 м и могла преодолевать крутые подъемы.

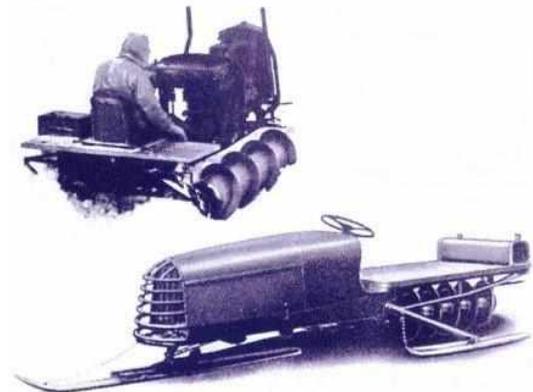
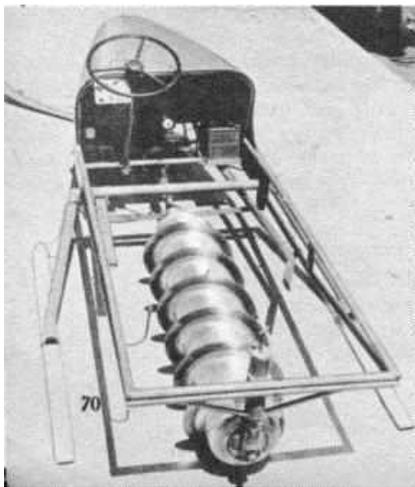


Рис. 16. SNO JEEP Э. Такера-старшего в одношнековой и двухшнековой вариациях (1935 г.)



Рис. 17. Боевая машина Вермахта, оснащенная роторно-винтовым двигателем (1941–1945 гг.)

В СССР также были свои идеи по разработке шнекоходов, появившиеся именно в годы войны. При этом речь шла не только о создании таких машин с нуля, но и об установке подобного двигателя на уже имеющиеся машины. Так, в марте 1944 г. подобное предложение поступило от техника-лейтенанта Б. К. Григоренко (рис. 19.). Его идея заключалась в установке на рабочую поверхность винта Архимеда резиновых роликов. Теоретически ролики должны были обеспечить передвижение шнекохода по твердым поверхностям. Также, подобно иностранным конструкциям, планировалось установить шнековые движители на уже существующие танки и машины, но до практической проверки возможностей изобретения Григоренко дело так и не дошло.

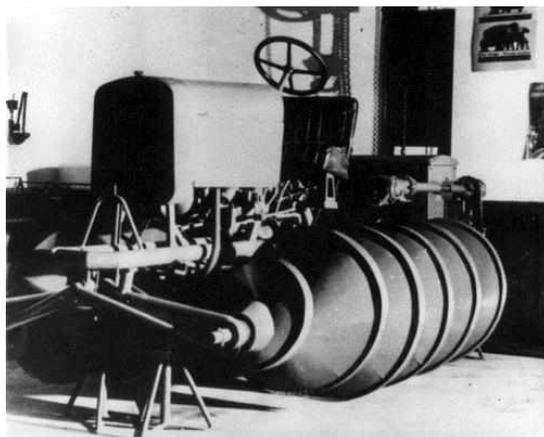


Рис. 18. SchneeMaschine Й. Рейделя (1944 г.)

Куда более радикальный подход к данной проблеме представил инженер-технолог производственной группы Специального экспериментально-производственного бюро Наркомата боеприпасов Б. Бекетов). Еще 29 августа 1942 г. в отдел изобретений Главного бронетанкового управления Красной армии поступило его предложение по разработке новой боевой машины. Бекетов предлагал построить «снежный танк» (рис. 20), по другим ис-

точникам «зимний танк». Автор проекта пытался создать боевую машину массой около 28 т и общей длиной примерно 7 м. Корпус ее представлял собой два соединенных цилиндра, на каждом из которых должны были быть установлены по две башни от танков Т-26. При этом шнековые двигатели занимали большую часть поверхности корпусов, выступая одновременно и в роли элементов бронезащиты.

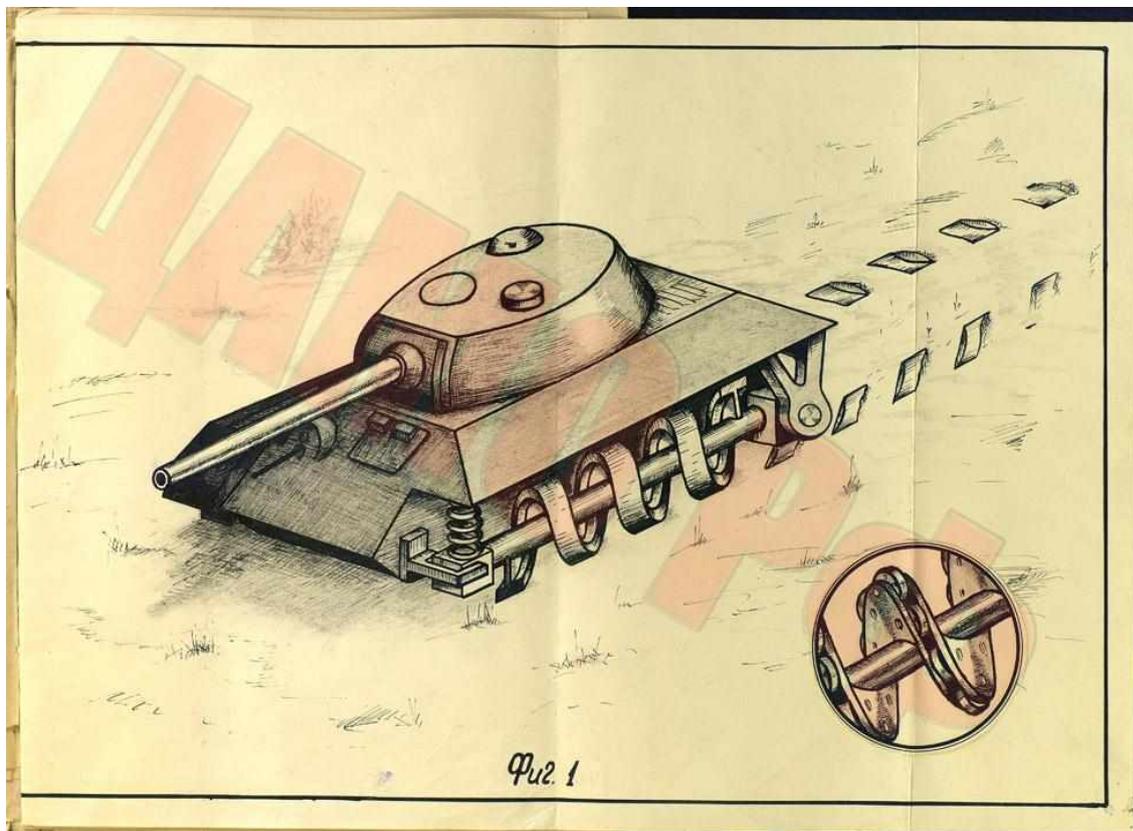


Рис. 19. Танк «Т34-шнекоход» Б. К. Григоренко (1944 г.) [Источник: http://lirate.ru/profile/posts/world_of_kwg/20129]

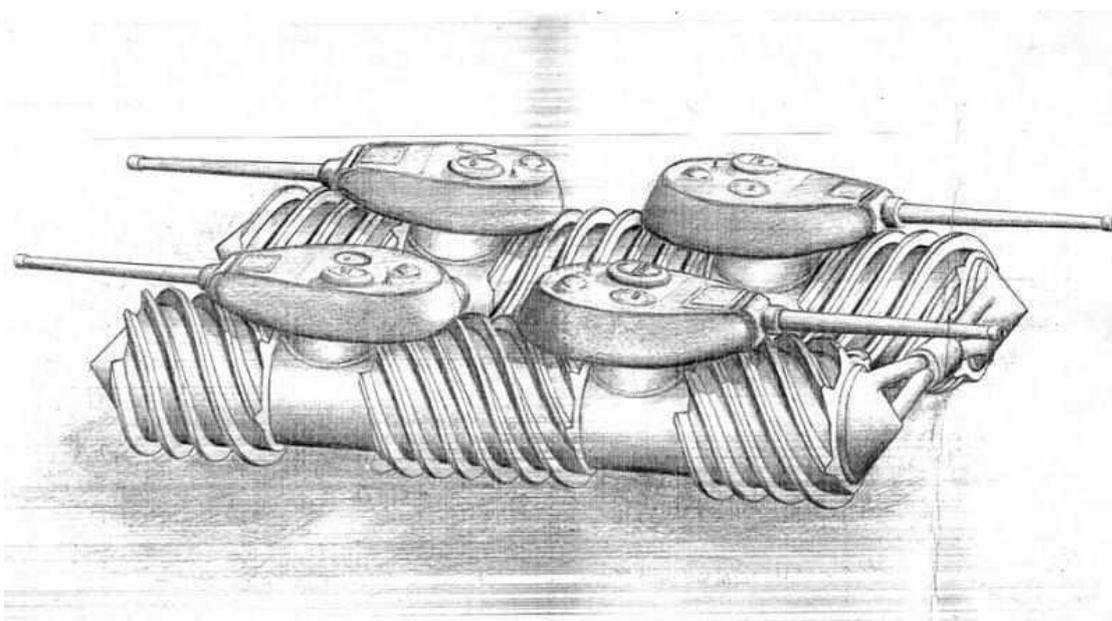


Рис. 20. Танк инженера Б. Бекетова (1942 г.) [Источник: <http://forum.rcpilot.ru>]

Сам движитель Бекетов решил разделить на несколько сегментов. Он полагал, что такое решение положительным образом скажется на живучести танка, особенно его ходовой части. За счет разного направления винтовых поверхностей правого и левого шнека танк мог бы двигаться как вперед или назад, так и вбок. Для поступательного перемещения требовалось обеспечить вращение шнеков в разные стороны, а для перемещения вбок – в одном направлении. Вероятно, предусматривалась и возможность поворота на месте за счет разной скорости или направления вращения передних и кормовых роторов. Приводить данную машину в движение должны были два авиационных мотора, развивающих мощность по 250 л.с. каждый, максимальная скорость оценочно составляла 45-50 км/ч.

Необходимо отметить, что к проработке своего «снежного танка» автор проекта подошел достаточно основательно. Помимо самого чертежа танка и его корпуса, в представленное им предложение входили также эскизы ходовой части и кинематическая схема связи движителя с корпусом. Он выполнил расчеты массы агрегатов «снежного танка». Однако в отделе изобретений посчитали, что у проекта отсутствуют перспективы.

Проект Бекетова был не самой радикальной идеей постройки боевого шнекохода. Не менее оригинальный проект такой боевой машины предлагал житель города Казани С. М. Кириллов в апреле 1943 г. Даже на фоне описанного выше «снежного танка» изобретение Кириллова казалось достаточно оригинальным. Он предлагал земноводные скоростные танки ЗСТ-К1 и ЗСТ-К2 (рис. 21). Однако, как и другие подобные проекты, они остались на бумаге.

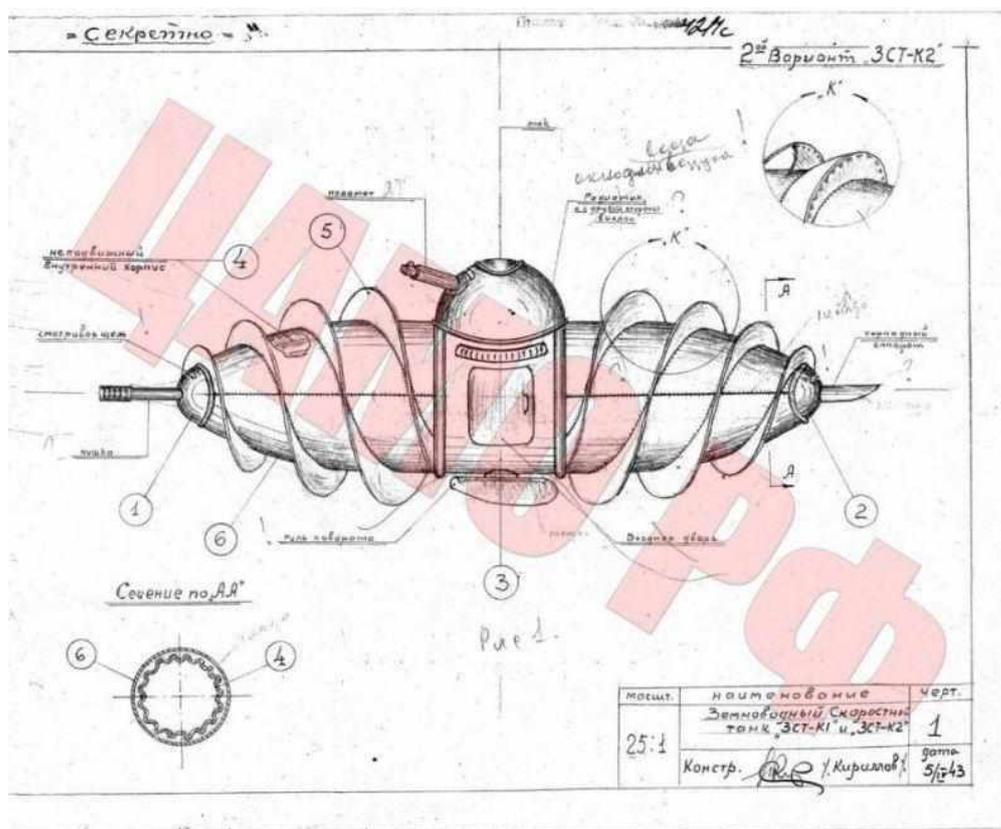


Рис. 21. Земноводный скоростной танк конструктора С. Кириллова (1943 г.)
[Источник: topwar.ru]

В послевоенный период с 1945 по 1980 гг. работы по созданию шнекоходов вновь активизировались. Однако боевые шнекоходы получили иное развитие, чем предлагали конструкторы из СССР. Возобновление работ по направлению создания боевых шнекоходов, а точнее, машин, оснащенных роторно-винтовым движителем (РВД) или РВ-двигателям, относится к периоду времен Вьетнамской войны.

Основными разработчиками и производителями транспортно-технологических машин (ТТМ) на роторно-винтовых движителях этого периода стали такие страны, как Россия (СССР), США, Голландия и Япония. Машины этого периода описаны в работах [1-23].

После окончания второй мировой войны, и вплоть до конца 60-х годов XX в., американские военные вложили огромные финансовые ресурсы в исследования конструкции РВД и оценки подвижности и производительности машин на РВ-двигателях.

В 1964 г. фирмой Chrysler (США) был создан снегоболотоход Marsh Screw (рис. 22, 23), который применялся для транспортирования грузов по воде через рисовые чеки и болота [1]. Машина была создана для обеспечения боевых действий войск США во Вьетнаме. Лёгкий алюминиевый корпус машины опирался на два металлических шнека. Скорость такого транспортного средства на воде составляла 12 км/ч, на снегу – 32 км/ч.



Рис. 22. Снегоболотоход Marsh Screw (1964 г.)

В 60-х годах XX в. компанией UNU (Япония) изготавливались роторно-винтовые болотоходы Dorothy типов *S* и *L* (рис. 24), которые отличались от других аналогичных машин тем, что имели четыре шнека (по два с каждого борта), причём каждая пара одного борта имела разное направление вращения и противоположные углы навивки спирали [1]. Эти машины использовались в качестве базового шасси, на котором устанавливалось оборудование для забивки свай и буровой установки.

В тот же период голландская фирма DAF выпустила опытную партию роторно-винтовых болотоходов Amfirol (рис. 25). Разработчиком конструкции этой машины был Д. Ж. де Баккер, владевший фирмой *Machiefabriek J.J. Baker* (Голландии). Машина имела оригинальную конструкцию управления курсовой ориентацией. Эта система управления позволяла не только изменять частоту вращения роторов, но и их установку, что давало более высокую маневренность.

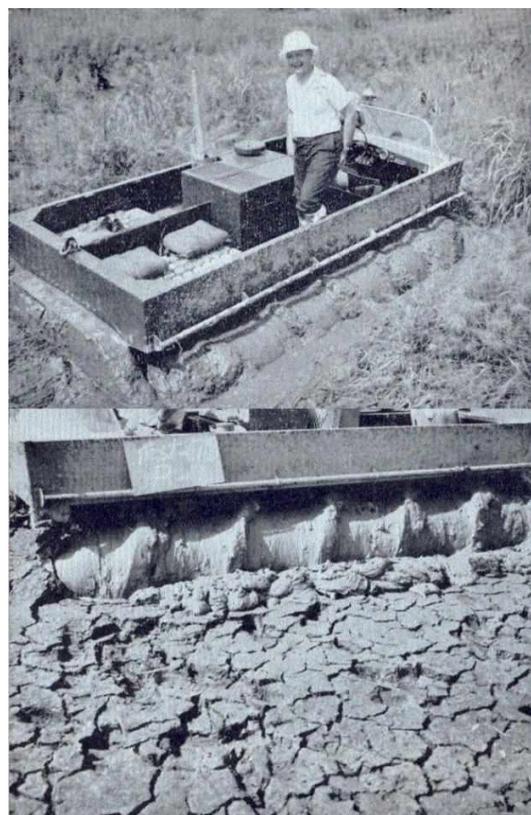
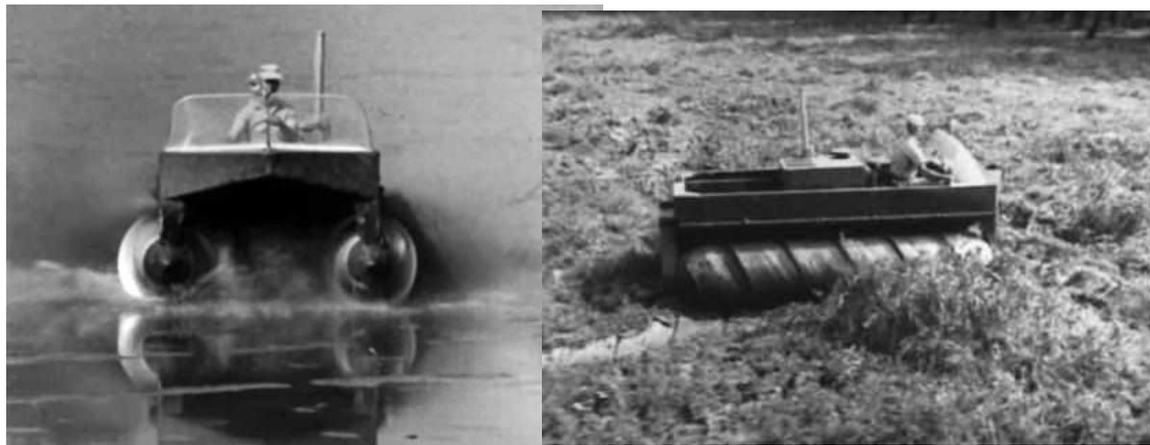


Рис. 23. Испытания Marsh Screw на заиленной местности

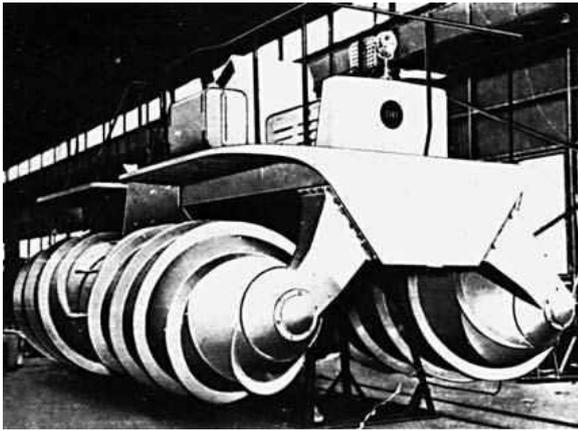


Рис. 24. Болотоход Dorothy L (1966 г.)

Amfirol мог двигаться боком при езде на твердых поверхностях путем вращения роторов в одном направлении. Другая интересная идея состояла в том, что шнеки, которые, как правило, устанавливаются параллельно друг другу, могли менять свой угол относительно продольной оси машины. Это позволяло направлять движение транспортного средства в нужном направлении, хотя кривизна поворота имела довольно большой радиус.

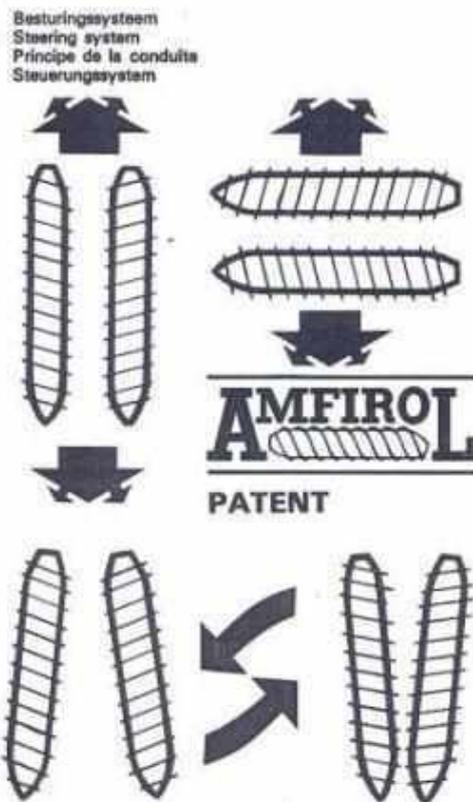
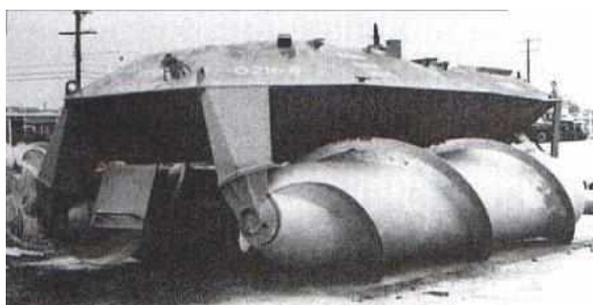


Рис. 25. Болотоход Amfirol (1966 г.)

Первые машины Amfirol имели по два двигателя фирмы DAF рабочим объемом 750 куб. см и трансмиссией Variomatic, по одному комплекту на каждую сторону. Впоследствии, судовой двигатель NSU Ro – 135, который обеспечивал энергией транспортное средство Amfirol, был заменен двигателем Ford с гидравлической трансмиссией Sundstrand.

К 1969 г. американской фирмой Chrysler для ведения боевых действий в болотистой и заиленной местностях, а также для движения по рисовым чекам Вьетнама была выпущена серия роторно-винтовых машин с общим названием Riverine Utility Craft, или RUC (рис. 26). Машина имела два шнека диаметром в 1 м, была оснащена двигателем Chrysler рабочим объемом 6,7 л. Программа испытаний RUC, осуществленная силами флота США, была проведена в Южной Луизиане и Юго-Восточной Азии. Для этих целей Chrysler построил 10 экземпляров RUC для морских пехотинцев, которые вели боевые действия во Вьетнаме в 1969 г., одна из этих машин была бронированной.

Результаты испытания машины RUC показали её способность перемещаться с хорошими скоростными качествами в слабонесущих (высокодеформируемых) средах. В воде скорость RUC составляла 25 и до 46 км/ч на болотистой местности, но только 7 км/ч на твердом дорожно-грунтовой основе.



Riverine utility craft

Рис. 26. Роторно-винтовые машины Riverine Utility Craft (1969 г.)

Проблема подвижности роторно-винтовых машин на твердых опорных основаниях занимала фирму Chrysler еще в 1965 г., в связи с чем ей была разработана машина с комбинированным шнеково-колесным движителем (рис. 27).

Период 1969–1970 гг. в области конструирования машин на РВД, кроме разработок фирмы Chrysler, известен тем, что японской фирмой Mitsui Engineering & Shipbuilding был построен Archimedean Screw Tractor (AST-001), который был прототипом десантного корабля, оснащенного РВД (рис. 28, а) и способного перемещаться как в море, так и в среде, именуемой шугой (смесь воды и битого льда).



Рис. 27. Модель транспортного средства фирмы Chrysler, оснащенного комбинированным движителем



а)



б)

**Рис. 28. Японские машины, оснащенные РВД Archimedean Screw Tractor
Фирмы Mitsui Engineering & Shipbuilding:
а – AST-001; *б* – AST-002**

В 1985 г. фирма Mitsui Engineering & Shipbuilding строит AST-002 (рис. 28, б) в двух экземплярах. На сегодняшний день из двух машин сохранилась только одна. Она имеет вес 11 т, приводится в движение дизельным двигателем V12 мощностью 300 л. с. и гидростатической трансмиссией, что обеспечивает скорость движения на льду - 11, и на воде 8 км / ч Archimedean Screw Tractor 002 мог перевозить 5 чел. экипажа. Машина предназначалась для эксплуатации как в северных, так и южных полярных широтах (рис. 29).



**Рис. 29. Эксплуатация AST-002
в полярных широтах и AST-001 постройки
1970 г. в экспозиционном павильоне на шоу
See Chap. Screw propelled vehicles в 2005 г.**

Первый отечественный опыт разработки машин, оснащенных РВД, как уже отмечалось, относится к 1900 г. – патент, выданный русскому изобретателю Ф. Дергинту.

В 1926 г. в СССР Крживицким А.А. были испытаны аналогичные зарубежные машины, а 1927 г. Ветчинкин Н.С. уже использовал их на вывозке леса (рис. 30).



Рис. 30. Трактор Fordson, оснащенный РВД на вывозке леса (1927-1929 гг.)



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 31. Мотонарты с РВД разработки ОНИ-ЛВМ:

а - ГПИ-16 (1963 г.); б - ГПИ-16ВА (1967 г.);
в - ГПИ-16ВС (1967); г - ГПИ-05 (1971 г.);
д - ГПИ-18Ш (1966 г.)

В дальнейшем, во второй половине XX в., в России (СССР) исследованиями и созданием машин на РВД занимались две научно-практические школы: московская на базе автомобильного завода им. Лихачева (ЗиЛ) и научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института (НАМИ), а также горьковская (нижегородская) на базе отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных (снегоходных) машин (ОНИЛВМ) и особого конструкторского бюро разработки льда, снега и мерзлого грунта (ОКБ РАЛСНЕМГ) Горьковского политехнического института им А.А. Жданова (сегодня НГТУ им Р.Е. Алексеева [1–23]).

Исследования по роторно-винтовым машинам в ОНИЛВМ ГПИ им. А.А.Жданова ведутся с начала 60-х годов прошлого века. Инициатором этих работ был участник Великой Отечественной войны, выпускник ГПИ 1951 г., старший преподаватель кафедры «Детали машин» института В.И. Вологдин [12, 20]. Первой его работой в этом направлении в 1963 г. были мотонарты ГПИ-16 (рис. 31). Практически это были мотонарты ГПИ-15 (разработки ОНИЛВМ ГПИ), на которых вместо гусеничного был установлен роторно-винтовой движитель. Машина показала хорошие ходовые качества и побудила В.И. Вологодина к созданию еще более легкой машины. В 1964–1965 гг. им была спроектирована и при его непосредственном участии изготовлена легкая плавающая одноместная машина ГПИ-16ВА (рис. 31, б). Машина имела стеклопластиковый корпус с лыжеобразной формой днища и расположенный в кормовой части мотоциклетный двигатель. С каждой стороны корпуса по всей его длине располагались роторы движителя. Для изменения направления движения был установлен небольшой поворотный подрез под задней частью днища.

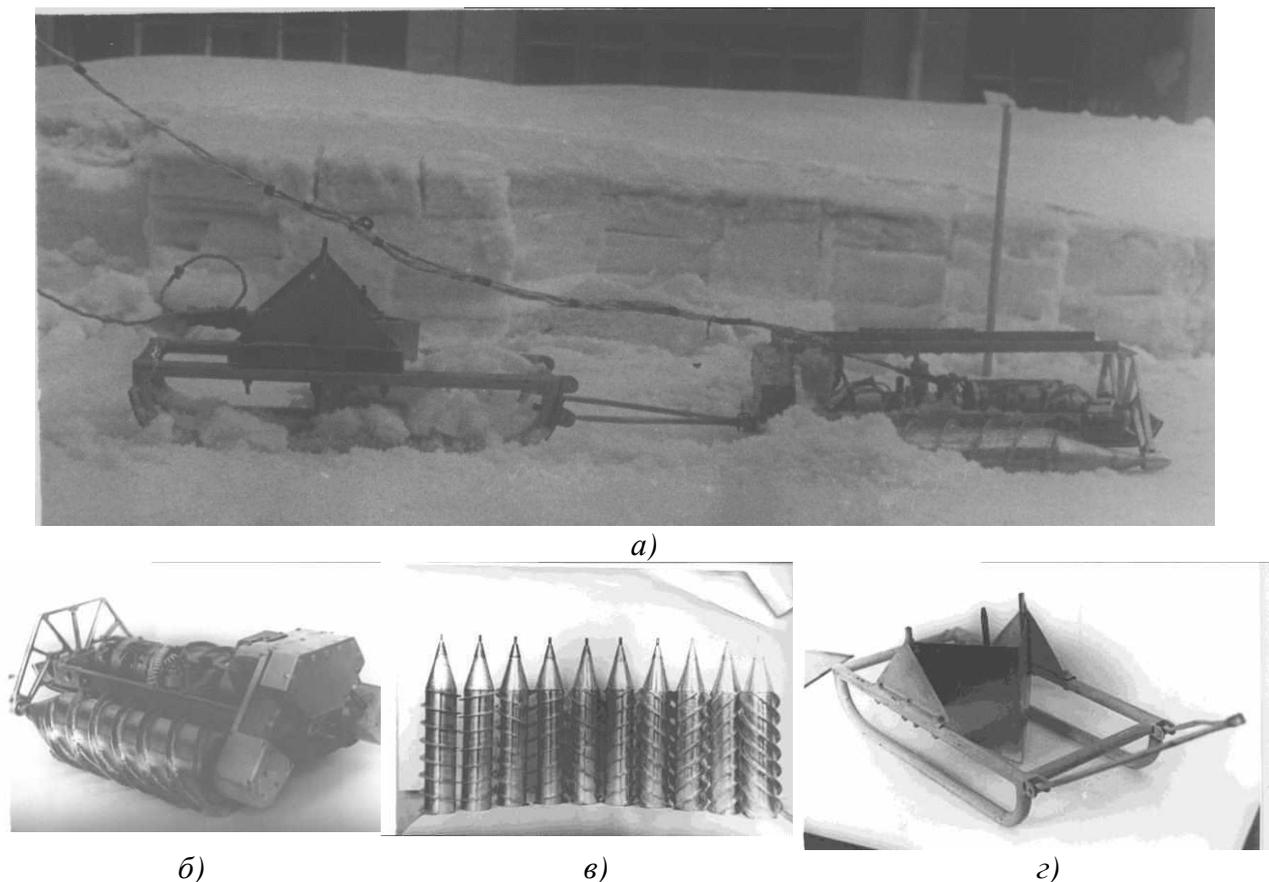


Рис. 32. Действующая модель РВД-машины во время испытаний (а), модель ВРД-машины (б), типы использованных во время испытаний шнеков (в), тормозные плужные сани (г)

Испытания показали, что роторно-винтовой движитель может обеспечить движение

машины по снегу с различной глубиной и плотностью (в том числе и на плаву), но из-за постоянных уводов и произвольных рысканий из стороны в сторону управляемость ее явно недостаточна. Чтобы разобраться в этом В.И. Вологдиным в 1967 г. была построена самоходная модель машины на РВД (рис. 32), на которой проведены большие экспериментальные исследования как различных схем роторно-винтовых движителей, так и многих вариантов роторов (шнеков).

Параллельно с этим велась разработка теоретических вопросов взаимодействия роторно-винтового движителя со снегом. В итоге вопросы устойчивости прямолинейного движения и управляемости машин с РВД были решены. К сожалению, из-за болезни В.И. Вологдину не удалось довести эти работы до защиты диссертации. Большую помощь В.И. Вологдину в этих работах оказывал старший инженер ОНИЛВМ В.И. Захаренков. В 1967 г. В.И. Захаренковым была спроектирована лыжно-шнековые мотонарты ГПИ-16ВС, а в 1971 г. мотонарты ГПИ – 05 (рис. 31, д). Это были более совершенные варианты машины ГПИ-16. Обе машины были сделаны, отправлены заказчику и долгое время эксплуатировались на Камчатке.

В течение ряда лет ОНИЛВМ и НИЛ РАЛСНЕМГ занимались актуальной проблемой, связанной с охраной окружающей среды. В соответствии с Постановлением Совета Министров РСФСР №600 от 30 ноября 1973 г. по плану внедрения передовой технологии и средств механизации в ОНИЛВМ были разработаны конструкции роторно-винтовых болотоходных машин (рис. 33).



Рис. 33. Роторно-винтовые болотоходные машины разработки ОНИЛВМ:
а – РВБ ГПИ-02 (1972 г.); *б* – РВБ ГПИ-06 (1974 г.); *в* – испытания РВБ ГПИ-06 на Москве-реке

Первой в этой серии машин на РВД была РВБ-ГПИ-02 (1972 г.). Машина была изготовлена и применена в Объединении Курьяновских станций аэрации (г. Москва) для обра-

ботки отстойных иловых площадок очистных сооружений. Ее испытания и опыт эксплуатации позволили создать машины РВБ-ГПИ-06 (1974 г.) и модификацию ГПИ-3906 с дизельным двигателем. Машина РВБ-ГПИ-06 отмечена бронзовой медалью ВДНХ СССР. Ведущим конструктором этих машин был В.И. Захаренков. В создании этих машин В.И. Захаренкову большую помощь оказывали В.И. Вологдин и С.А. Планкин.

В этот же период под руководством доктора технических наук А.Ф. Николаева в ОКБ РАЛСНЕМГ и на кафедре «Строительные и дорожные машины» ГПИ им А.А. Жданова работы по данной тематике также получают успешное развитие. Коллективами этих подразделений были созданы роторно-винтовые машины (рис.34): ЛФМ-66 (1968 г.), ЛФМ-72 (1971 г.), ПТВ-84 (1972 г.), РВВП-68 (1972 г.), ЛФМ-75 (1973 г.), РВТ-85 (1977 г.), ВМ-99 (1976 г.), СЛУ-119 (1981 г.). Машина ЛФМ-66 выполнена на базе серийно выпускавшегося гусенично-транспортера ГАЗ-47.



а)



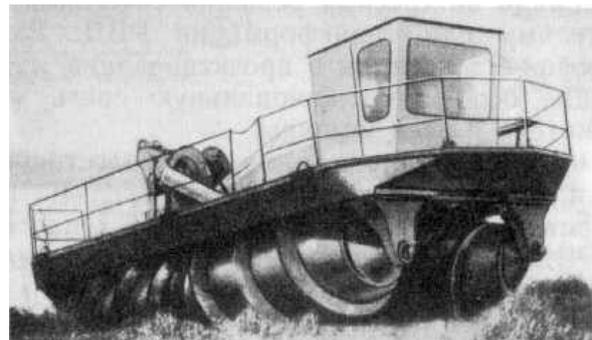
б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 34. Машин оснащенные РВД разработки ОКБ «РАЛСНЕМГ» ГПИ им А.А. Жданова:

- а - ЛФМ-66 (1968 г.);
- б - ЛФМ-72 (1971 г.); в - РВВП-68 с разгрузкой РВД воздушной подушкой (1972 г.); г - ЛФМ-75 (1973 г.);
- д - ВМ-99 (1976 г.); е - СЛУ-119 (1981 г.)

В 1978 г. В.Е. Колотилин подводит некоторые итоги научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по машинам на РВД, проводимых в ОКБ РАЛСНЕМГ ГПИ им. А.А. Жданова в кандидатской диссертации «Исследования процессов взаимодействия роторно-винтового движителя ледово-фрезерной машины со снежным покровом и динамических нагрузок в ее силовом приводе». Одновременно с ним Левшунов Л.С. проводит исследования устойчивости прямолинейного движения и процессов поворота машин на РВД. Он создает методику расчета моментов сопротивления повороту для разных схем РВД-двигателя. Исследования Л.С. Левшунова также завершаются успешной защитой кандидатской диссертации на тему «Исследование поворота машин с роторно-винтовым движителем» в 1980 г. Следом за его работой в 1988 г. сотрудник кафедры «Строительные и дорожные машины» (СДМ) Кошурина А.А. защищает кандидатскую диссертацию на тему «Методы снижения сопротивления движению роторно-винтовых машин». В 1989 г. сотрудник той же кафедры В.А. Шапкин защищает кандидатскую диссертацию «Разработка статистического метода оценки колебаний роторно-винтовых машин и пути снижения их уровня при движении по заснеженным основаниям».

По этой же тематике были защищены кандидатские диссертации Ю.В. Щербаковым («Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров движения подводного транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем» (1999 г.)), И.А. Ерасовым («Оценка влияния конструкционных параметров роторно-винтовой машины на стабилизацию движения» (2000 г.)), И.Г. Кулиной («Разработка методики расчета колебаний и параметров упругой подвески транспортно-технологических роторно-винтовых машин при движении по льду» (2001 г.)).

Помимо работ напрямую связанных с исследованием РВД-двигателей, в 1997 г. сотрудником Нижегородского ГТУ Молевым Ю.И. была защищена диссертация на тему «Прогнозирование экологических последствий воздействия снегоходной техники на окружающую среду», а в 1998 г. Вахидовым У.Ш. «Влияние использования снегоходных машин в весенне-осенний период на изменение урожайности растений», в которых обосновывалась экологичность машин, оснащенных РВД, и оценивалась влияние РВД-двигателя на урожайность и всхожесть сельскохозяйственных культур.

Большое теоретическое и практическое значение имеют работы бывшего сотрудника НГТУ им. Р.Е. Алексеева доктора технических наук, профессора А.П. Куляшова. В 1970 г. Анатолий Павлович защищает в совете при ГПИ кандидатскую диссертацию на тему «Исследование некоторых вопросов тягово-сцепных качеств и управляемости машины на роторно-винтовом движителе (типа ЛФМ-РВД-ГПИ-66)». В 1986 г. многолетние исследования ОКБ РАЛСНЕМГ, ОНИЛВМ, НИЛ ССДМ и кафедры «Строительные и дорожные машины» были обобщены им в докторской диссертации «Специальные строительные и дорожные машины с роторно-винтовым движителем». В этой работе были исследованы критерии оценки поведения машин с роторно-винтовыми движителями в различных эксплуатационных условиях. Им были созданы основы теории движения машин такого типа. Базируясь на закономерностях взаимодействия опорных сред с РВД движителем, А.П. Куляшов обосновал возможности улучшения их опорно-тяговых качеств. Логическим продолжением этих исследований явилась работа доцента кафедры СДМ Шапкина В.А. «Основы теории движения машин с роторно-винтовым движителем по заснеженной местности». Диссертационное исследование было представлено на соискание ученой степени доктора технических наук и успешно защищена в 2001 г. В ней автор обобщил теоретические и экспериментальные исследования в области движения вездеходных машин с роторно-винтовым движителем.

К этому же периоду времени относится разработка транспортного средства высокой проходимости (снегоболотоход), созданная специалистами МИНГ им. Губкина, которое имело вид специализированного тягача для использования при строительстве магистральных трубопроводов (рис. 35).



Рис. 35. Снегоболотоход на РВД разработки МИНХ им. Губкина

Работы по созданию машин, оснащенных РВД, на Заводе им. Лихачёва (ЗиЛ) начались в 1966 г., когда главный конструктор специального конструкторского бюро ЗиЛ Грачев В.А. предложил ведущим специалистам СКБ посмотреть каким-то образом полученный фильм. В 12-минутной ленте демонстрировались возможности американского болотного вездехода MSA, разработанного фирмой «Крайслер» по заказу военных для использования в боевых действиях во Вьетнаме.

Создаваемая машина получила официальное обозначение ШН-67 и неофициальное «Шнек» (рис. 36, а). Снегоболотоход ШН-67 был оснащен двигателем ЗиЛ-375Я с гидромеханической коробкой передач ЗиЛ-135Л, который для лучшего расположения центра тяжести установили за кабиной в середине рамы. Для распределения крутящего момента по бортам на шнекоходе применили главную передачу с механизмом поворота гусеничной машины М-2 (ОКБ ММЗ). Бортовые передачи - реверс-редукторы с шестернями от бортовых передач ЗиЛ-135Л. В качестве движителя использовались два шнека, размещенные по бортам. Они представляли собой полые цилиндры с конусами на обоих концах, изготовленные из стального листа толщиной 2 мм. На наружной поверхности цилиндров выполнили винтовой грунтозацеп, в разрезе представляющий собой трапецию. На внутренние поверхности шнека для увеличения жесткости были приварены металлические кольца. Также для увеличения жесткости на внутреннюю поверхность шнека напылили слой пенополиуретана толщиной около 100 мм (для удобства напыления шнеки спроектировали разборными). Конуса со шнеком соединялись с помощью болтов. Для передачи крутящего момента от бортовых карданов к шнекам служили реверс-редукторы, обеспечивающие, кроме изменения направления движения, также разворот на месте и возможность движения боком при вращении шнеков в одном направлении. Муфты переключения реверс-редукторов управлялись дистанционно.

По результатам испытаний было решено усовершенствовать шнекоход. Вместо сильно изнашиваемых стальных шнеков на новом образце, получившем обозначение ШН-68 (рис. 36, б), установили шнеки из алюминиевого сплава АМГ-61 с углом подъема винтовой линии $32^{\circ}30'$, с двухзаходным грунтозацепом, имеющим шаг 1600 мм и треугольный профиль высотой 100 мм. ШН-68 был собран в марте-апреле 1968 г. 6 мая состоялась его проба на водоеме в районе Лыткарино. На плаву была достигнута скорость 12 км/ч. Однако на испытаниях был отмечен и характерный недостаток машины в процессе выхода шнекохода на

берег. Зимние испытания ШН-68 проводились в северной части Пермской области в районе города Березники с 9 марта по 5 апреля 1969 г. на сыпучем (фирновом) снегу при средней температуре атмосферного воздуха $-8 - -4^{\circ}\text{C}$ и глубине снега 900–1100 мм. Скоростные и тяговодинамические испытания проходили при массе шнекохода 3750, 4250 и 5000 кг.



а)



б)

Рис. 36. Машины на РВД разработки ЗиЛ:

а – ШН-67 (1967 г.); б – ШН-68 (1968 г.)

Испытания роторно-винтового вездехода заинтересовали ученых Киевского автомобильно-дорожного института (КДЦИ). Для них в СКБ ЗиЛ был спроектирован и изготовлен специальный стенд для исследования роторно-винтового движителя (ведущий конструктор - В.В. Цырульников), на котором ученые КДЦИ (д.т.н. Г.Б. Безбородова, к.т.н. Н.Ф. Кошарный и аспирант Р.А. Хабутдинов) выполняли исследования моделей роторно-винтовых движителей с различными диаметрами роторов и углами подъема винтового грунтозацепа.

Успешно проведенные испытания макетного образца снегоболотохода ШН-68 вызвали интерес к машине такого типа со стороны поисково-спасательной службы (ПСС) ВВС. По техническому заданию ПСС ВВС в СКБ ЗиЛ начались работы по созданию опытного образца снегоболотохода с роторно-винтовым движителем, получившего обозначение ПЭУ-3 (или 4904), способного производить спасательные работы на болотах, замерзших водоемах и снежной целине без ограничения глубины снега, эвакуировать как космонавтов, так и спускаемые аппараты. Машина была построена в 1972 г. (рис. 37).



Рис. 37. Машина на РВД производства СКБ ЗиЛ – ПЭУ-3 (1972 г.)

Поисково-эвакуационные колесные установки первого типа были разработаны СКБ ЗиЛ - это колесные полноприводные машины ПЭУ-1 и ПЭУ-2. Учитывая результаты испытаний опытных транспортных средств с нетрадиционными типами движителей, проходивших в СКБ ЗиЛ в 1966–1968 гг., для создания поисково-эвакуационной установки второго типа было решено использовать роторно-винтовой движитель.

В соответствии с техническим заданием СКБ ЗиЛ предстояло создать две модификации шнекового снегоболотохода, получившего наименование ПЭУ-3. Пассажирскую модификацию ПЭУ-3А (рис. 38) предполагалось оборудовать салоном со спальными местами, кухней, шкафами и т.д. В кабине планировалось разместить поисково-навигационное оборудование и приборы связи, а в кормовой части машины - устройство для жесткой сцепки с грузовым снегоболотоходом ПЭУ-3Б (рис. 39), который должен был оснащаться погрузочным устройством (гидравлическим подъемником) и ложементом для транспортировки специальных систем.

Летний этап испытаний прошел в июне-августе 1972 г. Скоростные, тягово-динамические и экономические испытания проводились без груза и с 2,5-т нагрузкой. Для сравнения в испытаниях участвовали шнекоход ШН-68 и гусеничный транспортер ГАЗ-71. Без груза снегоболотоход 4904 развил скорость 10,1 км/ч на воде, 7,25 км/ч на болоте, покрытом водой (глубиной до 500 мм), и 4,45 км/ч на сплаvine, заросшей высокой осокой, камышами и кустарником. С грузом в этих условиях скорость составила: 9,25 км/ч - на воде, 7,1 км/ч - на покрытом водой болоте, 3,2 км/ч - на сплаvine. Максимальная тяга на швартовых равнялась 1430 кг без груза и 1720 кг с грузом. Тяга на покрытом водой болоте достигла 1780 кг без груза и 1330 кг с грузом. Максимальная тяга снегоболотохода с грузом 2,5 т была получена на входе в болото с глинистым дном и составила 11070 кг. Гусеничный транспортер ГАЗ-71 на сплаvine двигаться вообще не мог.



Рис. 38. Автопоезд с ПЭУ-3А

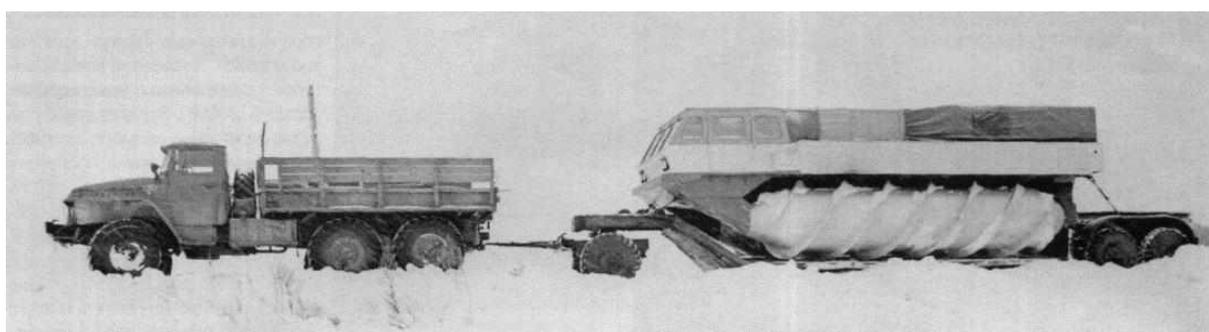


Рис. 39. Автопоезд с ПЭУ-3Б

26 июля на испытаниях присутствовали начальник отдела управления ВВС В.М. Романенко, старший военпред завода Ю.В. Исполатов, ученые Академии БТВ А.П. Степанов и Я.С. Агейкин. В процессе ходовых испытаний была отмечена недостаточная маневренность ПЭУ-3А при движении по сплаvine по сравнению со ШН-68. При повороте машина стремилась уходить в сторону наименьшего сопротивления. Движение на воде по заданному курсу при скорости бокового ветра более 4-5 м/с производилось с частыми подруливаниями из-за большой парусности снегоболотохода.

В качестве машины сверхвысокой проходимости для поисково-спасательного ком-

плекса «490» в соответствии с результатами исследований 1966-1972 гг. был выбран снегоболотоход с роторно-винтовым движителем, который одинаково хорошо и с высокой скоростью мог бы преодолевать снежный покров любой глубины и болото с полыньями. Малые размеры машины (длина 3,8 м, ширина 2,3 м) были обусловлены габаритами грузового отсека колесного вездехода ЗИЛ-4906, на котором ее предполагалось доставлять к месту работы. По проекту, ЗИЛ-4906 перевозил снегоболотоход в своем грузовом отсеке до тех пор, пока мог двигаться. Когда местность становилась непроходимой, шнекоход с помощью штатной крановой установки сгружался на грунт. Дальше он самостоятельно продолжал поиск спускаемого аппарата (СА), эвакуировал космонавтов и буксировал СА на гибкой сцепке до колесных машин комплекса «490».

Предварительная компоновка шнекохода, получившего заводское обозначение ЗИЛ-2906 (рис. 40), была выполнена 20 августа 1973 г. С целью максимального снижения массы и простоты конструкции нового вездехода для него решили использовать два двигателя МемЗ-967А воздушного охлаждения мощностью по 37 л.с. от легкового автомобиля «Запорожец», которые с помощью агрегатов трансмиссии должны были приводить в движение каждый свой шнек. В открытой пассажирской кабине предусматривались сидячие места для двух членов экипажа и два лежачих места для космонавтов.

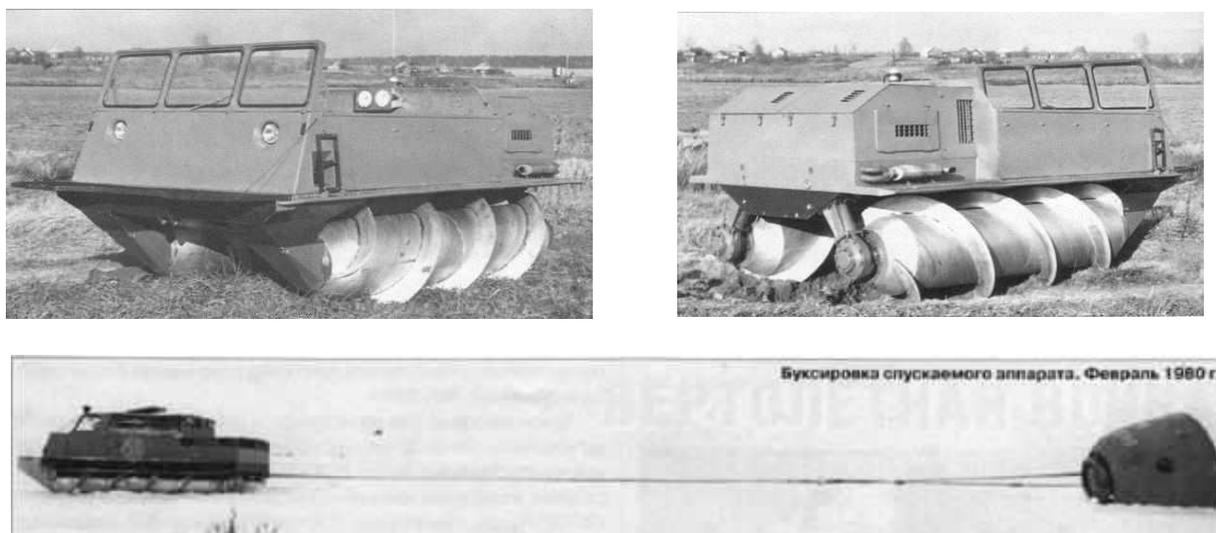


Рис. 40. Машина на РВД ЗИЛ-2906 (1975 г.)

21 августа 1975 г. ЗИЛ-2906 начали обкатывать на воде на прудах рыбхоза «Нара». Почти сразу выявилось множество дефектов в работе мелитопольских двигателей. При движении по воде они работали на полную мощность, но недостаточно высокая максимальная скорость машины (10-12 км/ч) не давала возможности встречному воздушному потоку охлаждать их в нужном объеме.

В октябре снегоболотоход испытывался на болотах и спущенных прудах. И здесь двигатели проявили себя не лучшим образом. Развиваемой мощности, ввиду увеличившегося сопротивления, не хватало. Двигатели часто выходили из строя. Для увеличения удельной мощности и повышения надежности машины было принято решение использовать два двигателя жидкостного охлаждения от автомобиля «Жигули». Однако они не могли быть размещены без серьезной перекомпоновки в моторном отсеке ЗИЛ-2906 - фактически, надо было проектировать новую машину.

Тем не менее 17 марта 1976 г. шнекоход ЗИЛ-2906 вместе с машинами комплекса «490» отправился на зимние испытания в Рыбинск. Здесь он уверенно преодолевал 24°-ные подъемы и спуски, весьма проворно передвигался по заросшему лесом косогору с глубиной снега до 700 мм. В целом испытания прошли удачно.

Испытания шнекового снегоболотохода ЗИЛ-2906 выявили его многочисленные не-

достатки, главным из которых являлась низкая удельная мощность. Зимой, при температуре ниже -25°C , двигатели плохо запускались. При движении по воде наблюдалась недостаточная остойчивость шнекохода при маневрировании. Открытая кабина не защищала экипаж от осадков, пыли и ветра. В результате специалисты СКВ ЗИЛ пришли к выводу о необходимости разработки усовершенствованного образца роторно-винтового шнекохода.

По замыслу разработчиков, новый шнекоход, получивший заводское обозначение ЗИЛ-29061 (рис. 41), должен был быть несколько больше ЗИЛ-2906, что, с одной стороны, повышало его остойчивость на воде и устойчивость при движении по крутым заснеженным оврагам, а с другой - позволяло установить на машину два более мощных двигателя жидкостного охлаждения от легкового автомобиля ВАЗ-2103. Для транспортировки на грузовой амфибии ЗИЛ-4906 шнекоход предполагалось оснастить съемными лыжами, а для уменьшения размеров по высоте допускался демонтаж съемного каркаса рубки.

Сразу после завершения сборки (1 июня 1979 г.), осуществили взвешивание шнекохода на механическом участке СКБ ЗИЛ. Сухая масса изделия составила 1690 кг, снаряженная масса - 1855 кг, полная масса (включая четырех человек и 97 кг дополнительного снаряжения) - 2250 кг. При скоростных испытаниях на чистой воде (глубина 2,4 м) ЗИЛ-29061 с экипажем из двух человек развил максимальную скорость 14,9 км/ч, ЗИЛ-2906 - 10,2 км/ч, а ГАЗ-71 - 3,9 км/ч. На илистом участке длиной 200 м и глубиной 0,5-0,7 м ЗИЛ-29061 с экипажем из четырех человек достиг скорости 11,3 км/ч, ЗИЛ-2906 - 6,6 км/ч, а ГАЗ-71 (при двух членах экипажа) - 13,1 км/ч.

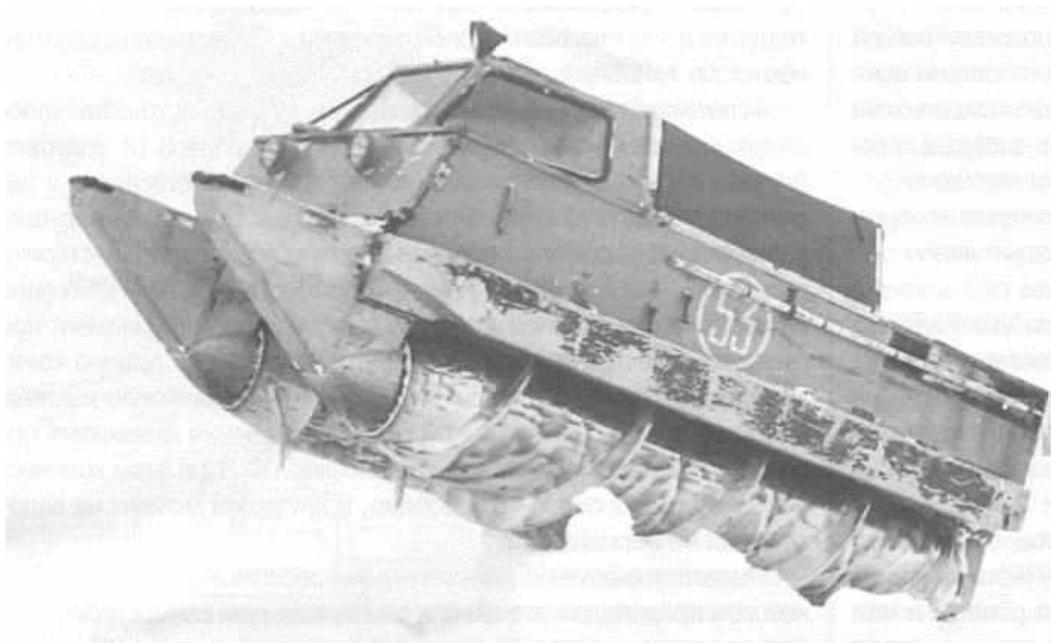


Рис. 41. Машина РВД –ЗИЛ-29061 (1979 г.)

Зимние климатические испытания проходили с 23 января по 25 февраля 1980 г. в районе Воркуты, где шнекоход проработал более 128 ч на снежной целине. При температуре -15°C , глубине снега 600-1000 мм и нагрузке 4 человека максимальная скорость ЗИЛ-29061 на мерном 200 м участке составила 25,4 км/ч. Расход топлива при скорости 11 км/ч и нагрузке 2-4 человека был равен для двух двигателей 22 л/ч, при нагрузке 6 человек - 24 л/ч; при скорости 16 км/ч - 27 л/ч, при скорости 20 км/ч - 27-33,8 л/ч. В 1984 г. на опытный образец шнекохода установили два двигателя ВАЗ-2106 мощностью по 80 л.с. и новые агрегаты трансмиссии (коробки передач, дополнительные коробки передач, бортовые редукторы). Машину оборудовали дополнительным люком, выполненным в тенте над головой второго члена экипажа. Моторный отсек оснастили опытным подогревателем модернизированной системы предпускового подогрева двигателей с электрической водяной помпой.

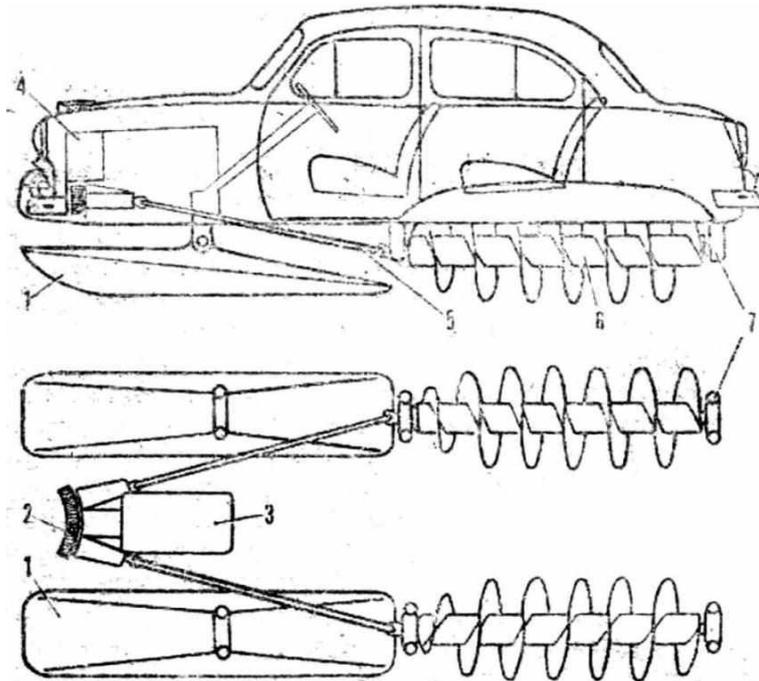


Рис. 42. Винтовой движитель конструкции П. Г. Гаврилова и его шнекоход на базе автомобиля «Победа» М20:

1 – управляемая ложка; 2 – редуктор; 3 – двигатель; 4 – радиатор и вентилятор системы охлаждения; 5 – карданный вал; 6 – шнековый движитель; 7 – опорный подшипник

В начале 1990-х гг. в СКВ ЗИЛ разработали модернизированный вариант шнекохода ЗИЛ-29062 по заказу государственной корпорации «Транснефть». Проект был успешно защищен, но когда вопрос встал об организации серийного производства нового шнекохода, к нему потеряли интерес как руководство завода, так и заказчик. В итоге корпорация «Транснефть» для доставки ремонтных бригад и обслуживания трубопроводов приобрела в составе комплекса «490» один серийный ЗИЛ-29061.

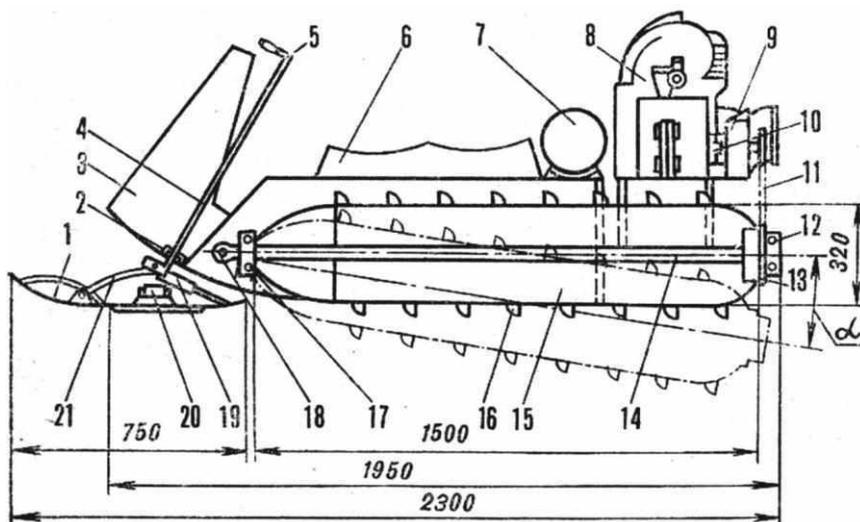


Рис. 43. Схема шнекоход П. В. Олейникова:

1 – управляемая ложка; 2 – упорный подшипник рулевой колонки; 3 – корпус; 4 – рулевая колонка; 5 – руль; 6 – сиденье водителя и пассажира; 7 – бензиновый бак; 8 – двигатель; 9 – редуктор; 10 – муфта соединения двигателя с редуктором; 11 – цепь привода шнека; 12 – подшипник; 13 – ведомая звездочка; 14 – ось шнека; 15 – шнек; 16 – винтовые зацепы; 17 – передний подшипник; 18 – поворотная ось рамы шнека; 19 – амортизатор; 20 – упорная резиновая подушка; 21 – рессора; α – угол отклонения рамы шнека по отношению к корпусу



Рис. 44. Машины на РВД для различных отраслей реального сектора экономики



Рис. 44. Окончание

Не обошли вниманием роторно-винтовой движитель и любители технического творчества. В 1965 году инженер П. Г. Гаврилов из Темиртау предложил переоборудовать стандартный автомобиль «Победа», установив на нем два шнека и передние управляющие лыжи (рис. 42). Шнеки монтировались на специальных кронштейнах без элементов амортизации и приводились во вращение карданными валами, идущими от закрепленного на двигателе редуктора с угловыми шестернями.

Тому же автору принадлежит проект лыжно-винтовой машины, в которой шнековые барабаны имели пневмогидравлические амортизаторы, что улучшало сцепление движителя с грунтом на неровностях пути.

В 1973 году инженер П. В. Олейников из поселка Зареченский Мурманской области построил шнеконарты КРАБ-1 (рис. 43). Надо отдать должное настойчивости любителя технического творчества: потребовались три года, чтобы сделать машину не только работоспособной, но и надежной: она эксплуатируется в течение всего зимнего периода без поломок.

Дополнительно можно отметить, что в частном порядке на предприятиях горной промышленности и базах милиарации и станциях аэрации создавались различные образцы специальных транспортно-технологических машин, оснащенных роторно-винтовыми движителями (рис. 44).

На этом заканчивается практический этап создания отечественных машин на роторно-винтовых движителях. Однако теоретические и проектно-конструкторские работы по созданию машин на РВД в НГТУ им Р.Е. Алексеева продолжают в рамках различных государственных контрактов и внебюджетных договорных работ. Аналогичные работы возобновились и зарубежом, в частности, в Австралии.

Сегодня в мире практически не существует фирм, выпускающих серийно машины на РВД, хотя их потребность постоянно присутствует в реальном секторе экономики и в области деятельности, связанной с ликвидацией последствий природных и техногенных катастроф.

Одной из машин на РВД-двигателях, выпускаемой серийно, является «MudMaster» - «повелитель грязи» (рис. 45). Она производится по спецзаказам австралийской компании Residue Solutions. Фирма обещает построить шнекоход в соответствии со всеми требованиями заказчика и доставить машину в любую точку мира.



Рис. 45. MudMaster от австралийской компании Residue Solutions - единственный на сегодняшний день шнекоход, собирающийся серийно

В настоящее время машина на РВД «MudMaster» используется на Николаевском глинозёмном заводе, где для хранения отработанного шлама применяется «мокрый метод», который требует перемешивания слоёв, так же, как на станциях аэрации. Для этих целей и применяется шнекоход.

Другой современной разработкой машины на РВД является «АМФИ-САТ» (рис. 46) австралийских производителей «Technology by Josef Pasteiner». Машина оснащена специальным технологическим оборудованием для выполнения разнообразных милиаративных работ [Источник: <http://www.amphi-cat.com>].



Рис. 46. Машина на РВД «АМФИ-САТ»

Одной из проблем машин на РВД является их крайне не удовлетворительная возможность передвижения по недеформируемым опорным основаниям и, в частности, по искусственным дорожным поверхностям повышенной несущей способности, т.е. бесполезность в любой «цивилизации». Это требует создания специальных дорожных платформ для перевозки машин, оснащенных РВ-двигителем (рис. 38, 39 и 46). Следом за этой проблемой возникает задача разгрузки машин на РВД с транспортных платформ на месте их эксплуатации. Для этого используются мобильные крановые установки или платформы, оснащенные разгрузочными устройствами (рис. 47).



Рис. 47. Транспортировка и разгрузка машины на РВД – ЗиЛ-2906



Рис. 48. «Земснаряд-шнекоход» с технической системой саморазгрузки с транспортной платформы (Украина, Днепропетровск 2015 г.)



Рис. 49. «Ice Challenger»

Современные тенденции создания машин на РВ-двигателях предполагает обеспечение их техническими системами саморазгрузки. Примером такой машины является «Земснаряд-шнекоход» (рис. 48) [Источник: <http://zemsnaryad.net>]. Данная машина спроектирована и эксплуатируется в Днепропетровске (Украина). Как утверждают её создатели, она обладает непревзойденной проходимостью по болотистой местности и возможностью движения по любым слабонесущим поверхностям, воде, снегу. Машина имеет рамную конструкцию и водоизмещающий кузов. Скорость передвижения «Земснаряда-шнекохода» варьируется в зависимости от условий движения в диапазоне 0,2...8 км/ч. Шнекоход обладает возможностью двигаться боком, совершать развороты на месте. Для движения по твердым поверхностям предусмотрены колеса аутригеров и подкатная тележка. На машине установлен двигатель –

турбодизель мощностью 122 л/с. В качестве технологического оборудования «Земснаряд-шнекоход» оснащен сменными насадками для широкого спектра работ: ковшом 0,25 куб. м., режущим землесосом, граблями.

Дальнейшее развитие этого вида вездеходов лежит в универсализации конструкции движителя. Например, в создании комбинированных движителей. Примерами таких машин могут служить вездеходы: колесно-шнековая конструкция фирмы Chrysler (рис. 26) и РВВП-68 с разгрузкой шнека воздушной подушкой производства ГПИ им. А.А. Жданова (рис. 34, в). В двухтысячных годах специалисты из компании Wolfson Unit, расположенной в Саутгемптоне США, под руководством Barry Deaking в содружестве со Scott Polar Research Institute (SPRI) из Кембриджа, принимая участие в проекте «Snowbird 6», спроектировали и построили универсальный вездеход «Ice Challenger» (рис. 49), способный двигаться как на шнеках, так и на гусеницах [Источник: <http://www.porpmech.ru>].



Рис. 50. Универсальная машина на РВД изобретателя Бурдина

За базу «Ice Challenger» был взят небольшой гусеничный вездеход «Bombardier 160с», к которому по бокам прикрепили два шнека большого диаметра. Когда нужно было перейти от гусеничного хода к шнековому, роторы опускались ниже гусениц – и машина превращалась в шнекоход. Машина оснащена шестицилиндровым двигателем «Perkins». Трансмиссия машины «Ice Challenger» - гидравлическая.

В 2002 году экспедиция в составе шести человек на «Ice Challenger», под руководством Стива Брукса (Steve Brooks), успешно преодолела Берингов пролив из поселка Провидения на Чукотке вплоть до города Ном на Аляске - 350 миль за восемь дней. Машина выполнила свое предназначение, показав высокую степень подвижности, перемещаясь успешно как по льду, шуге, так и по воде.

Это эксклюзивное решение, а вот идею, которая может привести к распространению шнекоходов, выдвинул и запатентовал Санкт-Петербургский изобретатель Алексей Бурдин.

В конструкции Бурдина (рис. 50) между лопастями архимедова винта на ротор натянута длинная червеобразная камера. Когда вездеход находится в режиме шнека, она сдута. Когда же в нее поступает воздух (или вода), камера заполняет собой межлопастное пространство и превращает шнеки в обычные колеса [Источник: <http://techvesti.ru/>].

Чтобы не быть голословным, Бурдин построил и действующий образец вездехода с 1,5-киловаттными электроприводами на передний и задний шнеки. У конструкции есть несколько проблем, которые можно решить, используя современные технологии. *Во-первых*, сильный износ сдутых камер при работе в режиме шнека. Следует использовать высокопрочную армированную резину и сокращаемый по длине протектор. *Вторая* проблема - необходимость обеспечения в конструкции поворотного корпуса, потому что в режиме шнека вездеход движется по одной траектории, а в режиме качения - по перпендикуляру к ней.

Подобный проект был разработан М.Г. Беккером (M.G. Bekker) совместно с Говардом А. Уилкоксом (Howard A. Wilcox) в 1967 году, на который был получен патент США (US3354861). На рис. 51 представлена выдержка их патента на роторно-винтовую машину Беккера-Уилкокса.

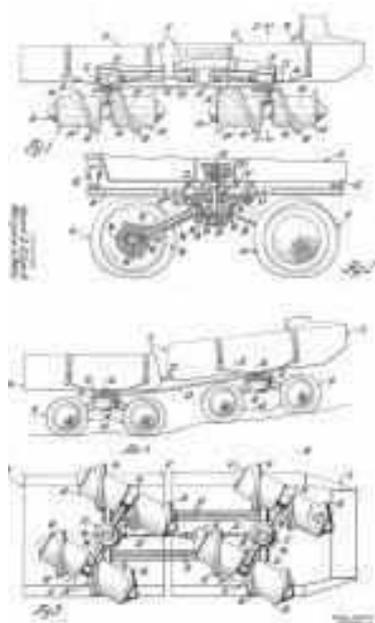


Рис. 51. Проект машины на РВД Беккера-Уилкокса (1967 г. патент США - US3354861)



Рис. 52. Модели машин на РВД, разработанные и испытанные М.Г. Беккером (1961 г.)

Транспортное средство, показанное в патенте, является сочлененным, т.е. две его части, шарнирно соединенные и имеющие возможность движения в тангаже и крене. Каждая часть машины получает два винтовых понтона РВ-двигателя, которые могут вращаться, чтобы обеспечить курсовую ориентацию транспортного средства и перейти от машины на РВД, работающей в грязи или снегу, к колесной машине для передвижения по твердой поверхности, если понтоны РВ-двигателя повернуть на 90°.

Когда М.Г. Беккер разрабатывал проект планетохода для передвижения на Луне и Марсе, прежде чем принять колесную конструкцию машины, им были изучены различные

варианты ходовых систем машин с разнообразными типами движителей, в том числе и РВД (см. рис. 52).



STAR-screw-robot
разработчик L. Perez (1996 г.)



STAR led to STAR 2 (1999 г.)



Модель машины из Ariel University Center,
Samaria, Israel



Микроробот инженера Tim Lexen
(Wisconsin, USA, 2011 г.)

Рис. 53. Роботизированные модели машин на РВД

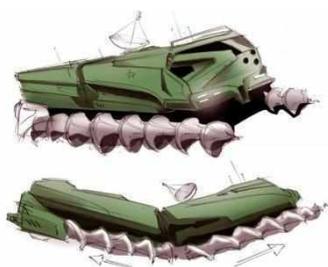
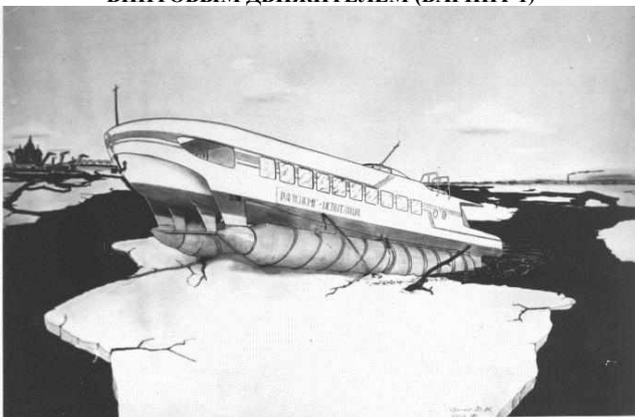


Рис. 54. Современные дизайн-проекты шнекоходов



УНИВЕРСАЛЬНОЕ СУДНО С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ (ВАРИАНТ 1)

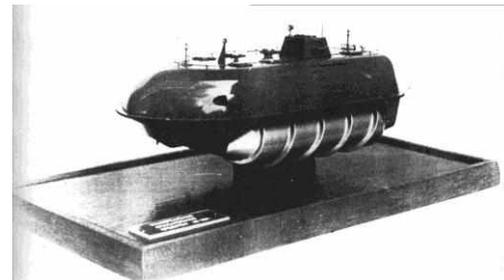


УНИВЕРСАЛЬНОЕ СУДНО С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ (ВАРИАНТ 2)

ОСНАЩЕНИЮ ЛЕДОКОЛЬНЫХ СУДОВ ДИСКОВЫМИ ФРЕЗАМИ И РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ



МАКЕТ «РВМ-1»



МАКЕТ УНИВЕРСАЛЬНОГО СПАСАТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА

Рис. 55. Дизайн-проекты ОКБ «РАЛСНЕМГ» ГПИ им. А.А. Жданова (сегодня НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Таблица 1

Техническая характеристика транспортных средств высокой проходимости по работам

Модель транспортно-технологического средства(год создания)	Параметры машины						Параметры шнека		Примечание: производитель (фирма, страна); источник информации
	Мощность двигателя кВт/л.с.	Полная масса, кг	База/колея машины, мм	Максимальная скорость передвижения машины, км/ч			Диаметр шнеков, мм	Угол подъёма винтовой линии (град)/ высота лопасти (м).	
				болото	снег	вода			
«Motobob» (1922 г.)	16/21,7	840	1200/1200	-	32,4	-	400	32/0,04	[1]
«Fordson» (1929 г.)	16,8/22,8	5000	-/-	-	6	-	700	28/-	Armstead Snow Motor (США) [1]
«Marsh Screw» (1964 г.)	85/116	1520	-/-	16	32	12	660	32/-	Chrysler (США) [1-23]
Dorothy S (1960-е г.)	51/70	5500	4400/2200	3	5	7	1060	16/0,06	UNU (Япония) [1-23]
Dorothy L (1966 г.)	147/200	19000	4400/3200	2	4	5	1600	15/0,09	UNU (Япония) [1-23]
DAF Amphiroll (1966 г.)	-	10000	-/-	35			-	-	DAF (Голландия) [1-23]
Chrysler - RUC (1969 г.)	-	-	-/-	47	-	-	1000	-	Chrysler (США) [1-23]
AST-002 (1985 г.)	220,6/300	10000	-/-	-	-	8	-	-	Mitsui Engineering & Shipbuilding (Япония) [1-23]
ГПИ-16Ш (1963 г.)	8,8/12	500	1600/1100	-	24	-	300	42/0,035	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ГПИ-16BC (1967 г.)	11,4/15,5	280	1650/1100	-	27	-	300	37°30'/0,03	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ГПИ-16Р (1963 г.)	9,3/12,6	230	1650/1190	-	25	-	300	37°30'/-	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]

Продолжение табл. 1

Модель транспортно-технологического средства(год создания)	Параметры машины						Параметры шнека		Примечание: производитель (фирма, страна); источник информации
	Мощность двигателя кВт/л.с.	Полная масса, кг	База/колея машины, мм	Максимальная скорость передвижения машины, км/ч			Диаметр шнеков, мм	Угол подъёма винтовой линии (град)/ высота лопасти (м)	
				болото	снег	вода			
ГПИ-16ВА (1965 г.)	9,3/12,6	550	1650/1100	-	15	-	300	25/0,03	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ГПИ-05 (1971 г.)	11,4/ 15,5	350	-/-	-	35	-	-	-/0,03	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ГПИ-02 (1972 г.)	84,6/115	3600	5200/2400	-	21,2	-	800	37°30'/0,02	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
РВБ-ГПИ-06 (1974 г.)	84,6/115	3600	-/-	20			-	-/0,018	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия)
ЛФМ-66 (1968 г.)	54/74	3590	4200/2478	-	18	10	600	25°30'/0,046	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ЛФМ-72 (1971 г.),	84,6/115	3850	4400/2100	-	20	12	700	28/0,05	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ПТВ-84 (1972 г.)	84,6/115	2000	-/-	25			1,5	30	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
РВВП-68 (1972 г.)	55,1/75	1800	4000/2000	15			0,14	28/0,03	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
ЛФМ-75 (1973 г.)	84,6/115	6000	4400/2200	-	18	-	700	28/0,05	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия)
РВТ-85 (1977 г.)	176/240	13000	-/-	-	14	-	800	32/-	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]

Продолжение табл. 1

Модель транспортно-технологического средства(год создания)	Параметры машины						Параметры шнека		Примечание: производитель (фирма, страна); источник информации
	Мощность двигателя кВт/л.с.	Полная масса, кг	База/колея машины, мм	Максимальная скорость передвижения машины, км/ч			Диаметр шнеков, мм	Угол подъёма винтовой линии (град)/ высота лопасти (м).	
				болото	снег	вода			
ВМ-99 (1976 г.)	147/200	8500	4600/2200	-	7	-	1100	30/0,05	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия) [9-22]
СЛУ-119 (1981 г.)	11,4/15	1200	2000/1200	-	4	-	300	22/0,03	ГПИ им. А.А.Жданова (Россия)
ВК-2	11,4/ 15,5	1300	1200/550	3			0,38	30/0,05	(Россия) [1-23]
ШН-67 (1966 г.)	132/180	4600	-/-	3,35	10,3	7,2	800	17°40'/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1,2]
ШН-1 (1967 г.)	132,3/179,88	3500	4200/2070	18			0,8	28/0,05	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]
ШН-68 (1968 г.)	132/180	5000	4200/2070	3,35	30,5	12,4	800	32°30'/0,1	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]
ЗИЛ-4904 (ПЭУ-3Б) (1972 г.)	264/360	8500	5990/1085	10	10,8	9,25	1500	34/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия)
ЗИЛ-4904 (1972 г.)	264/360	10165	5990/1085	7,3	16	10,1	1500	34/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]
ЗИЛ-2906 (1973 г.)	54/74	1802		7,1	15	12,2	860	39/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]

Окончание табл. 1

Модель транспортно-технологического средства(год создания)	Параметры машины						Параметры шнека		Примечание: производитель (фирма, страна); источник информации
	Мощность двигателя кВт/л.с.	Полная масса, кг	База/колея машины, мм	Максимальная скорость передвижения машины, км/ч			Диаметр шнеков, мм	Угол подъёма винтовой линии (град)/ высота лопасти (м).	
				болото	снег	вода			
ЗИЛ-29061 (1979 г.)	113/154	2250	3350/1500	12	25	14,9	900	35/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]
ЗИЛ-29061М (1979 – 1980 гг.)	162/220	2400	-/-	7,8	32	15,7	900	35/-	Завод имени Лихачёва (ЗиЛ) (Россия) [1, 2]
The MudMaster (2000-2015 гг.)	259/352,14	-	-/-	-	-	-	-	-/-	Residue Solutions (Австралия)
Amphi-Cat (2000-2015 гг.)	241,24/327,99	19000	-/-	-	-	-	-	-/-	Technology by Josef Pasteiner (Австралия)
Земснаряд-шнекоход (2015 г.)	90,28/122,75	-	-/1400	8			1000	-/-	Днепропетровск (Украина) [1-23]
Болотная Амфибия	85,3/115,98	1000	3500/1800	19,4			0,65	37,5/0,048	(США) [22]
Снежный мотор	16.8/ 22,84	2000	2200/1480	11			0,7	28/0.04	(Канада) [22]
Вездеход	91,1/123,86	3000	2600/-	5			0,54	30/-	(Великобритания)[22]
Тягач	58,8/79,95	2000	-/-	5			0,55	35/-	(Польша) [22]
Болотная амфибия	85,3/115,98	1100	2700/1670	35			0,66	32/0.052	(США) [22]
Транспортер бронированный	264,6/359,76	6500	6000/-	50			1,2	40/0.08	(США) [22]

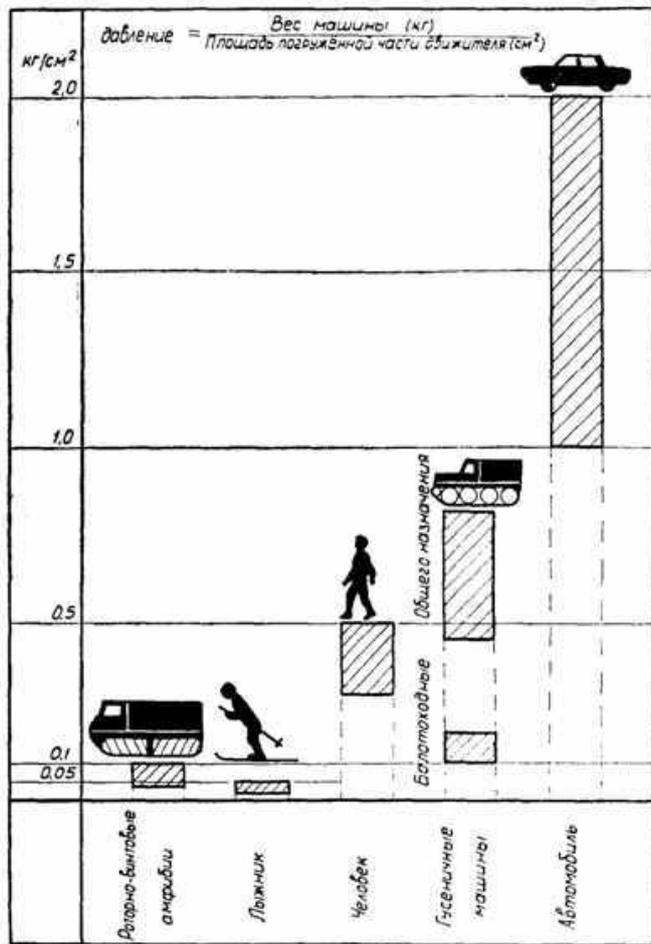


Рис. 56. Схема распределения давлений на опорное основание

давлений, оказываемых на полотно пути различными типами движителей.

Сегодня, в связи со значительными затратами на изготовление полно-размерных образцов машин, оснащенных РВД, многие исследователи, изучающие передвижение этих транспортных средств на местности, используют масштабные модели (рис. 53). Помимо этих исследований в мире ведётся большое количество дизайнерских проектов по шнекоходам (рис. 54). Аналогичные дизайнерские проработки проводились в 60-х ... 70-х годах XX века в ОКБ «РАЛСНЕМГ» ГПИ им. А.А. Жданова (рис. 55).

Проведенный анализ конструкций машин, оснащенных РВД и информационных данных [1-23], позволил обобщить их конструкционные (массогабаритные) параметры и эксплуатационные (мощностные и скоростные) характеристики в табл. 1.

К особенностям роторно-винтовых (червячных) движителей (архимедова винта) относится то, что они могут развивать на снегу значительную силу тяги при минимальных удельных нагрузках на опорное основание. На рис. 56 из работ [18, 22] представлена диаграмма диапазонов

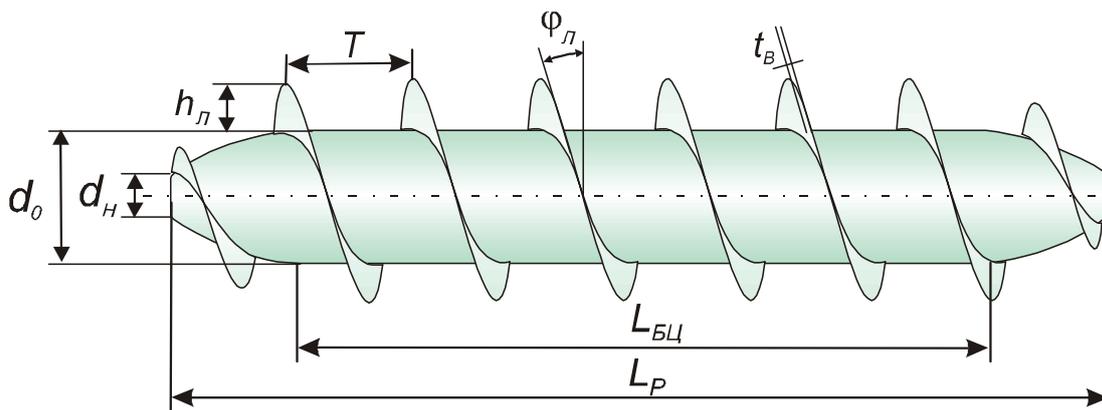


Рис. 57. Схема (основные параметры) роторно-винтового движителя [10]:

$r_0 = 0,5d_0$ - радиус и диаметр базового цилиндра ротора (м); $L_{БЦ}$ - длина базового цилиндра ротора (м); L_P - общая длина ротора (м); h_L - высота винтовой лопасти шнека (м), ϕ_L - угол подъема винтовой лопасти у её основания (рад); $r_H = 0,5d_H$ - радиус и диаметр носка ротора (м); t_B - толщина винтовой лопасти (м); T - шаг винтовой лопасти (м); n_L - количество лопастей

Роторно-винтовой движитель (РВД) - представляет собой одну или несколько винтовых секций (роторов), установленных по бортам машины. Ротор (рис. 57) состоит из базового (обычно пустотелый, заполняется для повышения плавучести пенопластом или гермети-

зируется) с диаметром и навитыми на него одной или несколькими винтовыми лопастями (число лопастей определяется заходностью) с шагом навивки [10]. Винтовая лопасть определяется углом подъема винтовой линии и высотой лопасти. В сечении винтовая лопасть может быть различной формы, но чаще всего применяется треугольная.

Передняя (заходная) часть движителя также может быть выполнена различной формы (конусной, сферической и т.д.). Материал и состояние поверхности ротора характеризуются коэффициентом трения скольжения в зоне контакта движителя с опорной поверхностью. Выбор конструктивных параметров определяет тягово-сцепные характеристики движителя.

На стадии разработки дизайн-проекта и конструкции машины, необходимо произвести обоснование основных параметров РВД. Конструктору необходимо выбрать основные параметры, такие как мощность двигателя, полную массу машины, размеры ротора, размер и угол наклона лопастей.

На сегодняшний день существует не так много технической и специальной литературы, описывающей вездеходные транспортные средства, оснащенные РВД [1-24]. В первую очередь – это книги, которые были выпущены производителями и исследователями машин данного типа [3, 8, 9, 13, 18, 21, 22]. Также есть ряд диссертаций, посвященных исследованию машин на РВ-двигателях [10, 11, 14, 15, 19, 23]. Некоторые аспекты выбора параметров движителей для этих машин представлены в работах [2, 4, 5-7, 12, 16, 17, 20, 24].

На основании анализа и обработки параметров основных характеристик существующих транспортно-технологических машин (ТТМ), оснащенных РВД (см. табл. 1), были получены зависимости, представленные на рис. 58-63, и сделаны выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя, массогабаритные размеры и скорость движения ТТМ на РВ-двигателях.

Как видно из рис. 58, среднее значение мощности двигателя от полной массы машины может быть выражено по следующей зависимости: $P_e = 0,4M_a^3 + 1,9M_a^2 + 33M_a + 4$.

На основании этих параметров можно выбирать мощность двигателя вновь проектируемой машины на РВД. Для машины полной массой 1 т мощность двигателя должна быть порядка 35 (15-55) кВт и может колебаться в зависимости от других параметров.

Из рис. 59 видно, что среднее значение диаметра базового цилиндра ротора от полной массы машины может быть выражено по следующей зависимости: $d_0 = -0,003M_a^2 + 0,107M_a + 0,383$.

На основании этих параметров можно выбирать диаметр базового цилиндра ротора вновь проектируемой машины на РВД. Для машины полной массой 1 т диаметр ротора должен быть порядка 0,5 (0,4-0,6) м и его размер может колебаться в зависимости от других параметров машины, а также условий эксплуатации ТТМ.

На рис. 60 показана зависимость среднего значения высоты лопатки винтовой линии от диаметра ротора, которая может быть выражена следующим соотношением $h_{л} = 0,04d_0 + 0,02$.

На основании этих параметров можно выбирать высоту лопатки винтовой линии вновь проектируемой машины на РВД. Для машины с диаметром ротора (0,4-0,6) м высота лопатки составляет (0,04-0,05) м и может колебаться в зависимости от других параметров как машины, так и местности.

Из рис. 61 видно, что среднее значение диаметра ротора от базы может быть выражено следующей зависимостью $L = 0,19d_0 + 0,04$.

На основании этих параметров можно сопоставить диаметр ротора и базу машины на РВД. Для машины с диаметром ротора 0,4-0,6 м база составляет 2-3 м и может колебаться в зависимости от других параметров.

Как видно из рис. 62, среднее значение базы от колеи может быть выражено по следующей зависимости: $L = 2,6B - 1,3$. Тогда для машины с базой 2-3 м колея составит 1,25-1,75 м и может колебаться в зависимости от других параметров.

На рис. 63 представлена зависимость угла наклона винтовой линии ротора от скоро-

сти движения машины на РВД $\alpha = (V/3) + 24$. В ходе анализа параметров и характеристик машин на РВД не удалось найти достаточного количества данных, связывающих угол наклона винтовой линии с другими параметрами ротора, так, данные зависимости многопараметрические и определяются в результате сложных теоретических расчетов.

Таким образом, используя представленные данные и зависимости, можно выбрать начальные параметры машин на РВД. Дальнейшее уточнение выбранных параметров и характеристик возможно произвести только после тягово-скоростного расчета, компоновочных и инженерно-проектных работ, проведенных для конкретного объекта проектирования.

Результаты анализа массо-габаритных, мощностных и скоростных характеристик машин на РВД будут использованы при создании автономного робототехнического мобильного комплекса (АМРК) для мониторинга прибрежной зоны и прогнозирования морских прибрежных катастроф. Данная работа выполняется по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2013-2020 годы». На рис. 64 представлены компоновочные схемы проектируемого АМРК, который предполагает использование трех типов движителей, в том числе и РВ-двигатель, в зависимости от условий эксплуатации.

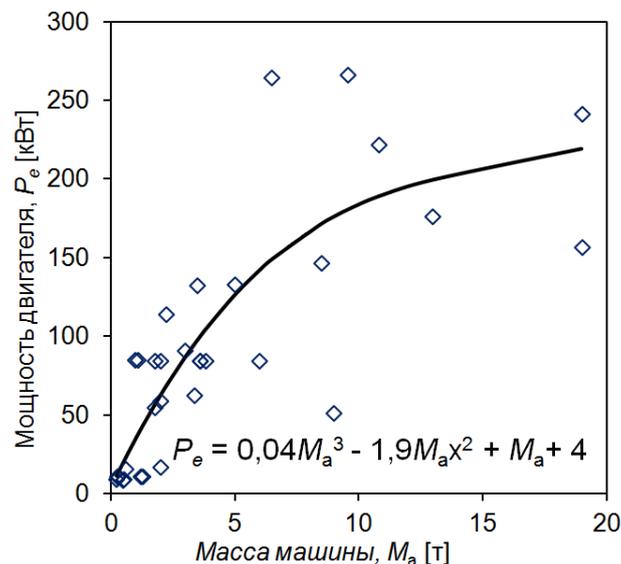


Рис. 58. Зависимость мощности двигателя от полной массы машины на РВД

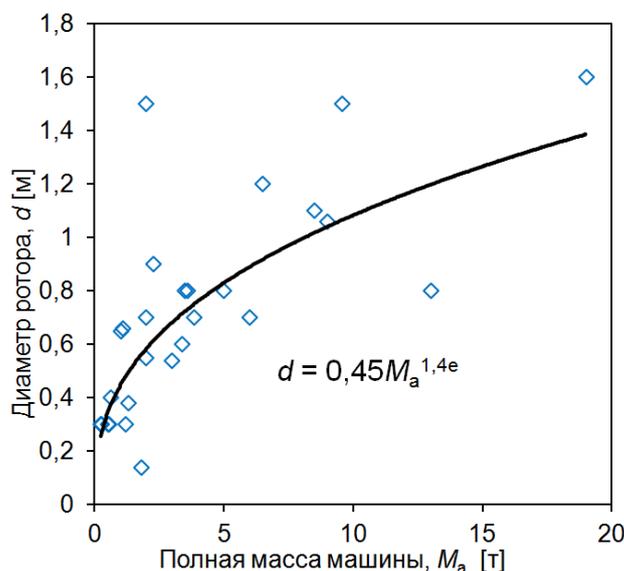


Рис. 59. Зависимость диаметра ротора от полной массы машины на РВД

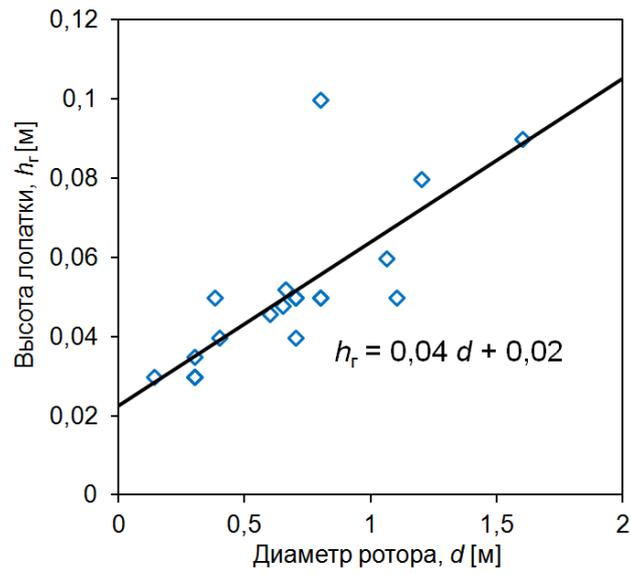


Рис. 60. Зависимость высоты лопатки от диаметра ротора машины на РВД

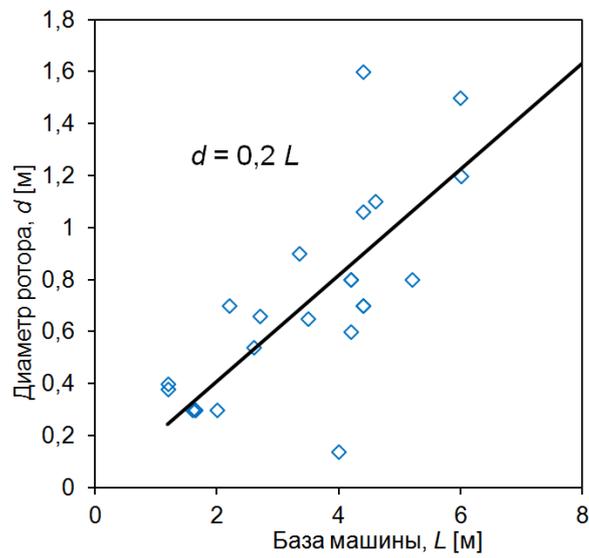


Рис. 61. Зависимость диаметра ротора от базы машины на РВД

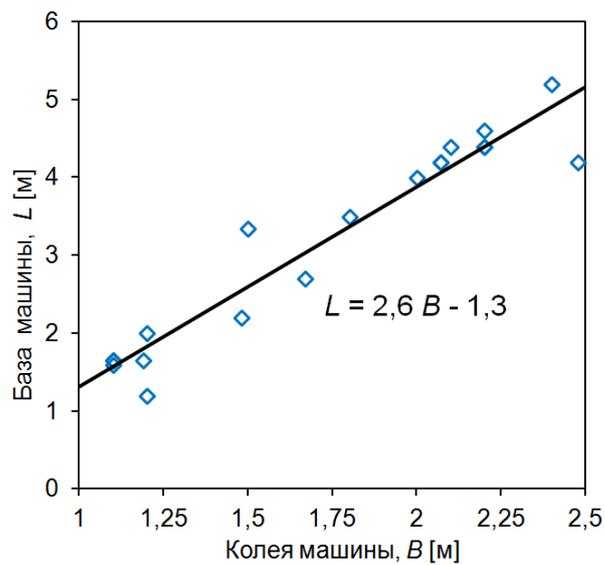


Рис. 62. Зависимость базы от колес машины на РВД

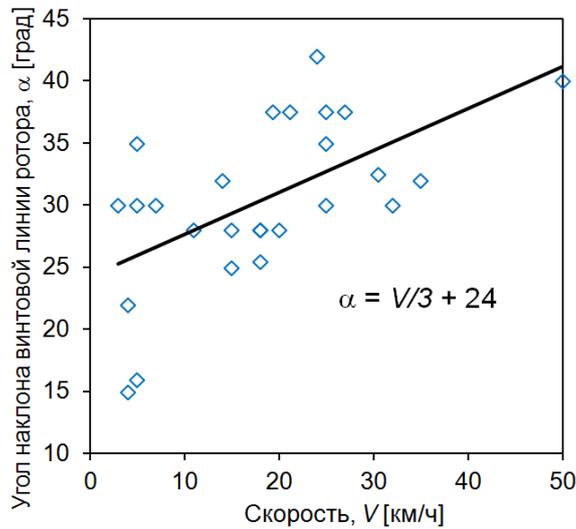
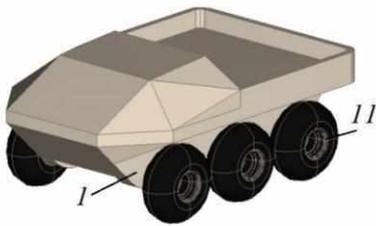
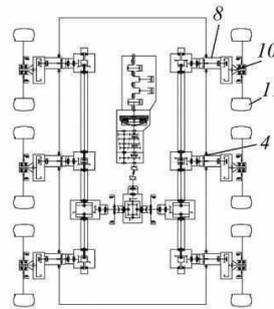


Рис. 63. Зависимость угла наклона винтовой линии ротора от скорости движения машины на РВД



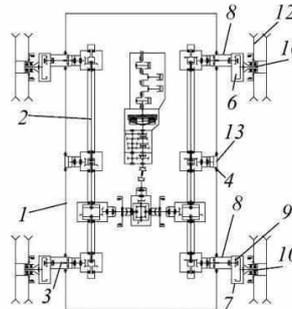
Колесный движитель



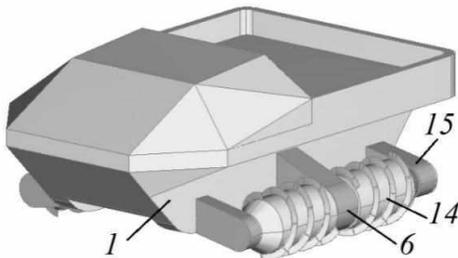
Установка и силовой привод колесного движителя



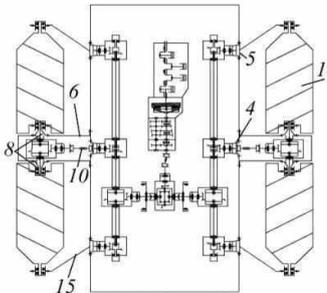
Модульно-гусеничный движитель



Установка и силовой привод гусеничного движителя



Роторно-винтовой движитель



Установка и силовой привод роторно-винтового движителя

Рис. 64. Мобильное шасси автоматизированного робототехнического комплекса «Полярный Лис»

Итогом выполненного анализа предполагается, что после выбора исходных параметров возможно будет провести математическое моделирование движения транспортно-технологических машин, оснащенных РВ-двигателем, в условиях пересеченной местности с учетом разработанных моделей местности и полотна пути, представленных в работах [25-45]. Это может послужить основой для расчета оценки подвижности и производительности ТТМ на РВД по методикам, представленным в работах [9, 10, 11, 14, 15, 19, 23, 25, 38, 43, 46-50].

Представленные результаты получены в ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (соглашение № 14.574.21.0089 (уникальный идентификатор соглашения – RFMEFI57414X0089))

Библиографический список

1. **Данилов, Р.Г.** Развитие конструкции роторно-винтовых двигателей для транспортных и технологических машин // Строительные и дорожные машины. 2015. №1. С. 53–58.
2. **Вольский, С.Г.** Шнековые двигатели / С.Г. Вольский, Ю.И. Соболев, В.В. Цирульников // За рулём. 1969. № 4.
3. **Крживицкий, А.А.** Снегоходные машины / А.А. Крживицкий. – М.: Машгиз, 1949. – 236 с.
4. **Кириндас, А.** Роторно-винтовые ледоколы / А. Кириндас, Р. Данилов // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2013. № 10. С. 48–52.
5. **Данилов, Р.Г.** Снегоболотоход «Шнек»: Автомобили для бездорожья // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2010. № 9. С. 42–46.
6. **Данилов, Р.Г.** Шнековый снегоболотоход ПЭУ-3: Автомобили для бездорожья // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2010. № 11. С. 31–36.
7. **Данилов, Р.Г.** Серийный шнекоход: Автомобили для бездорожья // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2011. № 6. С. 33–38.
8. **Куляшов, А.П.** Экологичность двигателей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 228 с.
9. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В. В. Белякова и А. П. Куляшова. – Н. Новгород, 2004. – 960 с.
10. **Шапкин, В.А.** Основы теории движения машин с роторно-винтовым двигателем по заснеженной местности: дисс. ... докт. техн. наук 05.05.03 / Шапкин В.А. – Н. Новгород 2001. – 390 с.
11. **Адясов, Ю.П.** Исследования в области транспортных средств на воздушной подушке с роторно-винтовым двигателем: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Адясов Ю.П. – Горький, 1973. – 224 с.
12. **Вологдин, В.И.** Влияние направления вращения винтовых роторов на стабилизацию прямолинейного движения снегохода / В.И. Вологдин, В.И. Захаренков // Снегоходные машины: сборник научных трудов. – Горький, 1971. Вып. 10. С. 23–31.
13. Двигатели специальных строительных и дорожных машин / В.Е. Колотилин [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 1995. – 208 с.
14. **Колотилин, В.Е.** Исследование процессов взаимодействия роторно-винтового двигателя ледово-фрезерной машины со снежным покровом и динамических нагрузок в её силовом приводе: дисс. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / Колотилин В.Е. – Горький, 1976. – 253 с.
15. **Куляшов, А.П.** Специальные строительно-дорожные машины с роторно-винтовым двигателем: дисс. ... док. тех. наук: 05.05.03/ Куляшов А.П.. – Горький, 1986. – 327 с.
16. **Куляшов, А.П.** Вездеходы с роторно-винтовым двигателем: теория, создание, эксплуатация / А.П. Куляшов [и др.] // Нефть и газ Западной Сибири. Проблемы добычи и транспортировки: тез. докл. межгосударственной конф. / Тюмень, 1993. С. 196.
17. **Куляшов, А.П.** Выбор оптимальных параметров роторно-винтовых машин особо высокой проходимости / А.П. Куляшов [и др.] // Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации двигателей, автомобилей, вездеходных и специальных строительных и дорожных машин: тез. докл. Международной науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 1994. С. 36.

18. **Куляшов, А.П.** Роторно-винтовые амфибии / А.П. Куляшов, А.Ф. Николаев. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1973. – 47 с.
19. **Левшунов Л.С.** Исследование поворота ледорезных машин с роторно-винтовым двигателем: дисс. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / Левшунов Л.С. – Горький, 1978. – 196 с.
20. **Рукавишников, С.В.** Роторно-винтовой движитель и его особенности / С.В. Рукавишников, В.И. Вологдин // Снегоходные машины: сб. научн. тр. – Горький, 1973. Вып. 5. С. 5–29.
21. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
22. Роторно-винтовые машин. Основы теории движения / И.О. Данато [и др.]. – Н. Новгород: ННПК, 2000. – 451 с.
23. **Хабутдинов, Р.А.** Исследование взаимодействия роторно-винтового движителя с переувлажненным грунтом: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Хабутдинов Р.А.. – Киев, 1973. – 263 с.
24. Нижегородская научная школа вездеходных машин, транспортно-технологических комплексов и специального оборудования / Л. В. Барахтанов [и др.] ; под общ. ред. В. В. Белякова и А. П. Куляшова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Нижегородский гос. технический ун-т им. Р. Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2007.
25. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145–174.
26. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.
27. **Макаров, В.С.** Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–2. С. 270–276.
28. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 151.
29. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 82–88.
30. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 113.
31. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 33.
32. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1–2. № 42–43. С. 29–30.
33. **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 (102). С. 136–141.
34. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 21–24.
35. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального исчисления / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 87–88.
36. **Козлов, В.С.** Шагающие аппараты, развитие теории взаимодействия движителя с грунтом / В.С. Козлов, В.В. Беляков. – Нижний Новгород, 1999. – 140 с.
37. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина – местность») / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В.В. Белякова и А.А. Куркина / Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
38. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин: дисс. ... на соискание ученой степени доктора технических наук / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 1999. – 485 с.

39. **Барахтанов, Л. В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.В. Кравец; НГТУ. – Н. Новгород, 1996. – 200 с.
40. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
41. **Кошарный, Н.Ф.** Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости / Н.Ф. Кошарный. – Киев.: Вышш. шк., 1981. – 208 с.
42. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
43. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Беляков В.В. – М., 1992. – 16 с.
44. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин [и др.] // Экологические системы и приборы. 2014. № 12. С. 40–55.
45. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 331–335.
46. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 271 с.
47. **Макаров, В.С.** Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2015. №2(109). С. 170–276.
48. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
49. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Гончаров К.О. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
50. **Зезюлин, Д. В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зезюлин Д. В. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.07.2015*

**V. E. Kolotilin, A. V. Miheev, P. O. Beresnev, A. M. Belyaev, A. V. Papunen,
D. V. Zezyulin, V. S. Makarov, V. V. Belyakov, A. A. Kurkin**

**STATISTICAL MODEL OF SELECTION GEOMETRIC PARAMETERS,
MASS- INERTIA AND POWER CHARACTERISTICS
OF TRANSPORT- TECHNOLOGICAL MACHINES
WITH ROTARY-SCREW PROPELLERS**

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

The article deals with dependences and draws conclusions about the impact of vehicle capacity on the engine power and speed of transport- technological machines equipped with rotary-screw propeller, which condition their mobility, productivity and technological efficiency. The technique of rational choice of the type of machine, maneuverability control systems, providing total power requirement, load capacity, maximum speed is adduced in this article. The presented results were obtained in Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. Alekseev in the framework of the Federal Target Program «Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014 - 2020 years» (agreement № 14.574.21.0089 (unique identifier of agreement - RFMEFI57414X0089))

Key words: rotary-screw propeller, power, mass, diameter of the rotor, height of the blade, angle of slope of helix.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.572

А.А. Болотин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЕВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Применение математического моделирования – необходимое условие для успешного проектирования судов на подводных крыльях в настоящее время. Представлено описание методики расчета гидродинамических характеристик подводных крыльев при помощи метода дискретных вихрей и приведены результаты расчетов.

Ключевые слова: подводные крылья, метод дискретных вихрей, гидродинамические характеристики, подъемная сила, лобовое сопротивление.

Идея поставить судно на крылья, безусловно, стала революционной в скоростном судостроении. Сочетание скорости, комфорта, экономичности в свое время сделали суда на подводных крыльях (СПК) очень популярным видом водного транспорта как у нас в стране, так и за рубежом. Долгие годы эксплуатации подтвердили эффективность этих судов, и возросший в последнее время интерес к СПК совершенно закономерен. Новый этап в развитии крылатых судов требует и новых методов в проектировании, в частности, более широкого внедрения методов математического моделирования.

Задача создания гидродинамического комплекса является основной при проектировании СПК. Выбор гидродинамической схемы и доведение ее до требуемых показателей – это результат многолетнего труда опытейших специалистов. В основе этой работы в течение многих лет лежал модельный эксперимент, в частности, испытания буксируемых моделей на открытой воде. Использование математического моделирования, несомненно, способно во много раз сократить сроки и стоимость процесса создания подводных крыльев.

Первым этапом этой работы должно являться расчетное определение гидродинамических характеристик крыльев, как необходимых исходных данных для исследования динамики движения СПК, устойчивости и управляемости. Значения гидродинамических нагрузок и их распределение вдоль крыла необходимы для расчетов прочности.

В данной работе представлены результаты расчета гидродинамических характеристик подводных крыльев методом дискретных вихрей [1]. Вихревые методы расчета несущих поверхностей достаточно прочно вошли в процесс проектирования летательных аппаратов, но не очень активно используются для исследования подводных крыльев. Тем не менее, крыльевая система СПК является очень удобным объектом исследования. Тонкие несущие поверхности трапецевидной формы, отсутствие объемных элементов позволяют уверенно применять вихревые методы для расчета гидродинамических характеристик. Метод дискретных вихрей отличается относительной простотой и наглядностью, а также легко распространяется на сложные крыльевые системы, какими являются подводные крылья. Некоторая некорректность при определении распределения нагрузки вдоль профиля для подводного крыла является неактуальной, так как это сказывается на точности определения продольного мо-

мента крыла относительно его передней (или задней) кромки, а его величина ввиду большого расстояния крыла от центра тяжести судна незначительна.

В качестве объекта исследования выбрано носовое крыльевое устройство СПК «Комета», являющееся основой для крыльев большинства морских СПК. Схема крыла представлена на рис. 1. Профиль крыла – плоско-выпуклый сегмент с максимальной толщиной 5,5%.

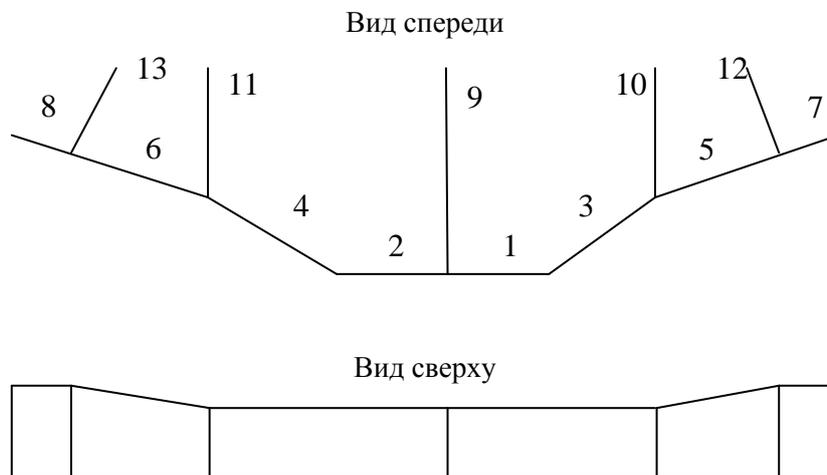


Рис. 1. Схема крыльевого устройства

Метод дискретных вихрей предполагает разбиение крыла на площадки, размещение на площадке вихря с неизвестной циркуляцией, определение этих циркуляций и гидродинамических сил, действующих на каждую площадку, а затем определение сил, действующих на все крыло. Для моделирования рассмотренное крыльевое устройство разбито на 13 трапецевидных участков. Нумерация участков представлена на схеме. Профилированные участки крыла (с 1 по 8) заменяются криволинейными несущими поверхностями, расположенными вдоль средней линии профиля, стойки крыла – плоскими несущими поверхностями. Криволинейные несущие поверхности разбиваются на 6 частей по хорде, плоские на 5. Разбиение по размаху определяется удлинением рассматриваемого участка и меняется от 8 до 1. Граница раздела моделируется зеркальной вихревой системой с циркуляцией того же знака, что и у основной вихревой системы. Задача решается в линейной постановке, свободные вихри лежат в плоскости хорд крыла. Результатами расчета являются гидродинамические коэффициенты трех проекций гидродинамической силы: лобового сопротивления (C_x), подъемной силы (C_y) и боковой силы (C_z), а также три проекции коэффициентов гидродинамического момента (m_x , m_y , m_z). Коэффициенты связаны с гидродинамическими силами соотношениями:

$$C_x = \frac{2R_x}{\rho V^2 S}; C_y = \frac{2R_y}{\rho V^2 S}; C_z = \frac{2R_z}{\rho V^2 S}; m_x = \frac{2M_x}{\rho V^2 SL}; m_y = \frac{2M_y}{\rho V^2 SL}; m_z = \frac{2M_z}{\rho V^2 SL},$$

где R_x, R_y, R_z – проекции гидродинамической силы;

M_x, M_y, M_z – проекции гидродинамического момента;

V – скорость судна;

ρ – плотность воды;

S – характерная площадь;

L – характерный линейный размер.

Из составляющих лобового сопротивления в рамках представленного метода определяется только индуктивное сопротивление крыльевого устройства. Для определения полного

гидродинамического сопротивления необходимо определить составляющие вязкостного $C_{\text{хв}}$ и волнового сопротивления $C_{\text{хвол}}$.

Согласно [2], вязкостное сопротивление :

$$C_{\text{хв}} = 2C_{\text{хпл}} \left\{ 1 + \left(\frac{U}{K_u} - 0.5 \right) C_y \right\},$$

где $C_{\text{хпл}} = 0,455 / (\lg Re)^{2,58}$;

$$Re = V b_{\text{ср}} / \nu;$$

$$U = 1 - e^{-2(\bar{h}_{\text{ср}})^{0,6}};$$

$$K_u = 1 + (0,5 + \bar{c}) e^{-2(\bar{h}_{\text{ср}})^{0,6}},$$

$$\bar{h}_{\text{ср}} = \frac{h_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}},$$

где \bar{c} – относительная толщина профиля;

ν – кинематическая вязкость воздуха;

$b_{\text{ср}}$ – средняя хорда крыла;

$h_{\text{ср}}$ – среднее погружение крыла.

Волновое сопротивление

$$C_{\text{хвол}} = \frac{C_y^2}{2Fr^2} e^{-\frac{2\bar{h}_{\text{ср}}}{Fr^2}} \left(1 - \frac{2\pi}{Fr^2} e^{-\frac{2\bar{h}_{\text{ср}}}{Fr^2}} \right),$$

где $Fr = \frac{V}{\sqrt{gb_{\text{ср}}}}$ – число Фруда.

На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента подъемной силы в зависимости от угла атаки α и погружения крыльцевого устройства. За величину погружения \bar{h} принято отстояние задней кромки крыла в диаметральной плоскости от поверхности воды в долях хорды. В качестве характерной площади принята горизонтальная проекция всей несущей части крыльцевого устройства.

На этом же рисунке приведены результаты модельных испытаний данного крыльцевого устройства, полученные в опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. Крылова [3]. Испытания проводились на модели масштаб 1:10 при скорости буксировки 5,5 м/с.

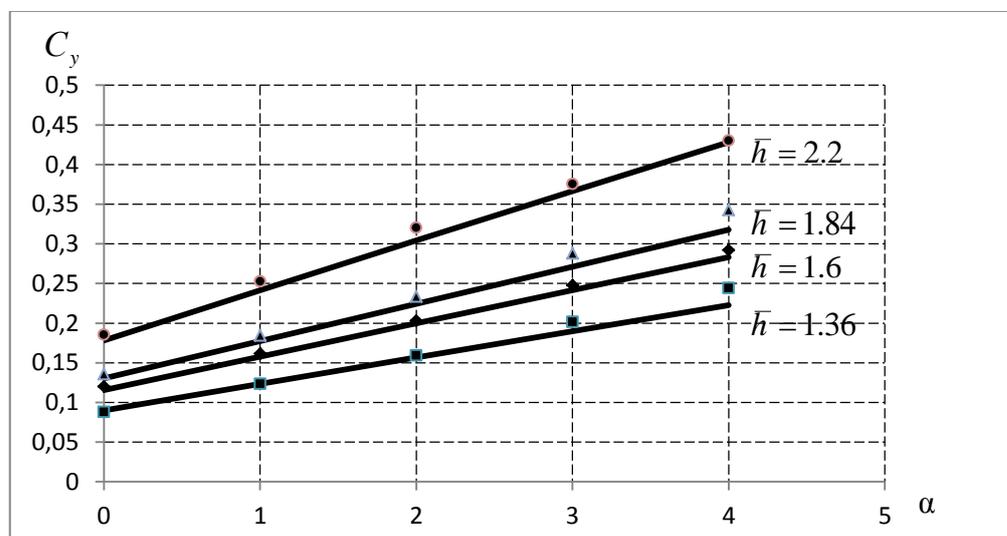


Рис 2. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента подъемной силы от угла атаки

С целью идентификации расчетных и экспериментальных данных расчет проводился при тех же числах Рейнольдса, что и эксперимент. Расчетные углы атаки и погружения выбраны такими же, как в эксперименте. Результаты расчета представлены на рисунке сплошными линиями. Экспериментальные данные показаны отдельными точками.

Представленные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов расчета и испытаний, что подтверждает целесообразность использования метода дискретных вихрей для расчета подводных крыльев.

Несомненным достоинством предлагаемой методики является пространственная постановка задачи. Расчет гидродинамических характеристик при крене и дрейфе не требует введения дополнительных условий. В качестве примера на рис. 3, 4 представлены зависимости коэффициента кренящего момента m_x рассмотренного крыльевого устройства от угла крена γ и от угла дрейфа β при различных погружениях. В качестве характерного линейного размера принят размах крыла. Зависимости, представленные на рис. 3, отслеживают вход в воду и выход из воды элементов крыльевого устройства с различными углами V-образности.

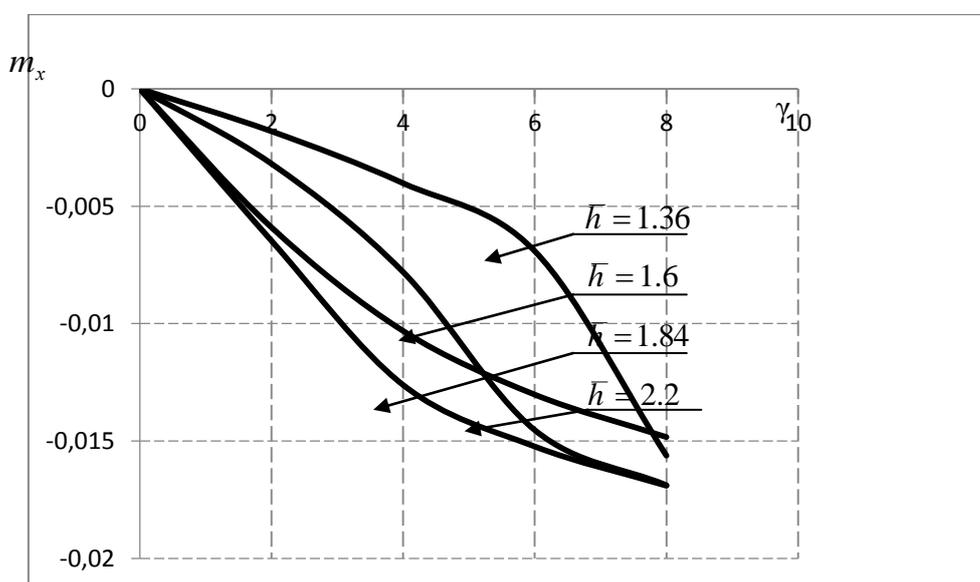


Рис. 3. Зависимость коэффициента кренящего момента от угла крена

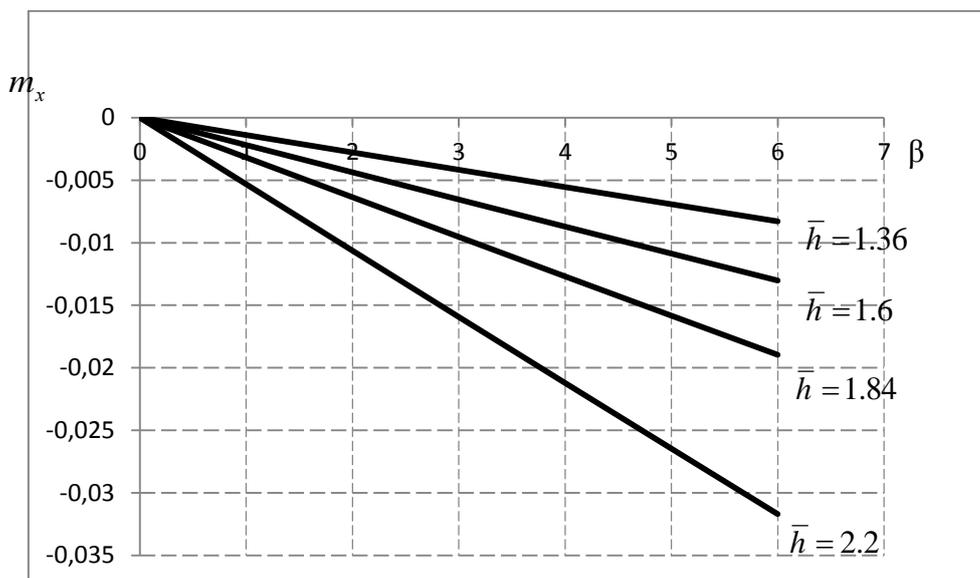


Рис. 4. Зависимость коэффициента кренящего момента от угла дрейфа

Проведенные методические исследования свидетельствуют о высокой степени достоверности расчета боковых гидродинамических характеристик.

Для расчета гидродинамических характеристик с отклоненными органами управления достаточно изменить форму несущей поверхности в соответствии с углом отклонения управляющего элемента. При этом необходимо часть несущей поверхности, обслуживаемую органом управления, выделить отдельным участком, и разбиение по хорде провести таким образом, чтобы отклоненная часть несущей поверхности моделировалась отдельными площадками. Проведенные исследования показали, что расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными в области углов отклонения органов управления, не превышающих 10^0 .

Как указывалось ранее, получение гидродинамических характеристик производится путем интегрирования нагрузки, распределенной по площади крыла. Определение значений нагрузок, распределенных вдоль размаха крыла и вдоль стоек крыла, является отдельной задачей, достаточно эффективно решаемой при помощи данной методики.

Таким образом, предложенная методика позволяет с достаточной точностью получить полный спектр гидродинамических характеристик крыльевых устройств СПК, что значительно упрощает процесс проектирования судов. Полученные результаты являются исходными данными для математического моделирования динамики движения СПК, для решения задач получения кривой сопротивления [4], устойчивости, остойчивости и управляемости судна, а также получить исходные данные для расчета прочности.

Библиографический список

1. Белоцерковский, С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа / С.М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1965. – 244 с.
2. Егоров, И.Т. Гидродинамика быстроходных судов / И.Т. Егоров, В.Т. Соколов. – Л.: Судостроение, 1971. – 424 с.
3. Отчет по испытаниям в гидроканале моделей крыльевых устройств с поворотным закрылком. Технический отчет, ЦКБ по СПК, инв. № ОР 224-020-009, 1968.
4. Болотин, А.А. Методика расчета кривой сопротивления и посадки судна на подводных крыльях / А.А. Болотин // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – Н. Новгород, 2014. Вып. 76. С. 172–177.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

A.A. Bolotin

THE USE OF DISCRETE VORTICES METHOD FOR THE HYDROFOILS RESEARCH

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

The aim of this work is the development of methodology for hydrofoil hydrodynamic characteristics calculation. The method of discrete vortices, widely used in the aircraft industry, was chosen for calculation. The features of this method associated with its usage for hydrofoil calculation were distinguished. The hydrodynamic characteristics calculation for the fore wing device of the hydrofoil craft "Kometa" were done. The comparison of the calculation results and the results of towing tests of this wing device in Krylov Shipbuilding Research Institute is demonstrated. The comparison concluded that the usage of this method for the hydrofoils calculations is feasible. The proposed method allows obtaining the raw data for mathematical modeling of the dynamics of hydrofoil craft motion, for the calculation of the resistance, landing, stability, controllability and strength curves.

Key words: hydrofoil, method of discrete vortices, hydrodynamic characteristics, dynamic lift, drag.

УДК 620.179

Д.В. Конури́н, С.Н. Пичков, Д.Н. Шишулин

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОКАЗАНИЯ ПРИКЛЕИВАЕМЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ 300°C

ОКБМ им. И.И. Африкантова, Нижний Новгород

Представлены принцип действия и основные характеристики тензорезисторов. Дано описание экспериментальных исследований по подтверждению паспортной зависимости деформации тензорезистора ZFLA от температуры и работоспособности клея NP-50. Рассмотрен метод исключения фиктивной деформации тензорезистора от влияния температурного воздействия без применения компенсационного тензорезистора.

Ключевые слова: тензорезистор, провод, температурное воздействие, деформация, омическое сопротивление.

Тензометрические исследования являются одной из основных составных частей научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) на протяжении всей истории развития атомной энергетики, в частности, при отработке проектных решений реакторных установок (РУ). С помощью метода тензометрии решается задача определения напряженно-деформированного состояния объектов контроля с применением тензорезисторов и регистрирующей аппаратуры [1].

Принцип действия тензорезисторов основан на явлении тензоэффекта, заключающемся в изменении омического сопротивления R проводников и полупроводников при их механической деформации.

Основной характеристикой тензорезистора является его коэффициент относительной тензочувствительности, определяемый как

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon},$$

т.е. отношение относительного изменения электросопротивления $\Delta R/R$ тензорезистора к вызывающей это изменение деформации $\varepsilon = \Delta l/l$ исследуемого материала, где l – длина базы тензорезистора [2].

При испытаниях объектов контроля в большинстве случаев используют фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

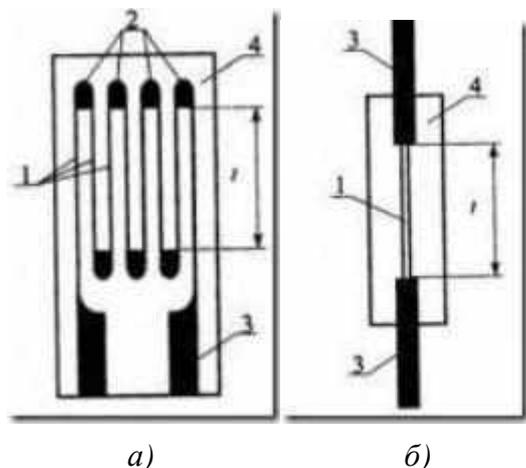


Рис. 1. Типы тензорезисторов:

a – фольговый; b – полупроводниковый; 1 – тензочувствительные элементы; 2 – низкоомные перемычки; 3 – выводные контакты; 4 – подложка («основа») и наклеенный над тензорешеткой защитный слой тонкой бумаги; l – база тензорезистора

В настоящее время большое распространение получили фольговые тензорезисторы (рис. 1, *a*) из металлической фольги толщиной не более 4...6 мкм. Вследствие низкой поперечной чувствительности и плоского сечения элементов тензорешетки, они имеют при той же площади сечения более развитую поверхность приклейки, что улучшает условия их работы.

Полупроводниковые тензорезисторы (рис. 1, *b*), по сравнению с фольговыми, обладают значительно большей тензочувствительностью, меняющейся, однако, при деформации и при изменениях температуры. Несмотря на это, они эффективно применяются в упругих элементах различных измерительных приборов (например, динамометров), где большое значение имеет их высокая чувствительность, а отмеченные недостатки могут быть компенсированы.

Как правило, тензорезисторы монтируются на объект контроля двумя способами: аппликацией клеем и точечной сваркой. Диапазон измеряемых деформаций у современных тензорезисторов составляет от ± 1000 до $\pm 300\,000$ мкм/м. Существуют различные виды тензорезисторов по диапазону рабочих температур от -269 до $+800$ °С.

На точность показаний тензорезисторов большое влияние оказывает температурное воздействие. При изменении температуры меняется начальное сопротивление тензорезистора (температурная погрешность нуля) и коэффициент тензочувствительности (температурная погрешность чувствительности). Изменение начального сопротивления наклеенного тензорезистора определяется двумя факторами: изменением удельного сопротивления ρ материала как непосредственно под действием ΔT , так и под действием дополнительного механического напряжения, появляющегося в тензорезисторе, если коэффициенты линейного расширения (КЛР) объекта контроля и тензорезистора не равны. При этом полное относительное изменение сопротивления тензорезистора составит:

$$\frac{\Delta R_T}{R} = \alpha \Delta T + (\beta_{\text{ок}} - \beta_T) K \Delta T,$$

где α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС); $\beta_{\text{ок}}, \beta_T$ – температурные коэффициенты линейного расширения (КЛР) материала объекта контроля и материала тензорезистора соответственно; ΔT – изменение температуры.

Изменение $\frac{\Delta R_T}{R}$ эквивалентно появлению некоторой фиктивной деформации, сигнал от которой невозможно отличить от сигнала действительной, активной деформации. Для устранения этого эффекта существуют два метода. Первый состоит в применении специальных термокомпенсированных тензорезисторов. Например, медь и константан имеют ТКС разных знаков, поэтому, изготавливая решетку тензорезистора из двух материалов и подбирая сопротивление их частей соответствующим образом, можно получить нулевое приращение $\frac{\Delta R_T}{R}$ в некотором диапазоне ΔT .

Второй метод устранения фиктивной деформации от температуры заключается в применении компенсационного тензорезистора, который устанавливается в непосредственной близости от рабочего тензорезистора, но не подвергается деформациям. В результате, из значений рабочего тензорезистора вычитаются значения компенсационного тензорезистора, тем самым, исключая влияние температуры на показания рабочего тензорезистора.

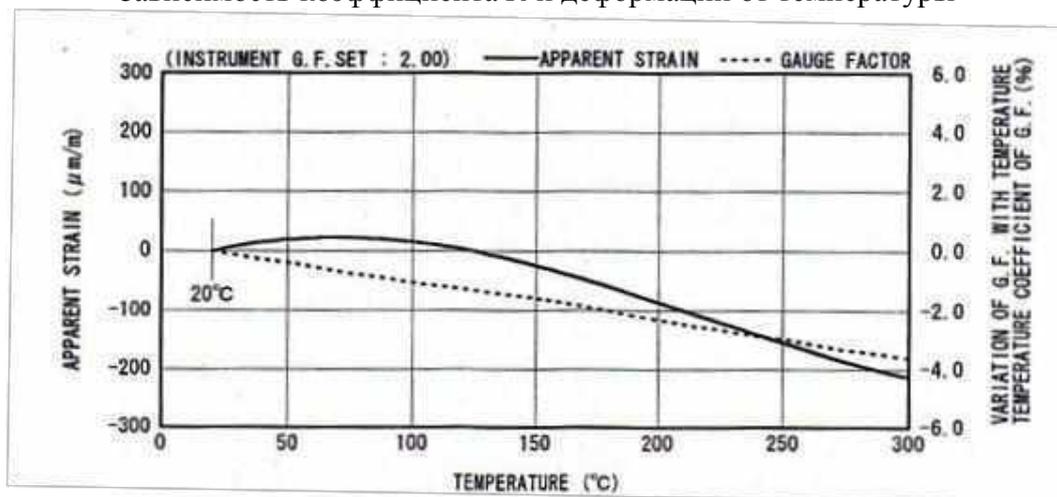
Авторами было проведено исследование влияния температурного воздействия на показания тензорезистора. Цель работы заключалась в подтверждении паспортной зависимости деформации тензорезистора от температуры, работоспособности клея, а также в поиске решения по исключению фиктивной деформации тензорезистора от влияния температуры.

Объектом исследований являлся тензорезистор типа ZFLA. Основные технические характеристики тензорезистора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики тензорезистора ZFLA

Номинальное электрическое сопротивление R , Ом	120
Диапазон измерения деформации, млн^{-1}	± 10000
Абсолютная погрешность измерения деформации, млн^{-1}	44
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	от -196 до +300
Интервал термокомпенсации, $^{\circ}\text{C}$	от -10 до +100
Среднее значение чувствительности K	2,02

Зависимость коэффициента K и деформации от температуры

Тензорезистор приклеивался на стальную балку с помощью двухкомпонентного клея холодного отверждения. И тензорезистор, и клей применялись авторами впервые. Исследования имели большую важность, поскольку стояла задача разработки систем высокотемпературного тензометрирования оборудования РУ без применения точечной сварки для монтажа тензорезисторов.

Производилась сварка выводов тензорезистора с высокотемпературными проводами марки ПОЖ. Осуществлялось подключение тензорезистора к усилителю измерительному MGCplus для усиления и обработки сигнала.

Для нагрева балки с тензорезистором использовалась печь с программным обеспечением для контроля термического цикла, с помощью которой производился нагрев балки со скоростью $1,7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до 300°C .

По результатам первоначальных испытаний тензорезистора была установлена зависимость деформаций тензорезистора от температуры. Показания деформаций значительно превышали паспортные значения.

Таблица 2

Значения температурного коэффициента сопротивления для различных материалов

№ п/п	Наименование материала	Температурный коэффициент сопротивления, $1/^{\circ}\text{C}$
1	Медь	0,004
2	Железо	0,006
3	Алюминий	0,0039
4	Манганин	0,000015

Анализируя полученные результаты, было сделано предположение, что значительную часть деформаций от нагрева составляет фиктивная деформация провода тензорезистора, вследствие изменения его сопротивления. Металлы имеют свойство менять омическое со-

противление при изменении температуры. При изменении температуры на 1°C сопротивление $1\ \text{Ома}$ проводника повышается на величину ТКС, если ТКС положительный, и понижается – если отрицательный. Значения ТКС некоторых материалов приведены в табл. 2. Используемые провода при испытаниях – медные, поэтому сопротивление повышается на определенное значение, тем самым растут показания деформаций тензорезистора.

Для подтверждения влияния изменения сопротивления провода от температуры на показания тензорезистора было принято решение подключить к усилителю измерительному, и поместить в печь дополнительный провод в непосредственной близости от провода тензорезистора. При этом для работы измерительной цепи аппаратуры в дополнительный провод, выходящий из печи, было впаяно сопротивление $120\ \text{Ом}$.

После испытания тензорезистора с дополнительным проводом были получены данные, представленные на рис. 1. Из полученных результатов видно, что значительную часть деформаций составляют деформации от нагрева провода. После исключения фиктивной деформации от нагрева провода, вычислив разницу между значениями тензорезистора с проводом и дополнительным проводом, была получена кривая, аналогичная представленной в паспорте на тензорезистор (рис. 2). Также из графика (рис. 2) видно, что термокомпенсация тензорезистора работает до 180°C , на это указывает то, что деформации, возникающие в данном диапазоне температуры, находятся в пределах абсолютной погрешности тензорезистора.

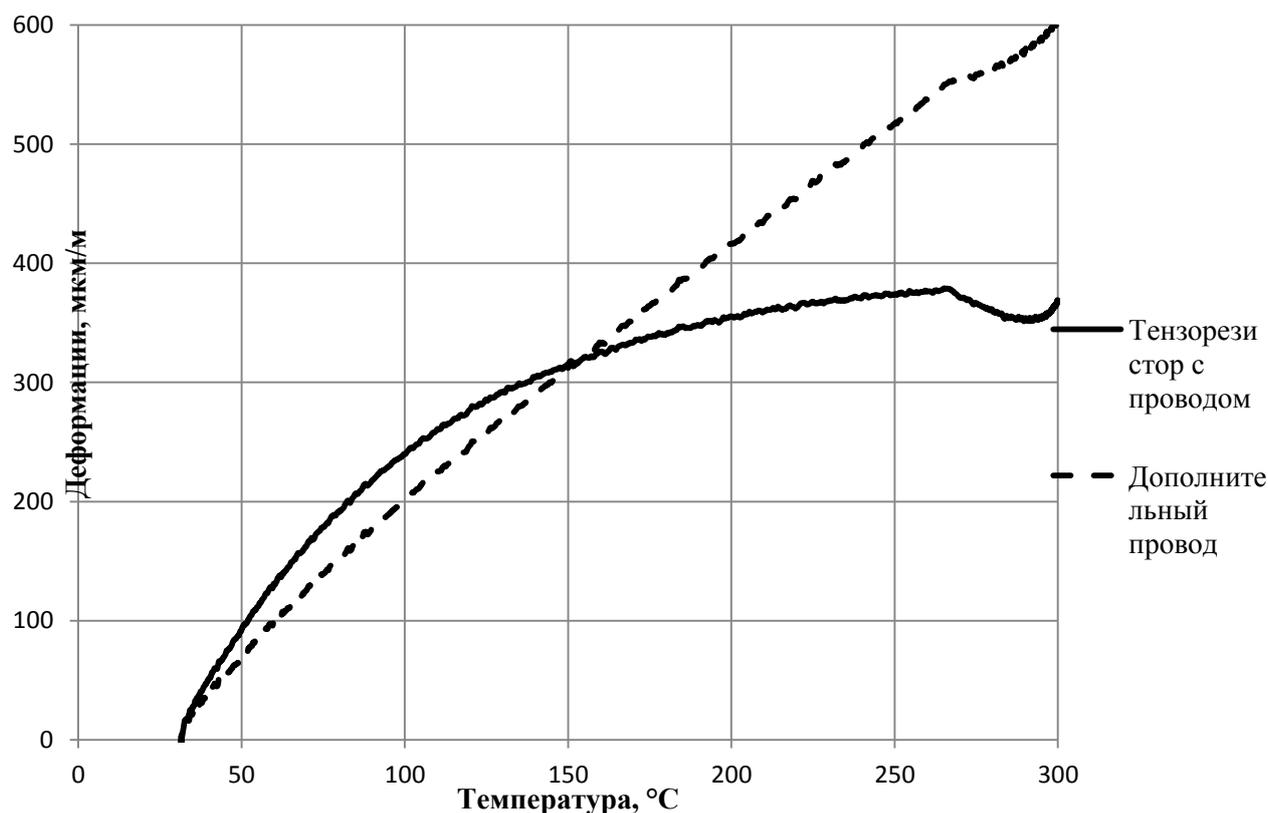


Рис. 1. Экспериментальная зависимость деформации тензорезистора и дополнительного провода от температуры

Следовательно, на основе полученных данных можно сделать вывод, что для учета влияния температуры на показания рабочего тензорезистора, необходимо и достаточно применять дополнительный дублирующий провод вместо компенсационного тензорезистора, как рекомендуется в большинстве источников литературы. При этом исключение фиктивной деформации производится вычитанием из показаний рабочего тензорезистора показаний дополнительного провода и значений градуировочной характеристики влияния температуры на показания тензорезистора (рис. 2).

В результате проведенных исследований влияния температурного воздействия на показания тензорезистора видно, что экспериментальные данные по зависимости деформаций тензорезистора от влияния температуры соответствуют паспортным значениям. Подтверждена работоспособность клея при кратковременной (~5 ч) выдержке при 300°C. Найдено решение по учету влияния температуры на показания приклеиваемого тензорезистора для испытаний оборудования РУ при 300°C.

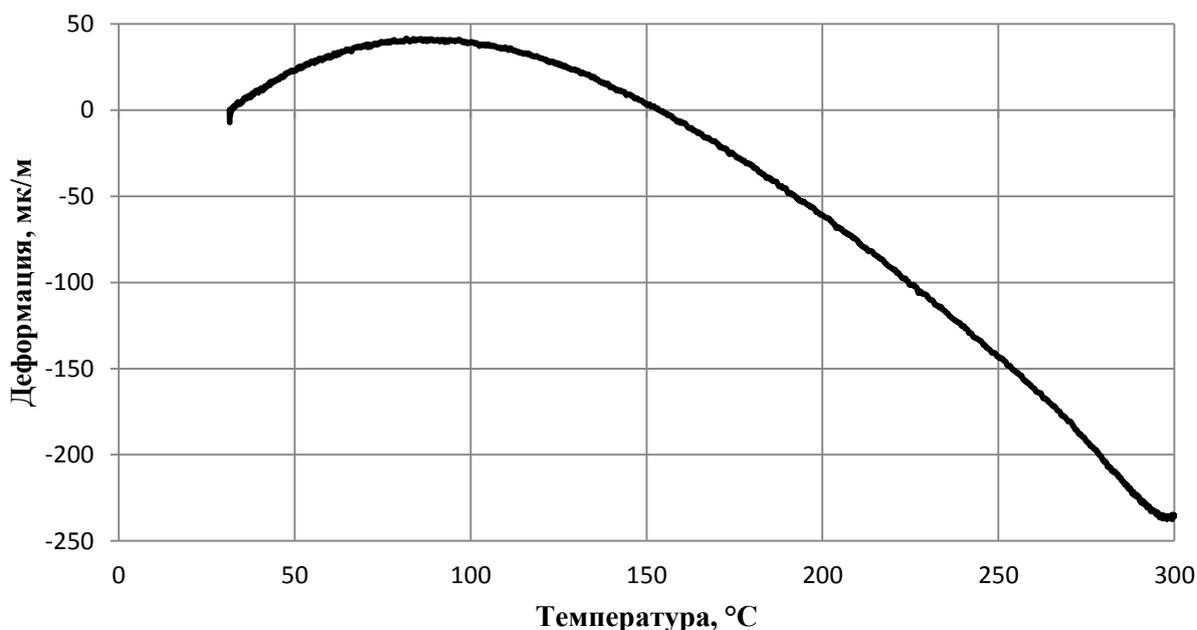


Рис. 2. Экспериментальная зависимость деформации тензорезистора от температуры

Библиографический список

1. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии: справочник / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Тензометрия в машиностроении / под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

Дата поступления
в редакцию 02.06.2015

D.V. Konurin, S.N. Pichkov, D.N. Shishulin

ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE AT THE EFFECTS INDICATIONS GLUED STRAIN GAGES FOR TESTS AT 300 °C

OKBM Afrikantov, Nizhny Novgorod

Subject: The article presents the operating principle and main characteristics of the strain gauges. The description of experimental studies to validate the rating depending on the deformation of strain gage ZFLA of temperature and performance adhesive NP-50.

Results: The method of exclusion dummy strain gage from the influence of temperature effects without compensating strain gage.

Key words: strain gage, wire, thermal effects, deformation, ohmic resistance.

УДК 539.41

А.И. Уваров

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА
НА ПРИМЕНИМОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ЛИНЕЙНЫХ РАСЧЁТНЫХ СХЕМ
ДЛЯ ПЛАСТИН, НАГРУЖЕННЫХ ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКОЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

С использованием метода Ритца разработана аналитическая модель деформирования, получено решение задачи об изгибе длинной пластины с несмещаемыми кромками под действием поперечной нагрузки с учётом геометрической нелинейности. Комбинация данной модели решения с условием прочности по суммарным напряжениям позволила провести анализ влияния механических характеристик материала пластины на уровень цепных напряжений и указать значения нагрузки, при которых этот уровень низок в зависимости от механических характеристик материала пластины.

Ключевые слова: изгиб пластин, большие прогибы, механические характеристики материала.

Введение

Тонкие пластины в строительной механике принято разделять на жёсткие пластины и пластины конечной жёсткости, в которых вследствие изгиба возникают цепные напряжения [1, 2, 3]. Для расчёта пластин конечной жёсткости используется система нелинейных дифференциальных уравнений Кармана, для расчёта жёстких пластин – линейное дифференциальное уравнение [1]. Предложен геометрический критерий разграничения: если для данной пластины стрелка прогиба превышает четверть толщины, то пластину следует отнести к пластине конечной жёсткости [1]. Данный критерий не учитывает наличие препятствия сближению кромок (распор) и не связан с механическими характеристиками материала пластины. Если распор отсутствует, и нет препятствий к сближению кромок, то, очевидно, цепные деформации и усилия малы.

С другой стороны, если нагрузка достаточно велика, то толщина пластины, определяемая из условия прочности, также достаточно велика, а стрелка прогиба достаточно мала по сравнению с расчётной толщиной пластины, что приведёт к малому уровню цепных напряжений, даже если будет обеспечен абсолютно жёсткий распор.

Цель настоящей работы – анализ влияния механических характеристик материала на применимость расчётных схем, учитывающих большие прогибы для пластин, нагруженных поперечной нагрузкой. Для проведения анализа с учётом геометрической нелинейности разработана аналитическая модель пластины, гнущейся по цилиндрической поверхности. Относительное удлинение срединной поверхности, вызванное поворотом элементов срединной поверхности при изгибе, учтено посредством разложения в ряд Маклорена с удержанием первых трёх членов ряда, а именно относительное удлинение считается равным половине квадрата угла поворота. Данное приближение соответствует принятому при выводе уравнений Кармана и даёт достаточно высокую точность при углах поворота до 15° , что вполне достаточно для пластин из металлических сплавов в пределах упругости.

Вывод искомым зависимостей

Рассмотрим свободно опертую балку-полоску длиной l (в составе пластины толщиной h , гнущейся по цилиндрической поверхности) под действием равномерно распределённой нагрузки q (давление). Будем полагать, что горизонтальное смещение опор исключено.

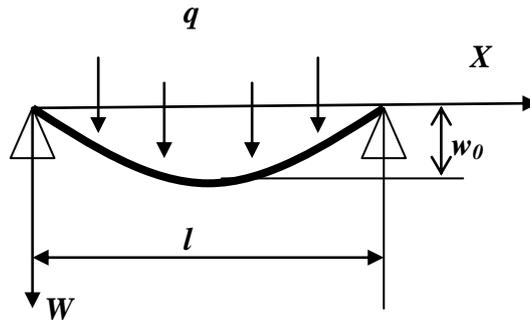


Рис. 1. Расчётная схема балки-полоски

Предположим, что форма изогнутой оси балки-полоски полуволна синусоиды:

$$w = w_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right), \tag{1}$$

где x – продольная координата; w – вертикальное перемещение; w_0 – стрелка прогиба. Принятая форма изогнутой поверхности достаточно хорошо аппроксимирует (с точностью до 0,4%) точное решение для жёсткой пластины [4].

Используем метод Ритца. Потенциальная энергия изгиба и растяжения балки-полоски:

$$\Pi = \Pi_{изг} + \Pi_{раст} = \frac{1}{2} \int_0^l D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{Eh}{(1-\nu^2)} (\varepsilon)^2 dx, \tag{2}$$

где цилиндрическая жесткость:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \tag{3}$$

E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Будем полагать, что относительное удлинение всех элементов оси балки-полоски одинаково и вычислим его величину как среднюю, вызванную поворотом элементов, следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx. \tag{4}$$

Подставляя (1) в (3) и выполняя интегрирование, найдём:

$$\varepsilon = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{1}{2} \left(\frac{w_0 \pi}{l} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{w_0}{l} \right)^2. \tag{5}$$

Подставляя выражение для прогиба (1) и относительного удлинения срединной поверхности пластины (5) в формулу (2), получим выражение для потенциальной энергии балки-полоски:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l D \left(\frac{w_0 \pi^2}{l^2} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \right)^2 dx + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\pi^2}{4} \left(\frac{w_0}{l} \right)^2 \right)^2 l. \tag{6}$$

Силовая функция внешних сил [4]:

$$U = \int_0^l q w(x) dx = \int_0^l q w_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx. \tag{7}$$

Основное уравнение метода Ритца (равенство нулю производной от полной энергии тела по параметру перемещения):

$$\frac{\partial(\Pi - U)}{\partial w_0} = 0. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (6) и (7) и выполняя интегрирование, получим

$$D \frac{l}{2} \frac{w_0 \pi^2}{l^2} + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \frac{\pi^4}{16l^3} \cdot 4w_0^3 - 2 \frac{ql}{\pi} = 0. \quad (9)$$

После подстановки соотношения (3), уравнение (9) примет вид:

$$w_0^3 \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \frac{\pi^4}{16l^3} \cdot 4 + w_0 \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \frac{l}{2} \frac{\pi^2}{l^2} - 2 \frac{ql}{\pi} = 0. \quad (10)$$

Разделив левую и правую части (10) на множитель при w_0^3 и h^4 , получим

$$\left(\frac{w_0}{h}\right)^3 + \frac{1}{3} \frac{w_0}{h} - \frac{16(1-\nu^2)}{\pi^5} \frac{q}{E} \left(\frac{l}{h}\right)^4 = 0. \quad (11)$$

Введём обозначения:

$\bar{w} = \frac{w_0}{h}$ – относительная стрелка прогиба (отношение стрелки прогиба к толщине пластины);

$\bar{l} = \frac{l}{h}$ – относительная ширина пластины (отношение ширины к толщине пластины);

$\bar{q} = \frac{q}{E}$ – относительное давление (отношение давления к модулю Юнга).

Тогда для $\nu = 0,3$ уравнение (11) можно записать в виде

$$\bar{w}^3 + \frac{1}{3} \bar{w} - 0,0475786 \bar{q} \bar{l}^4 = 0. \quad (12)$$

Условием прочности будем считать равенство суммы изгибных и цепных напряжений пределу текучести:

$$\sigma_{II} + \sigma_{II} = \sigma_T. \quad (13)$$

Максимальные изгибные напряжения для принятой аппроксимации прогибов равны:

$$\sigma_{II} = \frac{h}{2} \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{\max} = \frac{h}{2} \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{\pi^2}{l^2} w_0. \quad (14)$$

Цепные напряжения:

$$\sigma_{II} = \frac{E \varepsilon}{(1-\nu^2)} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{w_0}{l} \right)^2. \quad (15)$$

Подставляя выражения (14) и (15) в уравнение (13), получим

$$\frac{h}{2} \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{\pi^2}{l^2} w_0 + \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{w_0}{l} \right)^2 = \sigma_T. \quad (16)$$

Введём обозначение:

$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E}$ – относительное удлинение, соответствующее пределу текучести.

Разделив левую и правую части (16) на множитель при w_0^2 и h^2 , с учётом принятых обозначений получим

$$\bar{w}^2 + 2\bar{w} - \frac{4(1-\nu^2)}{\pi^2} \cdot \varepsilon_T \cdot \bar{l}^2 = 0. \quad (17)$$

Для $\nu = 0,3$ уравнение (17) примет вид

$$\bar{w}^2 + 2\bar{w} - 0,368809 \varepsilon_T \bar{l}^2 = 0. \quad (18)$$

Как известно, уравнение метода Ритца есть аналог условия равновесия [4]. Одновременное выполнение равенств (12) и (18) (т. е. условий равновесия и прочности) можно считать необходимым условием решения задачи назначения размеров элемента конструкции, для которого в качестве расчетной схемы используется балка-полоска. Для решения данной инженерной задачи необходимо совместное решение уравнений (12) и (18) как системы из двух нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \bar{w}^3 + \frac{1}{3}\bar{w} - 0,0475786 \bar{q} \bar{l}^4 &= 0, \\ \bar{w}^2 + 2\bar{w} - 0,368809 \varepsilon_T \bar{l}^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Считая заданными силовые параметры \bar{q} и ε_T , т.е. нагрузку и механические свойства материала, решая систему (19), находим геометрические параметры \bar{l} и \bar{w} – толщину пластины и стрелку прогиба.

Система (19) соответствует отсутствию сближения кромок пластины, т.е. абсолютно жёсткому распору. Если распор отсутствует и кромки пластины имеют возможность свободно сближаться, то цепные деформации и напряжения равны нулю. Тогда в уравнении (12) будет отсутствовать \bar{w}^3 и оно примет вид:

$$\bar{w} = 0,142736 \bar{q} \bar{l}^4. \quad (20)$$

В уравнении (18) будет отсутствовать \bar{w}^2 и оно примет вид:

$$\bar{w} = 0,184405 \varepsilon_T \bar{l}^2. \quad (21)$$

Приравнивая правые части (20) и (21), находим

$$\bar{l} = \sqrt{\frac{1,29193 \varepsilon_T}{\bar{q}}}. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (20), получим

$$\bar{w} = 0,23237 \frac{\varepsilon_T^2}{\bar{q}}. \quad (23)$$

Таким образом, система (19) содержит учёт геометрической нелинейности и соответствует пластинам большого прогиба, а формулы (22) и (23) есть линейные решения и описывают поведение пластин малого прогиба или жёстких пластин.

Анализ результатов расчётов по полученным зависимостям

Сопоставим результаты решения системы (19) (нелинейное решение) и расчёты по формулам (22) и (23) (линейное решение). На приведённых далее графиках представлены результаты расчётов для сталей с пределом текучести 235 МПа и 390 МПа с модулем Юнга $2 \cdot 10^5$ МПа (рис. 2) и алюминиевых сплавов с пределом текучести 80 МПа и 175 МПа с модулем Юнга $0,7 \cdot 10^5$ МПа (рис. 3).

На данных графиках видно, что для каждого материала имеется некоторая величина давления, выше которой результаты расчётов по линейному и нелинейному решениям совпадают. Эта величина зависит от предела текучести и растёт с его увеличением. Для сталей с пределом текучести 235 МПа и 390 МПа эта величина равна ориентировочно 0,175 МПа и 0,5 МПа, а для алюминиевых сплавов с пределом текучести 80 МПа и 175 МПа – 0,06 МПа и 0,25 МПа соответственно. Следует отметить, что принятая форма прогиба (1) отличается от точного линейного решения всего на 0,4% [4], что даёт основание полагать, что граница линейного и нелинейного решений определена достаточно точно. Очевидно, что если распор не

является абсолютно жёстким, то данные величины давления будут меньше. При введении в условие прочности коэффициента запаса данные величины также уменьшаются.

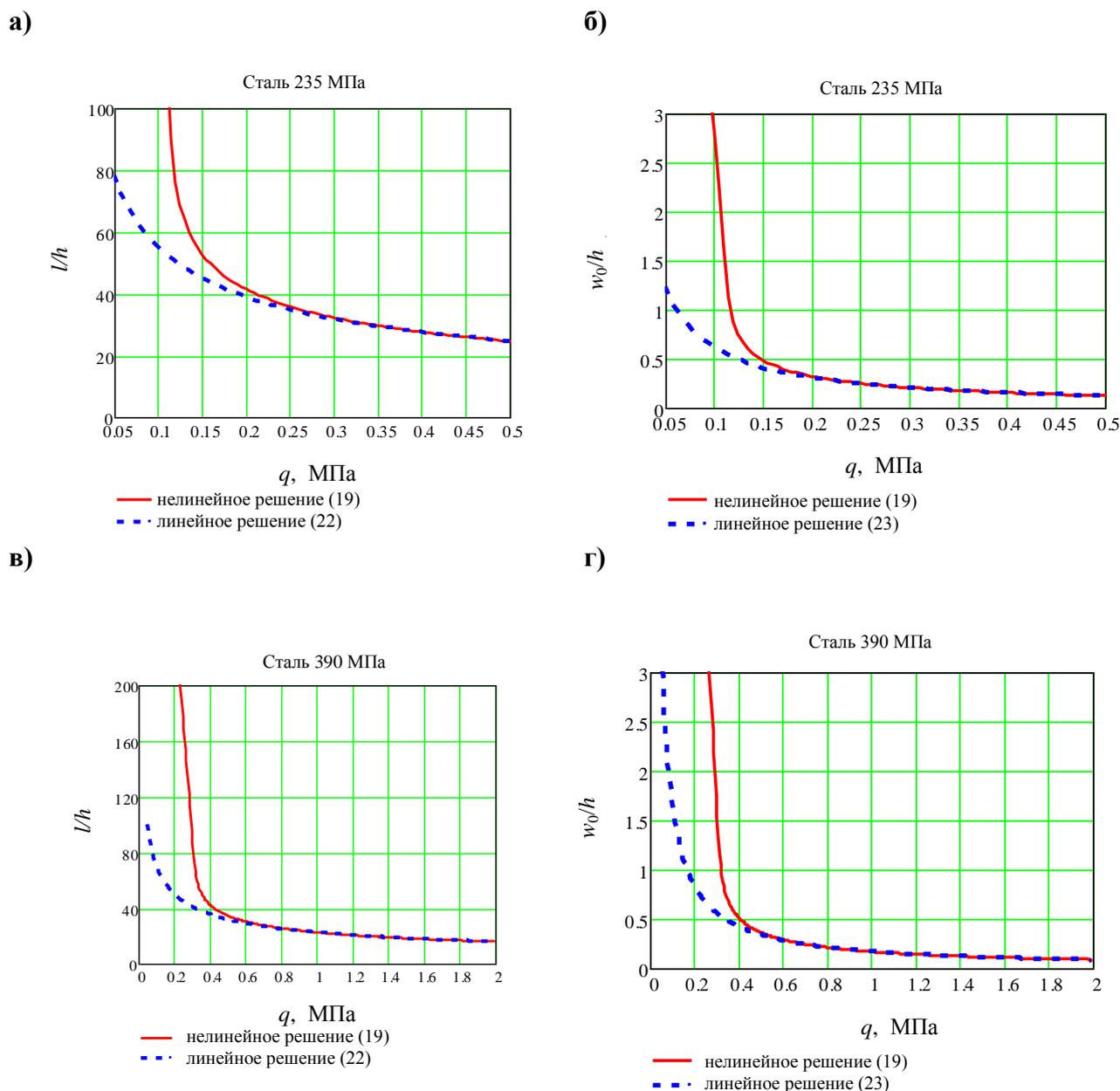


Рис. 2. Относительная ширина пластины и относительная стрелка прогиба для стали с пределом текучести 235МПа (а, б), и 390МПа (в, г)

Принятые в приведённых расчётах значения пределов текучести соответствуют наибольшим и наименьшим приведённым в таблицах Регистра [5].

Данные значения давления превышают типичные значения расчётных нагрузок для пластин судового корпуса речных судов, однако могут встречаться в морском судостроении и некоторых элементах конструкции подводных лодок и аппаратов.

Для всех материалов заметное расхождение результатов линейного и нелинейного решений начинается при превышении стрелкой прогиба примерно одной трети толщины, что практически не сильно отличается от известного критерия четверть толщины [1]. На приведённом далее графике (рис. 4), построенном по результатам нелинейного решения, показано изменение относительной стрелки прогиба в зависимости от предела текучести стали при фиксированном давлении.

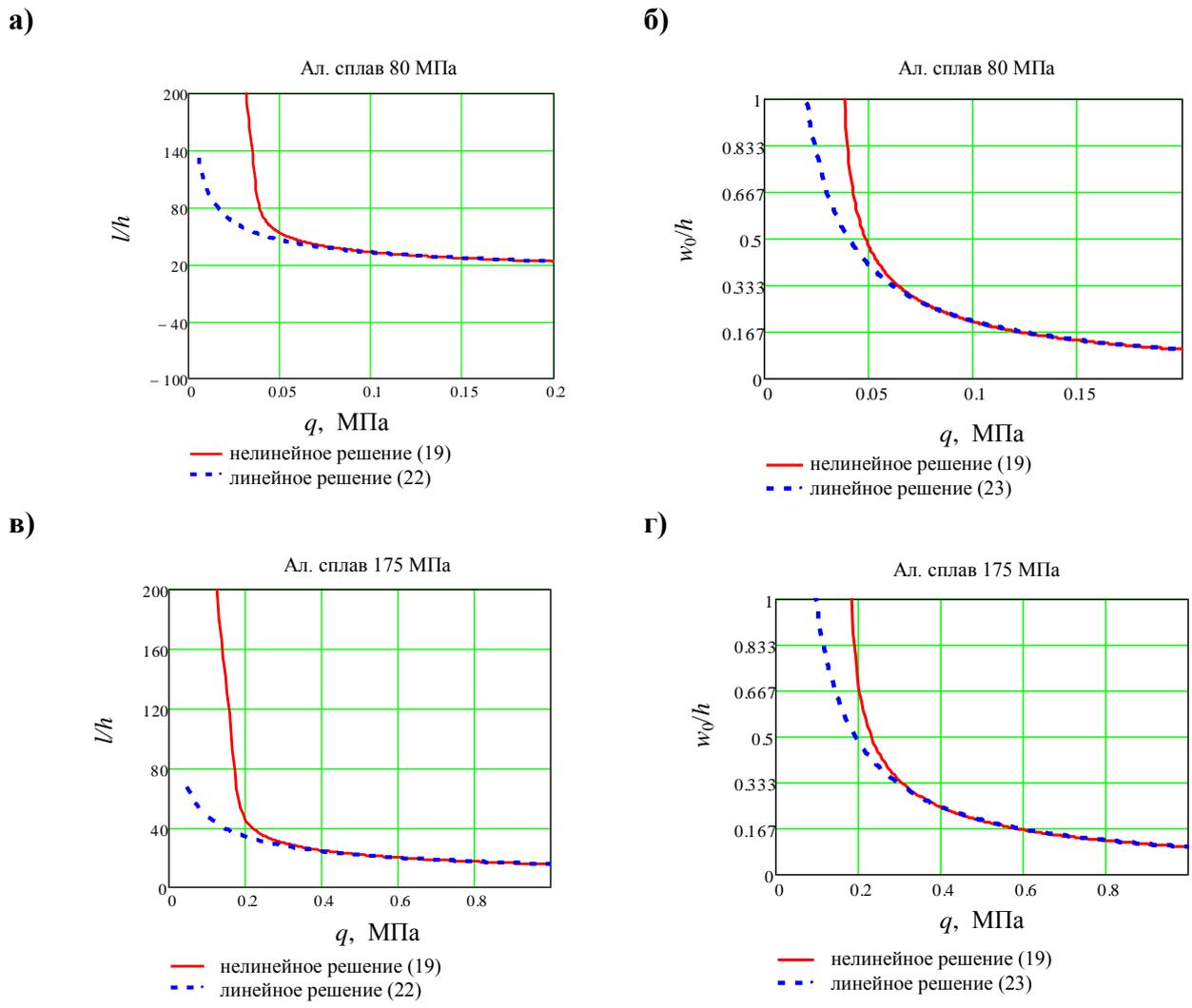


Рис. 3. Относительная ширина пластины и относительная стрелка прогиба для алюминиевого сплава с пределом текучести 80МПа (а, б) и 175МПа (в, г)

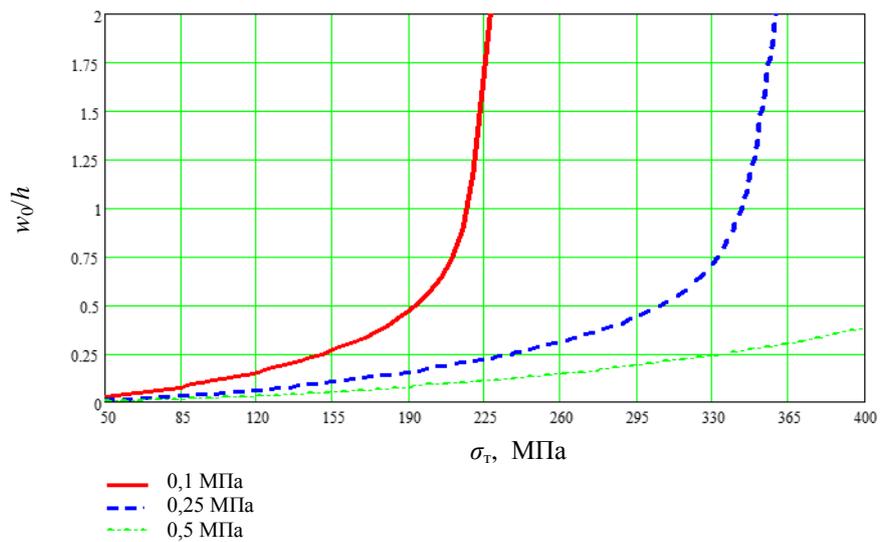


Рис. 4. Относительная стрелка прогиба в зависимости от предела текучести стали для фиксированного давления

Из рассмотрения данных графиков следует, что если основываться на критерии «четверть толщины», то вне зависимости от распора линейное поведение пластин будет иметь место: для давления 0,1 МПа – для предела текучести меньше 155 МПа, для давления 0,25 МПа – для предела текучести меньше 230 МПа, для давления 0,5 МПа – для предела текучести меньше 330 МПа.

Выводы

Получены зависимости, учитывающие влияние механических характеристик материала на характер деформирования длинной пластины при действии поперечной нагрузки. На основании расчётов по разработанной расчётной схеме, учитывающей геометрическую нелинейность, установлены величины давлений, при которых для материалов с заданными механическими характеристиками может быть использована расчётная схема пластины малого прогиба. Геометрическому критерию относительной стрелки прогиба поставлены в соответствие значения величины поперечной нагрузки.

Библиографический список

1. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. Т. 2: Пластины. Теория упругости, пластичности и ползучести. Численные методы / Г.В. Бойцов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1982. – 462 с.
2. Прочность судов внутреннего плавания: справочник / В.В. Давыдов [и др.]. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.
3. **Вайнберг, Д.В.** Расчёт пластин / Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг. – Киев: Будевільник, 1970. – 436 с.
4. Строительная механика корабля и теория упругости: в 2 т. Т. 1 : Теория упругости и численные методы решения задач строительной механики корабля / Д.М. Ростовцев [и др.]. – Л.: Судостроение, 1980. – 288 с.
5. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. Т. 2: Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания: ч. I. Корпус, ч. V. Материалы и сварка. – М., 2008. – 406 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

A.I. Uvarov

THE INFLUENCE OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL ON THE APPLICABILITY OF THE GEOMETRICALLY LINEAR CALCULATION SCHEMES FOR PLATES LOADED BY TRANSVERSE LOADS

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

Purpose: To find the limit of linear behavior of metallic plate under transverse load.

Method: The theory of plates with large deflection was used taking into account the membrane stresses. By the energy method, the solution for long plates was obtained. This decision combined with the condition of strength. The result was a system of two nonlinear equations. Given the properties of the material and the load is determined by the plate thickness and maximum deflection. The results of linear and nonlinear solutions were compared.

Findings: Set the value of the load that separates the linear and nonlinear behavior of elastic plates, depending on the material properties.

Conclusion: The obtained results indicate the range of use for more simple and reliable plates calculation schemes.

Key words: bending of plates, large deflections, the mechanical characteristics of the material.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

В.В. Ваняев, К.Н. Иванычев, Я.А. Карпов, С.А. Коротков

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА DC – DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ АИР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены аналитические выражения для определения параметров и выбора основных пассивных элементов силовой цепи $DC – DC$ преобразователя с последовательным автономным резонансным инвертором: конденсатора, дросселя и трансформатора. Дана методика расчета этих элементов.

Ключевые слова: преобразователь, автономный резонансный инвертор, конденсатор, дроссель, трансформатор, методика расчета.

В настоящее время достаточно широкое применение в структурах $DC – DC$ и $AC – DC$ преобразователей различной мощности получили транзисторные автономные резонансные инверторы (АИР), в частности, с последовательным резонансным контуром [1, 2]. Несмотря на присущее им несовершенство регулировочных свойств, они успешно применяются в системах зарядки накопительных конденсаторов и источниках вторичного электропитания с неизменным выходным напряжением.

Важнейшими достоинствами таких устройств являются простая силовая схема, особенно, в полумостовом варианте исполнения, в которых нет сглаживающего дросселя в цепи постоянного тока, практически отсутствуют динамические потери в транзисторах, простой алгоритм работы и высокая надежность.

Так, при выборе относительного значения частоты собственных колебаний резонансного контура последовательного АИР из условия

$$\omega_0^* = \omega_0 / \omega_p \geq 2, \quad (1)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - круговая частота собственных колебаний контура (C , L - величины емкости и индуктивности резонансного контура); ω_p - круговая рабочая частота АИР, внешняя характеристика $DC – DC$ преобразователя с идеализированным последовательным АИР имеет два участка. На первом участке преобразователь работает в режиме источника напряжения равного $U_n/2$, а на втором – источника тока, среднее значение которого, согласно [3], определяется по формуле

$$I_{AV} = \frac{2U_n}{\pi\omega_0^*} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (2)$$

где U_n - напряжение питания АИР (значения напряжения и тока приведены к первичной обмотке трансформатора преобразователя). Такая особенность внешней характеристики $DC – DC$ преобразователя при $\omega_0^* \geq 2$ обеспечивает параметрическую защиту устройства при КЗ в цепи нагрузки и его высокую надежность, что для ряда применений играет решающую роль.

Несмотря на эти достоинства рассматриваемых устройств в известной литературе, материалы по режимам работы, инженерной методике расчета и выбору пассивных элементов силовой цепи $DC - DC$ преобразователей в описанном ранее режиме работы весьма разрозненны. Это, в частности, затрудняет работу студентов старших курсов и магистрантов при выполнении ими самостоятельных научно-исследовательских и расчетных работ, что вызывает необходимость восполнить этот пробел.

К основным пассивным элементам силовой цепи относятся трансформатор, дроссель и конденсатор последовательного резонансного контура.

Конденсатор

Наибольшее среднее значение мощности, потребляемой полумостовым АИР в установившемся режиме, соответствующее границе жесткой части его внешней характеристики, согласно результатам анализа электромагнитных процессов [3], определяется по формуле

$$P_{\Pi} = 2f_p C U_{\Pi}^2, \quad (3)$$

где $f_p = \omega_p / 2\pi$.

Требуемое значение емкости конденсатора резонансного контура, обеспечивающее заданное значение мощности в нагрузке, в соответствии с (3) будет

$$C = \frac{P_{\Pi}}{2\eta_{\Pi} \cdot f_p \cdot U_{\Pi}^2}. \quad (4)$$

где P_{Π} - наибольшая расчетная мощность, передаваемая в нагрузку; η_{Π} - КПД преобразователя.

Амплитуда напряжения конденсатора определяется по формуле

$$U_{Cm} = \frac{1}{C\omega_0} I_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5)$$

где I_m - амплитуда тока резонансного контура.

Наибольшее значение амплитуды тока I_m , согласно (2), будет

$$I_m = U_{\Pi} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (6)$$

Наибольшее значение амплитуды напряжения на конденсаторе, в соответствии с (5) и (6) равно

$$U_{Cm}^{\max} = U_{\Pi}. \quad (7)$$

Дроссель

Наиболее напряженным для магнитопровода дросселя является режим на границе жесткой части внешней характеристики АИР где, как следует из анализа процессов, амплитуда тока дросселя максимальна и имеет значение, определяемое в соответствии с (6).

Амплитуда потокосцепления обмотки дросселя в этом режиме будет

$$\Psi_m = L I_m = U_{\Pi} \sqrt{LC}. \quad (8)$$

Амплитуда потокосцепления обмотки дросселя может быть определена также по формуле

$$\Psi_m = B_m \Pi_c w, \quad (9)$$

из которой находим число витков дросселя при выбранных значениях амплитуды индукции B_m и активной площади сечения Π_c его магнитопровода

$$w = \frac{\Psi_m}{B_m \Pi_c} = \frac{U_{\Pi}}{B_m \Pi_c} \sqrt{LC} = \frac{U_{\Pi}}{\omega_0 B_m \Pi_c} = \frac{U_{\Pi}}{2\pi \cdot \omega_0^* \cdot f_p \cdot B_m \Pi_c}. \quad (10)$$

Действующее значение тока обмотки связано с параметрами магнитопровода формулой

$$I_{RMS} = j \cdot q = \frac{j \cdot k_{ок} \Pi_{ок}}{w}, \quad (11)$$

где j - плотность тока; q - сечение провода обмотки; $\Pi_{ок}$, $k_{ок}$ - площадь окна магнитопровода и коэффициент его заполнения медью (рекомендуемое значение в зависимости от типа трансформатора составляет $k_{ок} = 0,15 \div 0,4$ [4]).

Среднее за полупериод значение тока обмотки дросселя I_{AV} полумостового АИР можно определить по формуле

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi \omega_0^*} I_m = \frac{2P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (12)$$

Из (12) получаем следующее расчетное выражение амплитуды тока дросселя:

$$I_m = \frac{\pi \omega_0^* P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (13)$$

Действующее значение тока дросселя с учетом (12) будет

$$I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2 \omega_0^*}} = \frac{\pi \omega_0^* P_H}{\sqrt{2 \omega_0^*} \eta_{п} U_{п}} = \sqrt{\frac{\omega_0^*}{2}} \cdot \frac{\pi P_H}{\eta_{п} U_{п}}. \quad (14)$$

Решая совместно (10), (11) и (14), определяем габаритный показатель дросселя

$$\Pi_{ок} \Pi_{с} = \frac{P_H}{2 \sqrt{2 \omega_0^*} \cdot \eta_{п} \cdot f_p \cdot B_m \cdot j \cdot k_{ок}}. \quad (15)$$

Плотность тока в формуле (15) может быть определена по эмпирической формуле согласно [5]:

$$j = 1,5 + \frac{24}{\sqrt{P_{габ}}}, \quad (16)$$

где $P_{габ}$ - габаритная мощность дросселя.

Габаритная мощность дросселя (трансформатора) определяется по формуле

$$P_{габ} = U_{RMS} \cdot I_{RMS}, \quad (17)$$

в которой наибольшее действующее значение напряжения U_{RMS} на обмотке дросселя в рассматриваемом режиме работы АИР с учетом (6) определяется по формуле

$$U_{RMS} = \frac{U_m}{\sqrt{2 \cdot \omega_0^*}} = \frac{U_{п}}{\sqrt{2 \cdot \omega_0^*}}. \quad (18)$$

Подставляя (14) и (18) в формулу (17), находим выражение для расчета габаритной мощности дросселя

$$P_{габ} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} = \frac{\pi P_H}{2 \cdot \eta_{п}}. \quad (19)$$

Величину индуктивности дросселя резонансного контура рассчитывают по формуле

$$L = \frac{1}{C \omega_0^2}. \quad (20)$$

Для обеспечения рассчитанного значения индуктивности магнитопровод дросселя выполняют с немагнитным зазором, длину которого, при прочих известных параметрах, находят из выражения

$$l_3 = \mu_0 \frac{w^2 \Pi_{с}}{L}, \quad (21)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Трансформатор (двухобмоточный)

Напряжение первичной обмотки трансформатора u_1 выражается следующим образом:

$$u_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} \approx \frac{w_1 \cdot \Pi_c \cdot dB}{dt}, \quad (22)$$

где Ψ_1 и w_1 - потокосцепление и число витков первичной обмотки, соответственно; B - индукция, в магнитопроводе; Π_c - активная площадь поперечного сечения сердечника трансформатора.

В рассматриваемом режиме работы $DC - DC$ преобразователя напряжение на обмотках трансформатора имеет прямоугольную форму или близкую к ней форму, при которой приращение индукции на полупериоде работы АИР будет

$$\Delta B = \frac{U_{\Pi}}{4f_p w_1 \cdot \Pi_c}. \quad (23)$$

При симметричном перемагничивании магнитопровода справедливо равенство

$$dB = \Delta B = 2B_m, \quad (24)$$

где B_m - амплитудное значение индукции, которое, согласно, например, рекомендациям фирмы EPCOS, выбирают в пределах $B_m = (0,5 \div 0,75) \cdot B_S$ (B_S - индукция насыщения материала магнитопровода).

Из уравнения (23) с учетом (24) находим число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{U_{\Pi}}{8f_p B_m \Pi_c}. \quad (25)$$

Число витков w_2 вторичной обмотки при заданном коэффициенте трансформации k_{21} равно $w_2 = k_{21} w_1$.

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора I_{RMS}

при равных мощностях обмоток и плотности токов в них определяется по формуле, аналогичной (11):

$$I_{RMS} = \frac{j \cdot k_{OK} \Pi_{OK}}{2w_1}. \quad (26)$$

Из (25) и (26) находим габаритный параметр магнитопровода трансформатора

$$\Pi_c \Pi_{OK} = \frac{U_{\Pi} I_{RMS}}{4f_p B_m k_{OK} j} = \frac{P_{Габ}}{4f_p B_m k_{OK} j}, \quad (27)$$

где $P_{Габ} = U_{\Pi} I_{RMS}$ - габаритная мощность трансформатора.

Габаритную мощность трансформатора, согласно выражению (17), определяем из формулы

$$P_{Габ} = U_{\Pi} I_{RMS} = \sqrt{\frac{\omega_0^*}{2}} \cdot \frac{\pi P_H}{\eta_T}, \quad (28)$$

η_T - КПД трансформатора.

Величина КПД трансформатора в выражении (28) при мощностях до $P_H \leq 300$ Вт может быть рассчитана по эмпирической формуле, полученной согласно рисунку [4]:

$$\eta_T = 0,99 - \frac{0,175}{f_p} - \frac{1 + \frac{9,95}{f_p^{1,3}}}{P_H}. \quad (29)$$

Значение плотности тока в обмотках трансформатора определяют по рассчитанной величине $P_{Габ}$ в соответствии с формулой (16).

Для исключения динамических потерь в транзисторах АИР, обусловленных током намагничивания трансформатора, его первичную обмотку целесообразно шунтировать конденсатором $C_{ш}$ небольшой емкости [3], величину которой выбирают из условия

$$C_{ш} \geq C_{гр}^* C, \quad (30)$$

где $C_{гр}^*$ - максимальное относительное граничное значение емкости шунтирующего конденсатора, обеспечивающее бестоковую коммутацию транзисторов, принимая во внимание, что увеличение $C_{ш}$ ведет к некоторому снижению выходной мощности преобразователя. Величину $C_{гр}^*$ выбирают из графика, приведенного на рисунке, в зависимости от относительной индуктивности L_{μ}^* контура намагничивания трансформатора.

Величину L_{μ}^* определяют по формуле

$$L_{\mu}^* = \frac{\mu\mu_0 w_1^2 \Pi_c}{l_c L} = \frac{A w_1}{L}, \quad (31)$$

где μ , l_c - относительная магнитная проницаемость материала и средняя длина силовой линии магнитопровода трансформатора соответственно; A - индуктивность, приходящаяся на один виток первичной обмотки.

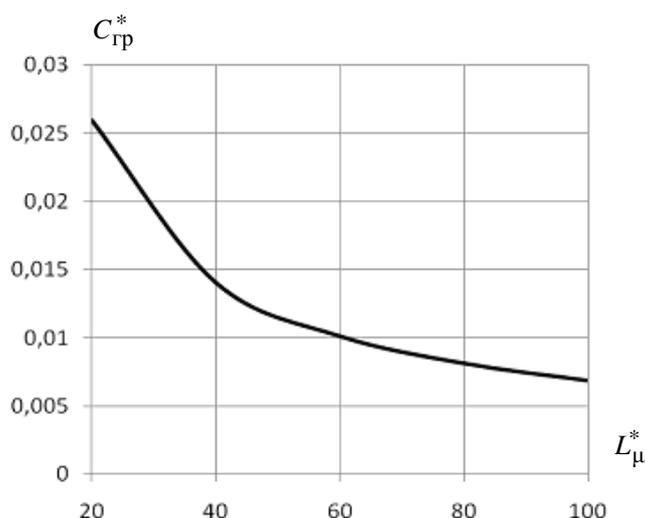


Рис. 1. Зависимость максимального относительного граничного значения емкости шунтирующего конденсатора от относительной величины индуктивности намагничивания контура

Методика расчета элементов:

- по заданному значению мощности $P_{зад}$ нагрузки с коэффициентом запаса $k_3 = 1,1 \div 1,3$ рассчитывают величину наибольшей расчетной мощности P_H , передаваемой в нагрузку $P_H = k_3 P_{зад}$;
- по заданным значениям U_H , f_p , задаваясь значениями η_H и ω_0^* в соответствии с (4), определяют величину емкости C и индуктивности L резонансного контура;
- из (7) определяют максимальную амплитуду напряжения U_{Cm}^{max} на конденсаторе, по каталогам выбирают тип конденсатора;
- по (19) рассчитывают $P_{габ}$ дросселя и далее в соответствии с (16) находят плотность тока его обмотки j ;

- в соответствии с (15), задаваясь значением B_m , определяют габаритный параметр $\Pi_{ок}\Pi_c$, по которому в каталогах находят требуемый разрезной магнитопровод;
- уточняют величины $\Pi_{ок}$, Π_c и по формулам (10), (11), (21) определяют обмоточные данные дросселя w , q и длину немагнитного зазора;
- по формулам (29), (28) рассчитывают $P_{габ}$ трансформатора и затем, согласно (16), находят плотность тока его обмоток j ;
- по формуле (27), задаваясь значением B_m , определяют габаритный параметр $\Pi_{ок}\Pi_c$, по которому в каталогах находят требуемый магнитопровод;
- уточняют величины $\Pi_{ок}$, Π_c , и по формулам (25), (11) и заданному коэффициенту трансформации k_{21} рассчитывают обмоточные данные трансформатора w_1 , w_2 , q_1 , q_2 ;
- по формулам (30) и (31) рассчитывают емкость $C_{ш}$ шунтирующего конденсатора.

Приведенный материал и методика позволяют выполнить предварительный, эскизный расчет пассивных элементов преобразователя, а также дает ряд данных к расчету его полупроводниковых компонентов. При необходимости он может быть уточнен расчетами потерь в элементах и процессах теплообмена, согласно изложенному, например, в [2].

Библиографический список

1. Розанов, Ю.К. Силовая электроника / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
2. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005.
3. Копелович, Е.А. Особенности электромагнитных процессов в высоковольтных источниках питания с последовательным резонансным инвертором / Е.А. Копелович, В.В. Ваняев, С.В. Хватов // Электротехника. 2011. №10. С. 13а–20.
4. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч. И. Хусаинов [и др.]; под ред. Г. С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Эраносян, С. А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями / С.А. Эраносян. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

V.V. Vaniaev, K. N. Ivanichev, Y. A. Karpov, S. A. Korotkov

CALCULATION OF THE ELEMENTS OF THE RESONANT CIRCUIT DC-DC CONVERTER WITH SERIAL RESONANT INVERTER

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

Purpose: Lead design ratio and method that enables the calculation of all the electromagnetic components of the DC-DC converters which based on autonomous resonant inverter with a series resonant circuit.

Design, methodology, approach: All analytical expressions were tested using a mathematical model of the Converter in the program Mathlab.

Findings: In the article given the method of calculation of the basic electromagnetic elements of converter with self-contained resonant inverter: capacitor, inductor and transformer.

Research limitations/implications: In this method missing verification thermal calculations of elements.

Originality/value: The article is relevant and of interest to young professionals working in the field of power electronics.

Key words: converter, standalone resonant inverter, capacitor, inductor, transformer, method of calculation.

УДК 621.316.79

А.Б. Дарьенков, Д.А. Бадугин, Е.В. Бычков, В.Л. Мельников,
В.В. Соколов, Е.О. Смирнов, Д.А. Комраков

ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ГИБРИДНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрен принцип регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при изменении мощности нагрузки. Приведено описание функциональной схемы нейросетевого задатчика экономичного режима и основных принципов его работы.

Ключевые слова: ветрогенератор, дизель-генератор, электростанция, задатчик экономичного режима, искусственные нейронные сети.

Одним из приоритетных направлений развития науки в сфере электроэнергетики в Российской Федерации является использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения. А это требует обеспечения максимального КПД работы генерирующих установок и повышения экономии затрат энергии.

Одним из наиболее динамично развивающихся в мире видов возобновляемой энергетики выступает ветроэнергетика. С географической и метеорологической точек зрения не вся территория РФ является благоприятной для эффективного (крупномасштабного) использования ветроэнергетики. В природной зоне центральной России в условиях существенной нестабильности ветровых процессов затруднительно поддерживать номинальные параметры работы возобновляемых энергетических установок [1]. Поэтому более целесообразным представляется использование гибридных установок, которые содержат наряду с возобновляемыми компонентами модули, работающие на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и устройства сопряжения с сетью.

Такие установки, как правило, имеют в своем составе мачту с лопастями, синхронный генератор, питающий нагрузку через инвертор, параллельно заряжая аккумуляторную батарею (АКБ) излишками генерируемой энергии.

Если при увеличении нагрузки или при уменьшении скорости ветра ветрогенератор не сможет обеспечить требуемых параметров, в работу вводится дизель-генераторная установка (ДГУ).

Как правило, ДГУ строятся на основе синхронных генераторов. При изменении мощности нагрузки P и других параметров шины постоянного тока необходимо стабилизировать частоту вращения вала дизеля ω для стабилизации и удержания частоты выходного напряжения на постоянном уровне. Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива [2]. Оптимального режима работы дизеля можно достигнуть, если с изменением мощности нагрузки изменять частоту вращения вала дизеля, поддерживая постоянную величину частоты выходного напряжения. Исследования показывают, что уменьшение частоты вращения вала дизеля при снижении нагрузки позволяет сократить удельный расход топлива на 20-30% [2]. Одновременное изменение частоты вращения и мощности нагрузки обеспечивает также оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение износа и, следовательно, повышает его моторесурс.

Для регулирования частоты вращения вала дизель-генератора при снижении мощности нагрузки используется задатчик экономичного режима (ЗЭР) – адаптивный контроллер, в основу алгоритма которого заложена концепция нейронных сетей [3].

На рис. 1 представлена модель системы управления ветродизель-генераторной элек-

тростанцией (ВДЭС) на основе ЗЭР, задачей которого является формирование сигнала управления ВДЭС во всем диапазоне состояний устойчивой работы системы. При этом изменение состояний системы должно проходить по оптимальной траектории расхода топлива согласно многопараметровой характеристике эффективного расхода топлива ДВС, приведенной на рис. 2.

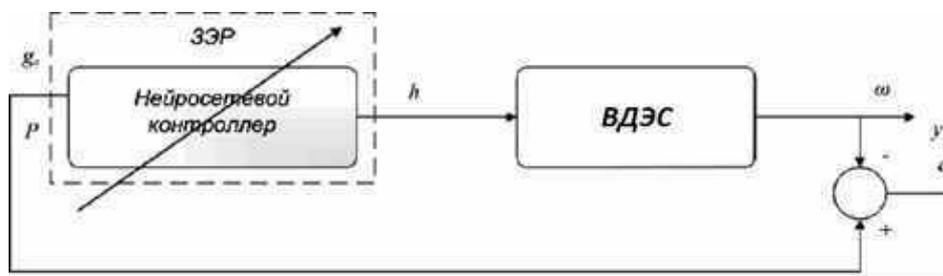


Рис. 1. Модель системы управления ВДЭС на основе нейросетевого контроллера с прямым управлением ЗЭР

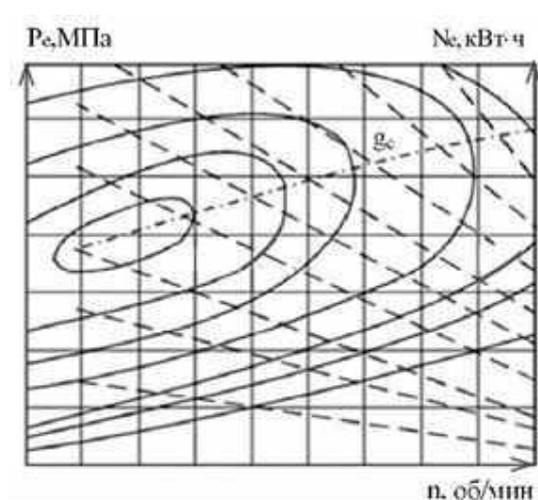


Рис. 2. Многопараметровая характеристика ДВС

Известной основой для реализации адаптивного нейросетевого контроллера является искусственная нейронная сеть (ИНС) [4].

Важнейшее свойство ИНС состоит в параллельной обработке информации одновременно всеми узлами (нейронами). Благодаря этой особенности, при большом количестве межнейронных связей достигается значительное ускорение обработки информации. Во многих ситуациях становится возможна обработка информации в реальном масштабе времени.

Другое преимущество ИНС состоит в способности к обучению и обобщению полученных знаний, т.е. адаптации к изменяющимся условиям как самой системы, так и характеристик внешней среды, не заложенных в систему в явном виде. Натренированная на ограниченном количестве обучающих выборок сеть обобщает накопленную информацию и вырабатывает ожидаемую реакцию применительно к данным, не обрабатывавшимся в процессе обучения.

Логической единицей для обработки входных переменных в ИНС является модель искусственного нейрона. На рис. 3 приведена обобщенная модель базового вычислительного узла системы, нейрона, лежащего в основе таких сетей.

В модели искусственного нейрона множество входных сигналов, обозначенных x_1, x_2, \dots, x_N , поступает на вход. Эти входные сигналы в совокупности обозначены вектором X . Каждый сигнал умножается на соответствующее значение весовой функции или вес W_1, W_2, \dots, W_N и поступает на суммирующий блок, обозначенный Σ . Множество весов функций в совокупности

обозначается вектором W . Суммирующий блок алгебраически суммирует взвешенные, согласно значениям весовых функций, входы, и на его выходе формируется скалярное значение y . Сигнал y поступает на вход функции активации, определяя сигнал возбуждения или торможения нейрона на выходе [5]. Этот сигнал поступает на синапсы следующих нейронов и т.д.

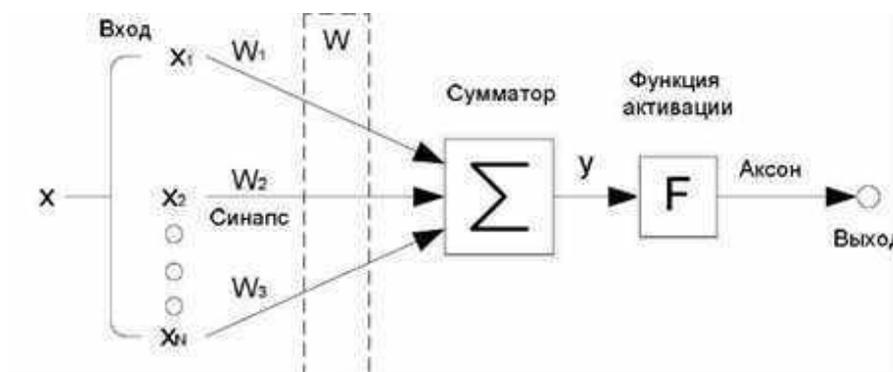


Рис. 3. Модель искусственного нейрона

Для вычисления кривой оптимального расхода топлива в схему поступают сигналы мощности канала ДВС и ветроканала, а также среднее значение расхода топлива в единицу времени. На их основании вычисляется величина оптимального удельного расхода топлива, отнесенная к единице выходной мощности. В результате работы нейросетевого контроллера (ЗЭР), на выходе системы вырабатывается управляющее воздействие на рейку топливного насоса, соответствующее минимальному расходу топлива для требуемой мощности на нагрузке.

Структурная схема нейросетевого контроллера (ЗЭР) представлена на рис. 4. ЗЭР реализует функции контроллера обучения и управления (КОиУ) и блока сопряжения и сбора данных (БСиСД). КОиУ представляет собой микропроцессорное устройство (высокопроизводительный микроконтроллер), реализующий нейросетевой интерфейс системы управления. КОиУ располагается на плате БСиСД [6].

БСиСД служит буфером для согласования логических и аналоговых входных сигналов датчиков тока, напряжения и расхода топлива, а также формирует входные сигналы для блока управления шаговым электроприводом рейки топливного насоса ДВС. Электрические цепи БСиСД обеспечивают гальваническую развязку входных и выходных сигналов микропроцессорной системы. Также на плате присутствует интерфейсный полудуплексный преобразователь последовательной шины UART-RS485 с гальванически развязанными каналами передачи данных и питания, обеспечивающий интерфейс отладки алгоритма работы микропроцессорной системы.

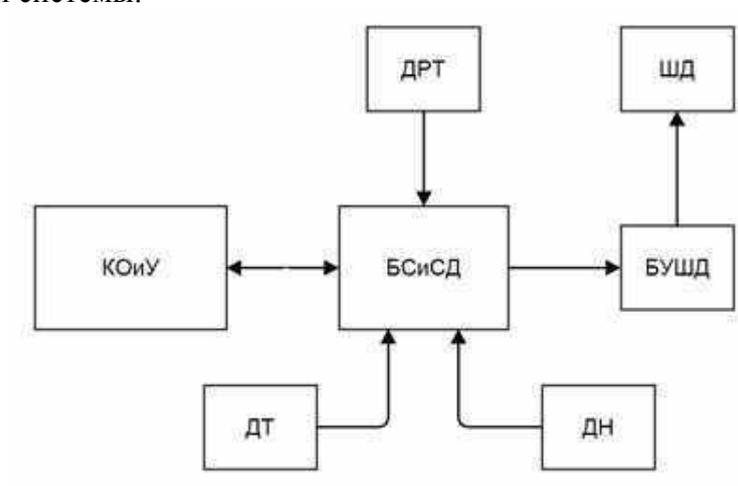


Рис. 4. Функциональная схема ЗЭР

Функциональная схема контроллера обучения и управления (КОиУ) приведена на рис. 5. Представленная схема состоит из следующих структурных элементов: контроллера управления (КУ), контроллера обучения (КО), ассоциативной памяти (АП) и памяти данных (ПД).

Контроллер управления (КУ) осуществляет общее управление системой топливоподачи. Отслеживая изменение мощности нагрузки, он вырабатывает управляющее воздействие на рейку топливного насоса на основе действующих значений мощности формируемых ветрогенератором и дизель-генератором.

Блок АП представляет собой программную модель искусственной нейронной сети. С ее помощью решается задача аппроксимации табличной функции для заданных входных параметров с целью оптимизации работы системы в текущий момент времени.

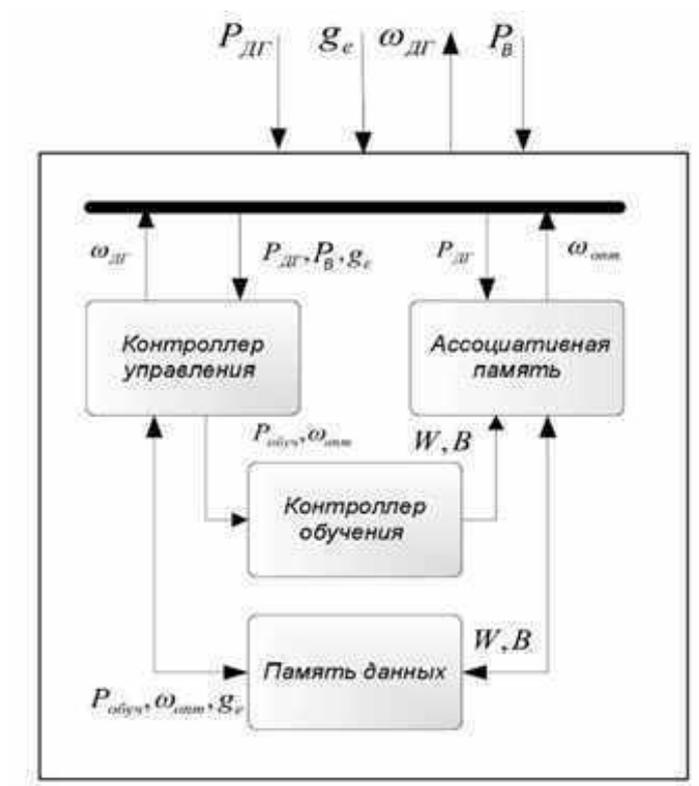


Рис. 5. Функциональная схема КОиУ

Для корректной работы АП предусмотрен КО. Данный блок производит обучение АП по алгоритму одного из известных способов обучения нейронных сетей. Массив логических зависимостей, составляющих обучающее множество, определяется КУ в процессе работы ЗЭР [3].

Принцип работы ЗЭР на основе АП поясняется блок-схемой, приведенной на рис. 6. КУ отслеживает значения мощности нагрузки и в случае ее изменения более чем на некоторую предустановленную величину $P_{шаг}$, фиксируется новое значение $P_{уст}$. Для оценки необходимости регулирования используется интегральное значение $P_{уст}$, что позволяет исключить отработку ЗЭР импульсных изменений потребляемой мощности от дизель-генератора.

Далее КУ устанавливает принадлежность нового значения мощности к диапазону значений, уже запомненных в АП – диапазону обучения ЗЭР, в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 7 [4].

Массив значений $P_{обуч}$, накапливаемый в процессе эксплуатации дизель-генератора, хранится в ПЗУ ЗЭР. Он представляет собой табличную функцию $\omega_{опт}=f(P_{обуч})$, значения в которой определены с некоторым шагом $P_{шаг}$. Величина $P_{шаг}$ - шаг обучения нейронной сети, физически представляет область, в которой нейронная сеть «предсказывает» поведение функции $\omega_{опт}=f(P)$ с достаточной точностью.

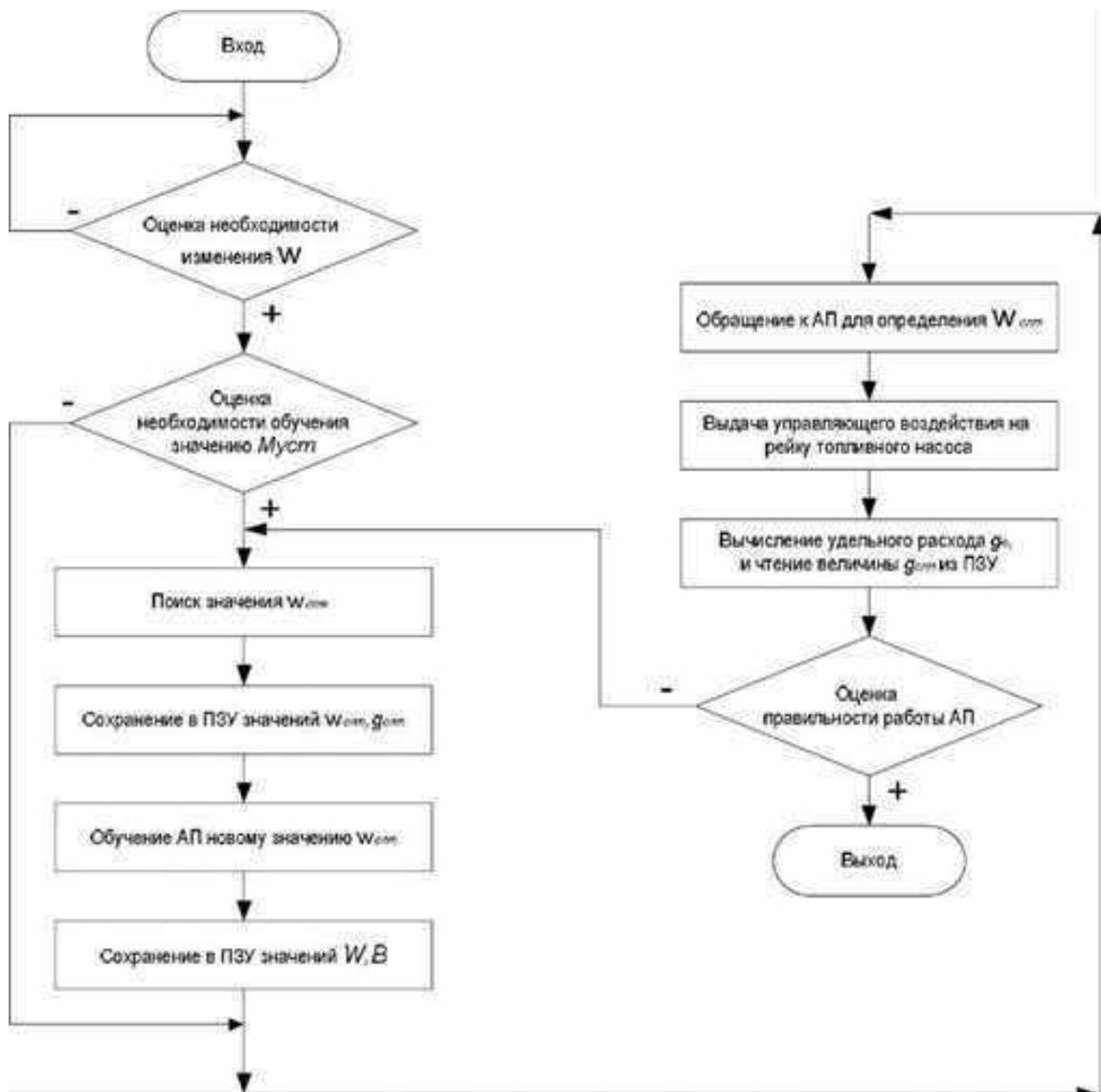
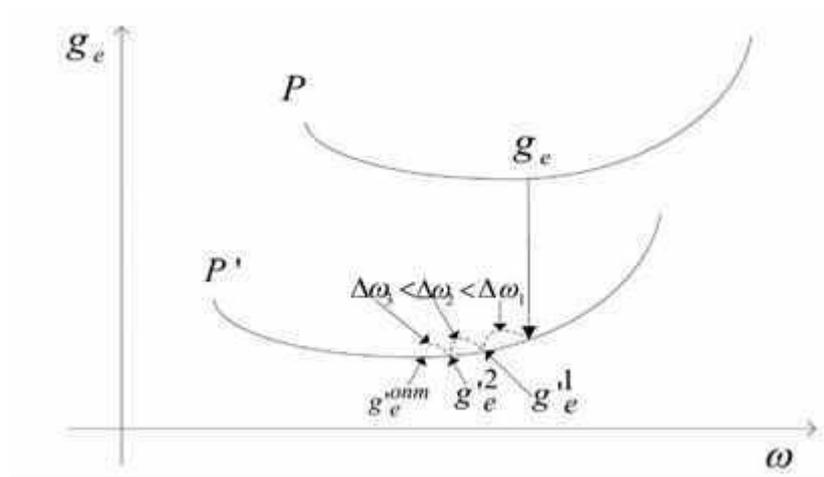


Рис. 6. Алгоритм работы ЗЭР

Процесс определения $\omega_{\text{опт}}$ заключается в определении минимума функции расхода топлива $g_e = f(\omega)$ для конкретного значения P и поясняется рис. 7.

Рис. 7. Алгоритм определения значения $\omega_{\text{опт}}$

При изменении мощности нагрузки с P на P' дизель-генератор переходит на новую кривую расхода топлива (рис. 8). Реакцией на это со стороны КО является изменение задания частоты вращения на некоторую величину $\Delta\omega_1$. При этом вычисляется производная изменения величины удельного расхода топлива. По знаку определяется, в каком направлении далее необходимо изменять частоту вращения - в сторону увеличения или в сторону уменьшения.

На следующем шаге происходит изменение на величину $\Delta\omega_2$, которая меньше на величину, пропорциональную коэффициенту K , определяющему скорость поиска минимума функции. Критерием окончания поиска $\omega_{\text{опт}}$ является уменьшение значения производной ниже допустимой ошибки ε .

Для синтеза оптимальных алгоритмов работы ЗЭР, а также изучения и оценки особенностей взаимодействия между разными автономными генерирующими установками авторами был разработан испытательный стенд, содержащий ветрогенератор, дизель-генератор и их имитаторы, выполненные на базе асинхронных двигателей, питаемых от преобразователей частоты. Такое исполнение позволяет имитировать скорость ветра, скорость вращения вала дизеля, производить наладку управляющего алгоритма в программируемом логическом контроллере и обучать ЗЭР.

Библиографический список

1. **Васенин, А.Б.** Имитационная модель автономной ветро-дизельэнергетической установки / А.Б. Васенин, А.В. Серебряков, В.Г. Титов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения): Труды МНТК. – Иваново, ИГЭУ, 2011. Т. 2.
2. **Хватов, О.С.** Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.
3. **Хватов, О.С.** Нейросетевой алгоритм системы управления топливоподачей дизель-генератора переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. Вып. 3.
4. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
5. **Круглов, В.В.** Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 221 с.
6. **Дарьенков, А.Б.** Применение принципов нейронных сетей для управления ветро-дизельной электростанцией на базе ДВС переменной скорости вращения / А.Б. Дарьенков, Д.А. Комраков, Е.Н. Соснина // Материалы XIV Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2015. С. 95.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

**A. B. Dar'enkov, D. A. Badugin, E. V. Bychkov, V. L. Mel'nikov,
V. V. Sokolov, E. O. Smirnov, D. A. Komrakov**

RESEARCH OF CONTROL SYSTEM OF FREQUENCY OF ROTATION OF THE SHAFT DIESEL GENERATOR HYBRID WIND FARM

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

The principle of regulation of frequency of rotation of the shaft of the diesel generator when the power load. The description of the neural network adjuster economic mode functional scheme and the basic principles of its work.

Key words: wind power generator, diesel generator, electric power station, neural network adjuster economic mode, artificial neural network.

УДК 621.319

А.А. Кралин, М.П. Тюриков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХСТЕРЖНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В SIMULINK

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Объект исследования: Трансформаторы преобразовательных устройств.**Цель:** Создание в программе Matlab Simulink математических моделей многообмоточных трансформаторов, служащих для исследования нестационарных режимов работы трансформаторно-тиристорных регуляторов напряжения.**Результаты:** Была создана нелинейная модель трехфазного трехстержневого многообмоточного трансформатора с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.**Область применения:** Разработанная модель трансформатора может быть использована для исследования устройств, содержащих в своем составе трехфазные многообмоточные трансформаторы со стержневой конструкцией магнитопровода с любыми схемами соединения обмоток. В том числе для трансформаторов с ТТРН, предназначенных для регулирования параметров электроэнергии. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТТРН с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках.*Ключевые слова:* трансформатор, схема, matlab, нелинейная модель, математическая модель, регулирование параметров электроэнергии

Разработка и проектирование устройств регулирования и стабилизации параметров электроэнергии, обладающих высокими технико-экономическими показателями, является одной из актуальных задач энергосбережения.

Среди обширного класса данных устройств, различающихся как по принципу регулирования параметров электроэнергии, так и по технической реализации, особое внимание уделяется регуляторам и стабилизаторам напряжения, построенным на базе полупроводниковых приборов, преимущественно тиристоров.

Создание адекватных математических моделей многообмоточных трансформаторов является неотъемлемой частью проектирования таких устройств.

Исследование режимов работы трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink.

В ходе выполнения научной работы была создана нелинейная модель трехфазного трехстержневого многообмоточного трансформатора с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.

Схема замещения (рис. 1) состоит из следующих элементов $(w_1i_1-w_xi_x)$, $(w_2i_2-w_yi_y)$, $(w_3i_3-w_zi_z)$ - намагничивающие силы обмоток на стержнях магнитопровода; $(\Phi_A-\Phi_C)$ соответственно магнитные потоки фаз; $H_{AlA} \div H_{ClC}$; $H_{ЯAlЯ} \div H_{ЯClЯ}$ - падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков, H_{0l0} - падение магнитного напряжения от потока нулевой последовательности.

В соответствии с приведенной схемой замещения уравнения магнитного состояния трехфазного многообмоточного трансформатора будут иметь следующий вид:

$$w_1i_1+w_4i_4+\dots+w_xi_x - H_{AlA} - 2H_{ЯAlЯ} - H_{0l0}=0;$$

$$w_2i_2+w_5i_5+\dots+w_yi_y - H_{BlB} - H_{0l0}=0;$$

$$w_3i_3+w_6i_6+\dots+w_zi_z - H_{ClC} - 2H_{ЯClЯ} - H_{0l0}=0.$$

Величина потока нулевой последовательности:

$$\Phi_A+\Phi_B+\Phi_C=\Phi_0.$$

Магнитные потери учитываются с помощью активных сопротивлений включенных параллельно соответствующим обмоткам.

Нелинейные свойства материала магнитопровода учитываются с помощью кусочно-линейной интерполяции заданной табличной функции основной кривой намагничивания высоколегированной холоднокатаной анизотропной стали 3413 [1].

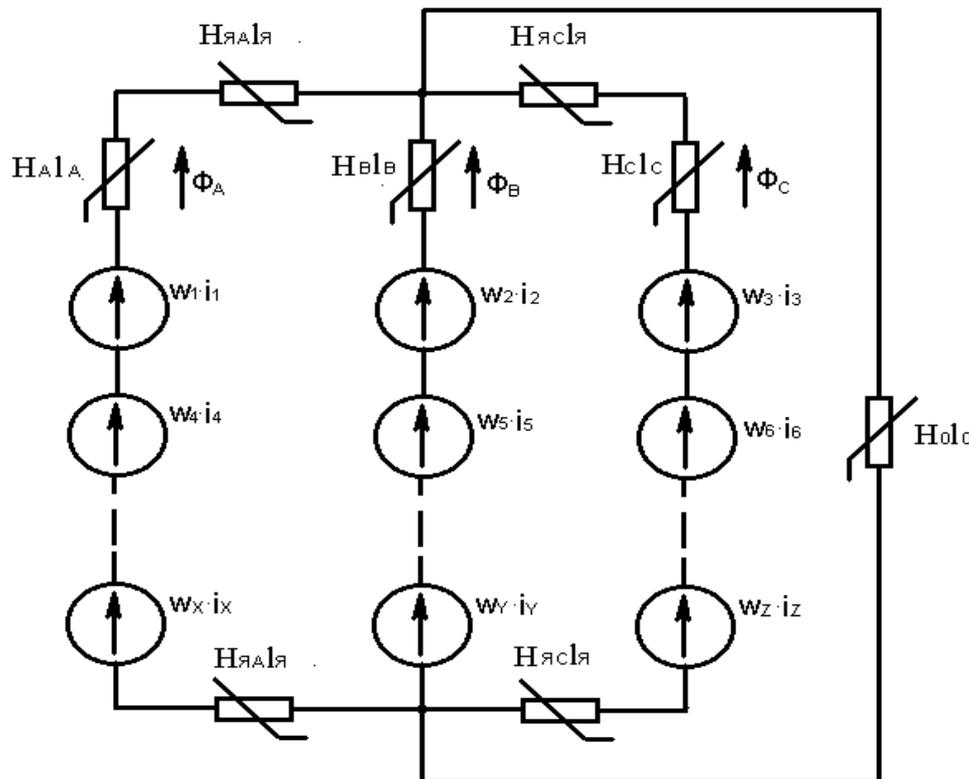


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи трехстержневого многообмоточного трансформатора с контуром замыкания потоков нулевой последовательности

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений составлена модель электрической системы (обмоток) трансформатора по следующим выражениям:

$$U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_A}{dt} + R_1 i_1;$$

$$U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + R_2 i_2;$$

$$U_Y = L_{SY.Y} \frac{di_Y}{dt} + w_Y \frac{d\Phi_Y}{dt} + R_Y i_Y,$$

где U_n - напряжение соответствующей обмотки; $L_{Sm.m}$ - собственные индуктивности рассеяния обмоток; R_n - активные сопротивления обмоток; w_n - число витков обмоток.

Полная модель многообмоточного трансформатора состоит из двух моделей, отвечающих за магнитную и электрическую схемы замещения трансформатора.

В качестве параметров модели трансформатора используются данные трансформатора ТМ 400 -10/0,4 Y/Y-0:

- потери холостого хода $P_0=950$ Вт,
- потери короткого замыкания $P_k=5500$ Вт,
- ток холостого хода $I_0=2,1\%$,
- напряжение короткого замыкания $U_K=4,5\%$.

Адекватность модели проверялась по данным опытов холостого хода и короткого за-

мыкания. В процессе моделирования установлено, что при завершении переходного процесса включения ненагруженного трансформатора мощность потерь холостого хода составляет 920 Вт (рис. 2), что меньше заявленных каталожных потерь на 3,1%. Мощность потерь короткого замыкания составляет 5500 Вт. Отличие от каталожных данных составляет 0,9%.

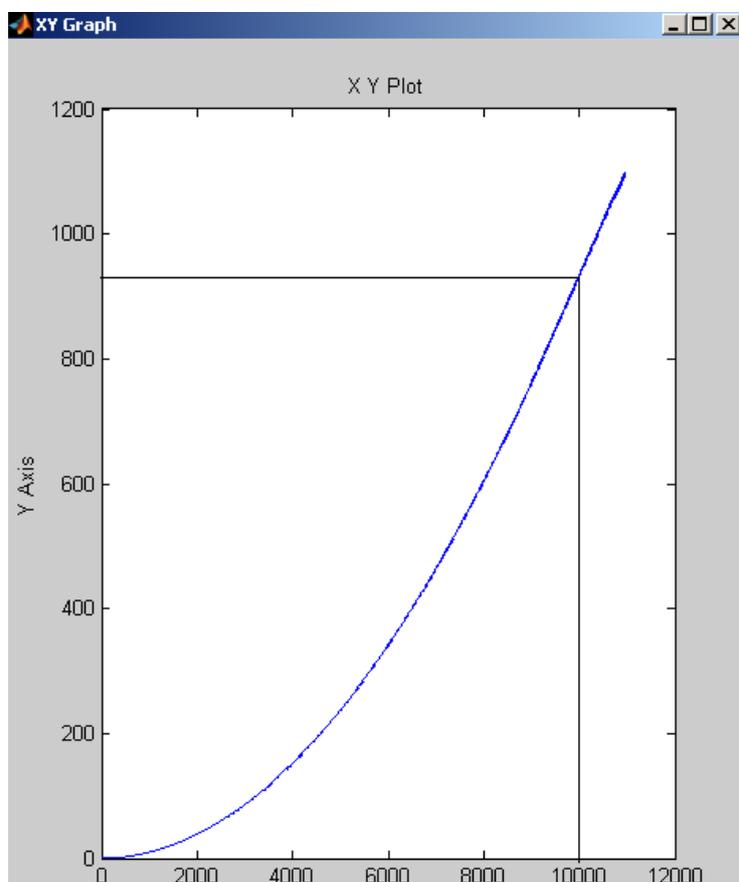


Рис. 2. Зависимость потерь холостого хода от напряжения

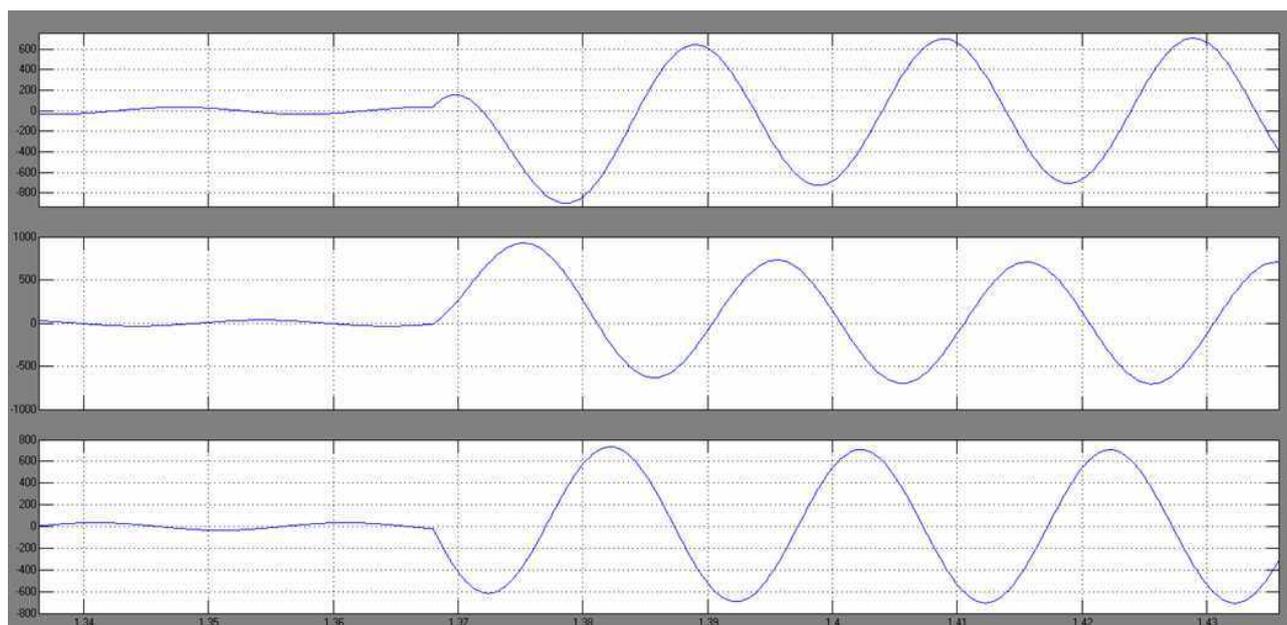


Рис. 3. Ударный ток симметричного трехфазного короткого замыкания трансформатора ТМ 400 -10/0,4 Y/Y-0

Исследование аварийных режимов работы трансформатора показывает, что при симметричном трехфазном коротком замыкании действующее значение установившегося тока короткого замыкания составляет $I_{к.у}=470\text{А}$, ударный ток короткого замыкания $i_{k\max}=880\text{ А}$ (рис. 3, 4). Принято, что мощность короткого замыкания электрической сети 10 кВ составляет $500\text{МВ}\cdot\text{А}$.

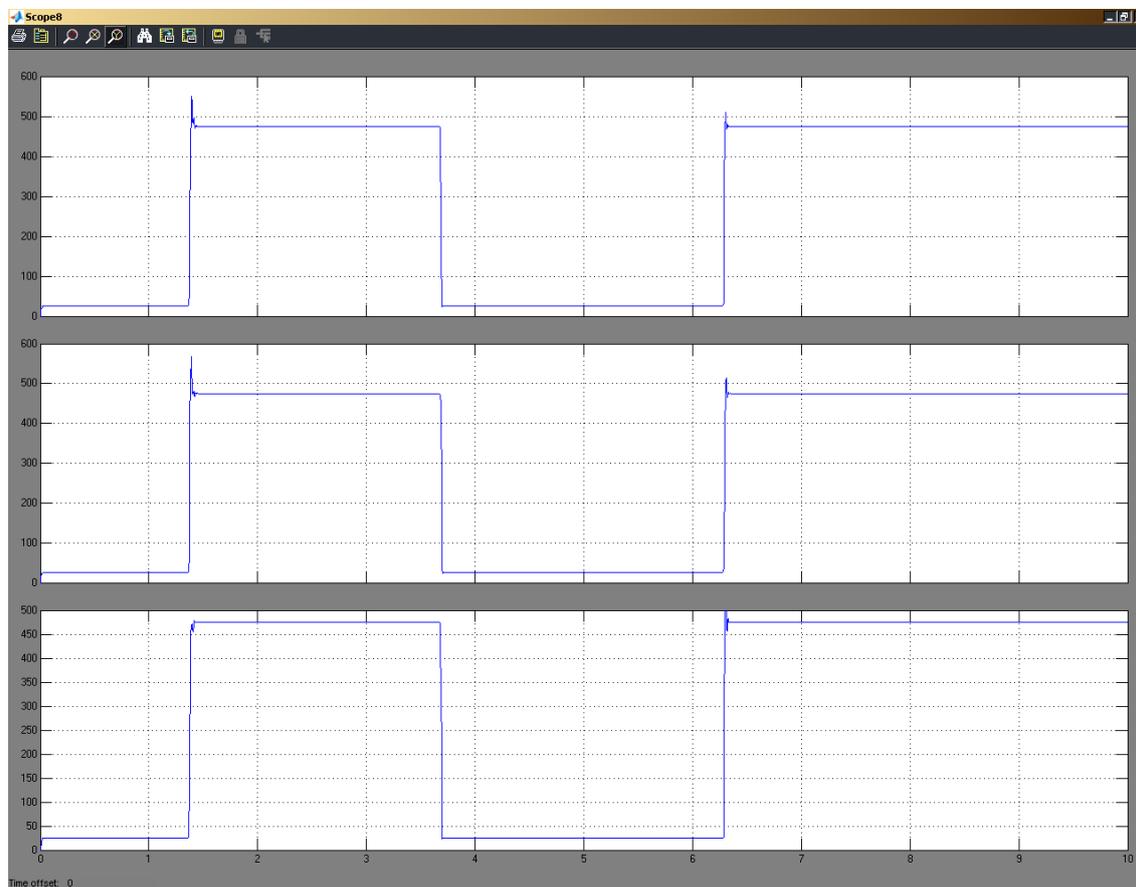


Рис. 4. Действующие значения фазных токов симметричного трехфазного КЗ

Разработанная модель трансформатора может быть использована для исследования устройств, содержащих в своем составе трехфазные многообмоточные трансформаторы со стержневой конструкцией магнитопровода с любыми схемами соединения обмоток. В том числе для трансформаторов с ТТРН, предназначенных для регулирования параметров электроэнергии. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТТРН с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках. Модель реализует следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора, что позволяет измерять основные характеристики трехфазных трансформаторов в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. В динамических режимах модель позволяет исследовать режимы внезапного короткого замыкания и подключения трансформатора к трехфазной сети.

Библиографический список

1. Алтунин, Б.Ю. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 32. С. 195–198.

2. Нелинейная модель трехфазного трехстержневого трансформатора с устройством регулирования под напряжением (РПН): Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2012613685 РФ / Алтунин Б.Ю., Кралин А. А., Севостьянов А.А.: Роспатент, Реестр программ для ЭВМ, 19 апреля 2012 г.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

A.A. Kralin, M.P. Turikov

SIMULATION OF TRANSFORMERS IN CONVERSION DEDICES

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

Subject: Transformers in conversion dedices.

Purpose: Creation of mathematical model of multiwinding transformers in Matlab Simulink, used for research on transformer-thyristor regulator of voltage (TTRV) in nonstationary mode

Results: Creation nonlinear model of three-phase three-rod multiwinding transformer with flat magnetic system in Matlab Simulink

Field of application: This model can be used to research on devices which contains three-phase multiwinding rod magnetic circuit transformer with any winding connection schemes including TTRV transformers designed to regulate parameters of the electric energy. The model allow to investigate main energy parameter of TTRV transformers with different connection schemes in dynamic and static mode under symmetric and asymmetric load

Key words: transformer, matlab, nonlinear model, mathematical model, regulation of electric energy parameters.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.13

С.А. Балан, В.А. Ульянов, В.Е. Шигин

ВИБРОИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСПЛАВЫ ЧУГУНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен метод внепечной обработки жидких чугунов, позволяющий повысить эксплуатационные свойства машиностроительных отливок. С использованием современных теоретических и экспериментальных методов изучены физико-химические процессы, протекающие при рафинировании и модифицировании расплава. Описаны режимы обработки расплавов упругими колебаниями высокой интенсивности.

Ключевые слова: кристаллизация, сплавы, вибрационное воздействие, упругие колебания, графитизация, неметаллические включения.

Известно, что кристаллическая структура сплава влияет на механические и специальные свойства литья за счёт анизотропии свойств по сечению отливок. При этом размер дендритной ячейки влияет на механические свойства литых сплавов гораздо сильнее, чем размер зерна. Увеличение скорости затвердевания почти всегда приводит к уменьшению расстояния между дендритными осями, что обычно сопровождается улучшением механических свойств. Технология получения высокопрочных высококачественных черных сплавов предусматривает как регулирование состава сплавов, наличием, в том числе, газовых и неметаллических включений, так и управление процессом затвердевания.

Таким образом, структура и свойства литых сплавов во многом определяются условиями их кристаллизации. В связи с этим большой практический интерес представляет возможность управления процессами кристаллизации сплавов и получения необходимых служебных свойств на основе сведений о влиянии различных воздействий на расплав [1, 2].

Вибрационная обработка чугуна в ковше может обеспечить широкие возможности по повышению качества отливок. Обработка жидкого чугуна в графитошамотных тиглях с частотой 30–70 Гц способствовала повышению прочности на 26 %, твердости - на 21% и увеличению плотности с 7087 до 7217 кг/м³. При определенном режиме воздействия (частота 50 Гц, амплитуда 0,14 мм, длительность обработки 120 с) включения графита принимали компактную форму.

Обобщая известные промышленные данные по использованию виброковшей для обработки чугуна, следует, тем не менее, обратить внимание на серьезные ограничения при использовании вибровоздействия для больших масс металла из-за больших динамических нагрузок на оборудование, возникающих в ходе обработки, и низкой интенсивности перемешивания жидкой ванны [3].

Известен способ обработки сплавов низкочастотными упругими колебаниями, при котором сплав с помощью волновода обрабатывается упругими колебаниями с частотой 38–100 Гц и амплитудой 0,5–1,5 мм.

Недостатками данного способа являются:

- невозможность использования массы расплава как фактора обработки;
- слабая дегазация расплава;

- неустойчивое явление кавитации;
- слабое бародинамическое воздействие [2].

Имеются исследования по применению воздействия на жидкие металлы в ковшах подобным способом, но с источником высокой интенсивности на основе электрогидроимпульсного эффекта [4, 5].

Суть метода заключается в следующем: выпущенный из печи жидкий чугун в ковше после замера температуры, удаления печного шлака и наведения новой шлакообразующей смеси доставляется на стенд обработки упругими колебаниями.

Установка для электрогидроимпульсной обработки расплава состоит из генератора импульсов тока (ГИТ) 1, механизма перемещения рычага 2, рычага 3 с закреплённым на его свободном конце электроразрядным генератором упругих колебаний (ЭРГУК) 5.

При высоковольтном пробое между положительным электродом 6 и верхней частью излучателя-волновода 7, введенного в разрядную камеру 5, часть энергии возникшего при этом гидротока попадает на мембрану с волноводом 7, вызывая ее колебания. Эти колебания передается излучателем-волноводом в расплав 9 в ковше 8.

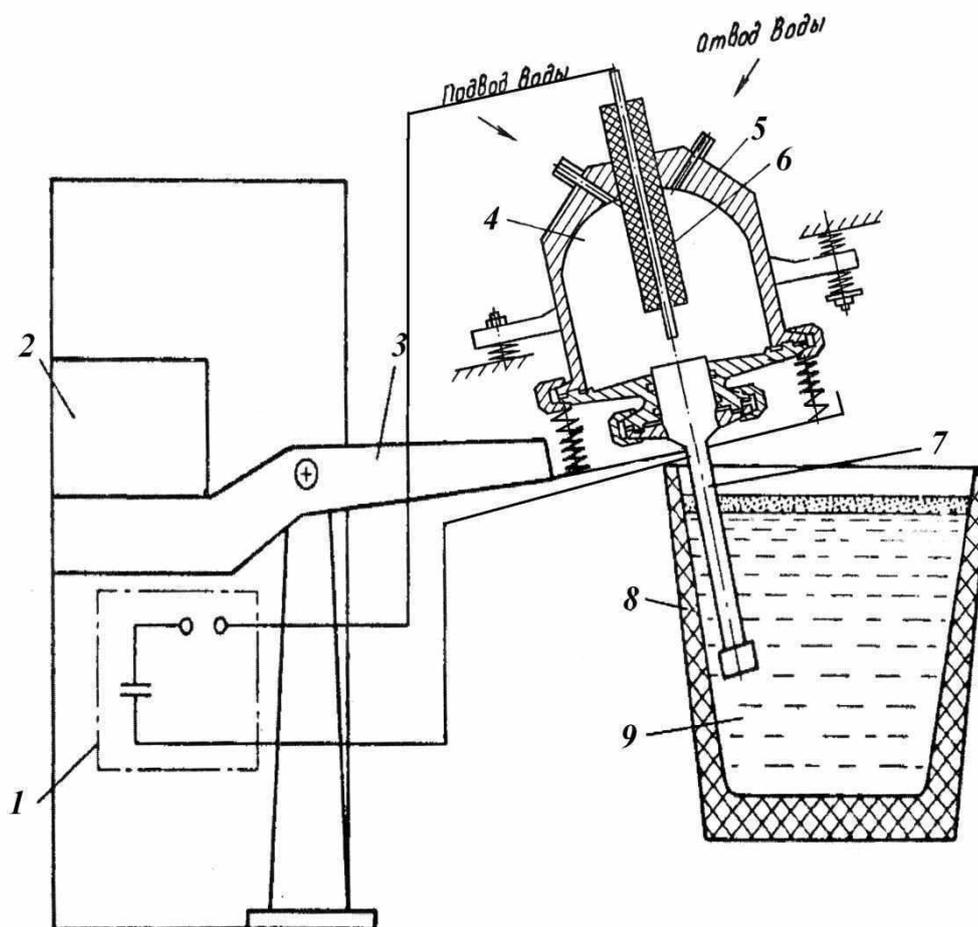


Рис. 1. Установка виброимпульсной обработки расплава:

1 – генератор импульсов тока (ГИТ); 2 – механизм перемещения рычага; 3 – рычаг;
4 – полость заполненная прокачиваемой водой; 5 – электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК); 6 – электрод; 7 – волновод; 8 – ковш; 9 – расплав

После заполнения разрядной камеры 5 водой 4 подают от генератора импульсных токов 1 на положительный электрод 6 импульсы тока высокого напряжения (20-50 кВ) с заданной частотой следования (1-5 имп/с). При высоковольтном пробое водного промежутка между оконечностью положительного электрода 6 и верхней частью излучателя-волновода 7 (являющегося отрицательным электродом) возникают явления, характеризующие электро-

гидравлический эффект в ограниченном объеме. Ударные волны и мощные гидротоки взаимодействуют с мембраной и верхним торцом волновода-излучателя 4 и через последний передаются в расплавленный металл. Акустическое поле в расплаве приводит к возникновению локальных акустических давлений за счет распространения импульса сжатия. Взаимодействие фронта ударной волны с различными неоднородностями расплава приводит к возникновению локальных разрывов сплошности, возникновению кавитационных полостей, способствующих дегазации расплава. Интенсификации дегазации и усиление гидротоков направленных к мениску способствует созданию более благоприятных условий для всплывания и ассимиляции шлаковым покровом неметаллических включений [6].

С помощью пьезоаксельрометров типа ИС-313 определены графики перемещения активных участков мембраны. Так, при амплитуде перемещения 2 мм в течение 1 мс скорость перемещения мембраны изменяются до 6 м/с при ускорениях до 1000 g при разряде в 2-3 кДж. При этом давление в жидкости у волновода достигает 200 МПа. Помимо регистрации на осциллографе С8-2, сигналы от аксельрометров были обработаны на аппаратуре "Брюль и Кьер", что позволило определить, частотный спектр. Основные гармоники для указанных выше энергетических и конструктивных параметров изменялись в пределах 0,8-3,4 кГц. Максимальные частоты достигают 9,5 кГц.

Применение различных систем пружинных подвесок разрядной камеры позволяет увеличить эффективность воздействия без дополнительных энергетических затрат.

Предположительно, что под влиянием упругих колебаний, создаваемых ЭГ - эффектом в расплаве, возникают кавитационные явления. В образующиеся кавитационные пустоты проникает растворенный водород. При замыкании кавитационных пузырьков водород не успевает раствориться в жидком металле и образует газовые пузырьки. В результате зародыши молекулярного водорода соединяются в комплексы с оксидными включениями и по мере роста газовых пузырьков адсорбируются на их поверхности и всплывают вместе. Таким образом, процесс дегазации и очистки металла идет одновременно.

Структура и свойства серого чугуна определяются процессом графитизации, от которого зависят не только количество и характер графитовых включений, но в значительной степени и структура матрицы.

Макроструктурные исследования проводились на круглых литых образцах диаметром 80 мм.

Эксперименты над расплавом СЧ 21-40 в 3 т ковше позволили снизить наличие газов в литом металле на 61% при трехминутной обработке упругими колебаниями. Кроме того, отмечалось 13-15% измельчение литого зерна в литом металле. При шестиминутном воздействии измельчение литого зерна достигало 27% при появлении в матрице наряду с пластинчатым графитом хлопьевидного. Размер дендритной ячейки уменьшался с 42, 4 до 15, 4 мкм. Жидкотекучесть же расплава возрастает на 6-8%.

При применении карбида кальция в процессе вибрационного перемешивания уже за три минуты содержание серы снизилось с 0,15% на порядок. Без карбида кальция почти в два раза.

В табл. 1 приведены механические свойства сплавов СЧ 21-40 отлитых по обычно технологии и с электрогидроимпульсной обработкой расплава в 3 ковше.

Таблица 1

Механические свойства отливок серого чугуна без и с электрогидравлической обработкой расплава с частотой 3 имп/с и энергии в импульсе 2 кДж

Время обработки, мин	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Твердость по Бринеллю, НВ
Без воздействия	208 - 218	375 - 415	170 - 240
3	228 - 237	436 - 441	195 - 256
6	241 - 255	440 - 453	222 - 260

Таким образом, электрогидроимпульсная обработка расплава серого чугуна позволяет провести дегазацию расплава при макроструктурных изменениях повысить механические свойства литья.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 782 с.
2. **Ефимов, В.А.** Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
3. **Попова, Э.А.** Особенности кавитационных процессов при воздействии на жидкие среды упругих колебаний низких частот / Э.А. Попова [и др.] // Расплавы, 1998. №3. С. 7–13.
4. **Скворцов, А.А.** Влияние внешних воздействий на процессы формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
5. **Гущин, В.Н.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов; НГТУ. – Нижний Новгород, 2006. – 141 с.
6. Пат. SU 1580671 B22D27/00. Обработка металла (расплава) в жидком или вязком состоянии в литейных формах / В.М. Грабовый, К.П. Фоменко, В.А. Ульянов. 10.12.1996. Источник доступа <http://www.findpatent.ru/patent/158/1580671.html>

*Дата поступления
в редакцию 04.06.2015*

S.A. Balan, V.A. Ulyanov, V.E. Shigin

VIBROIMPULSIVE AFFECTING FUSIONS OF CAST-IRONS

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

The method of out-of-furnace treatment of liquid cast-irons is considered, allowing to promote operating properties of the machine-building founding. With the use of modern theoretical and experimental methods physical and chemical processes aleak at an affinage and retrofitting of fusion are studied. The modes of treatment of fusions are described by resilient vibrations of high intensity.

Key words: crystallization, alloys, oscillation influence, resilient vibrations, graphitization, nonmetallics.

УДК.669.017:621.78

С. Н. Жеребцов¹, Е. В. Лобов², Е. А. Чернышов³**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДИФИКАТОРОВ
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО
КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ**

ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет», г. Омск,¹
ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» г. Омск,²
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Представлены многолетние результаты практических исследований, подтверждающие положительное влияние разрабатываемой технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) с совместным использованием процесса модифицирования никелевых сплавов при электрошлаковом кокильном литье. Впервые на практике показаны реальные параметры прямых замеров температуры жидкого металла и шлака при переплаве ряда жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6-У, ЖС3-ДК, и т.д., в автогарнисажной плавильной ёмкости, на протяжении всего технологического процесса электрошлакового литья изделий. Приведены сравнительные характеристики, и результаты испытаний физико-механических свойств и служебных характеристик изделий, полученных вакуумно-индукционным переплавом и электрошлаковым переплавом с применением комбинированной технологии модифицирования и высокотемпературной обработки расплава.

Ключевые слова: электрошлаковое кокильное литьё, модифицирование, температура, жидкий металл, шлак, технологические параметры, физико-механические свойства, никелевый сплав.

На сегодняшний день существует проблема получения качественных отливок из сложнелегированных сталей и сплавов, выпускаемых в печах электродугового переплава (ЭДП), вакуумно-индукционного переплава (ВИП), электронно-лучевого переплава (ЭЛП), которые на протяжении всего процесса расплавления металла, накопления в плавильной ёмкости и последующей заливкой в кокиль обеспечили бы весь комплекс технологических средств воздействия на жидкий металл, и кристаллизующую отливку в литейной форме.

В области металлургии и литейном производстве разработаны технологические приёмы, позволяющие обеспечивать необходимые требования, предъявляемые по химическому составу, механическим, физическим свойствам, служебным и технологическим характеристикам отливаемых изделий, это технологии: модифицирования металла, высокотемпературной обработки расплавов (ВТОР) в плавильной ёмкости, подстуживание металла в плавильной ёмкости и литейной форме.

В силу своих технических особенностей традиционные способы переплава ВИП, ЭДП, ЭЛП не всегда позволяют использовать в полном объёме технологии модифицирования и ВТОР. Для получения качественных отливок в области специальной электрометаллургии разработана технология электрошлакового переплава (ЭШП), которая позволяет объединить в одном плавильном агрегате все достоинства метода модифицирования и технологии ВТОР.

Электрошлаковому переплаву (ЭШП) подвергали никелевые жаропрочные сплавы типа: ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК, во время переплава вводили модификаторы различного химического состава-(TiCN-Ti-Cr, TiCN-Ti-Ni, TiCN-Ti-Y, TiCN-Ti-Mo, TiCN-Ti-Va, а также РЗМ.....), в статье представлены результаты исследования с модификатором Ti(C_x N_y)-Ti. В процессе ЭШКЛ (электрошлаковое кокильное литьё) производили технологический перегрев расплавленного металла в плавильной емкости – для проверки предположения о поло-

жительном влиянии технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР), совмещённой с процессом модифицирования жидкого металла на структуру и физико-механические свойства отливаемого изделия [1, 3, 4].

Металл плавил и разливали в установке электрошлакового литья А550-У, УШ-148, варьируя температуру введения добавки, состав модификатора, время выдержки, температуру жидкого металла и шлака силу тока, напряжение в процессе переплава, температуру охлаждающей жидкости и т.д.

Контроль и запись токовых режимов электрошлакового переплава расходуемого электрода в плавильной ёмкости производились с помощью электронного потенциометра КСП-4, контроль скорости плавления электрода осуществлялась с помощью датчика веса в комплекте с самописцем ПСР-1. Температура охлаждающей жидкости (вода) на входе и выходе из поддона плавильной ёмкости контролировалась электронным автоматическим многоточечным потенциометром ЭПР-09РМЗ. Для прямого замера температуры жидкого металла и шлака в плавильной ёмкости на протяжении всего процесса переплава расходуемого электрода применялась вольфрам-ренийная термопара типа ВР5(20)5 в защитном корпусе из тугоплавкого металла.

Модифицирование после ВТОР с введением УДПК (ультрадисперсного порошкового комплекса), разработанного на базе $TiCN-Ti$ [1,4] в диапазоне температур при 1450-1470°C, 1580-1600°C, 1720-1740°C, потребовало применения технологии подстуживания жидкого металла, для повышения эффекта модифицирования за счет снижения продолжительности времени выдержки от момента введения УДПК в жидкий металл, с последующей заливкой в кокиль и до начала процесса кристаллизации сплава в литейной форме.[4]

На (рис. 1) приведена реальная схема процесса переплава расходуемого электрода из сплава ЖС6-У под слоем защитного синтетического флюса марки $CaF_2-Al_2O_3$ в охлаждаемой автогарнисажной плавильной ёмкости [1, 4]. Температура нагрева жидкого металла достигала от 1900 до 2040°C, а жидкого флюса соответственно от 2150 до 2320°C.

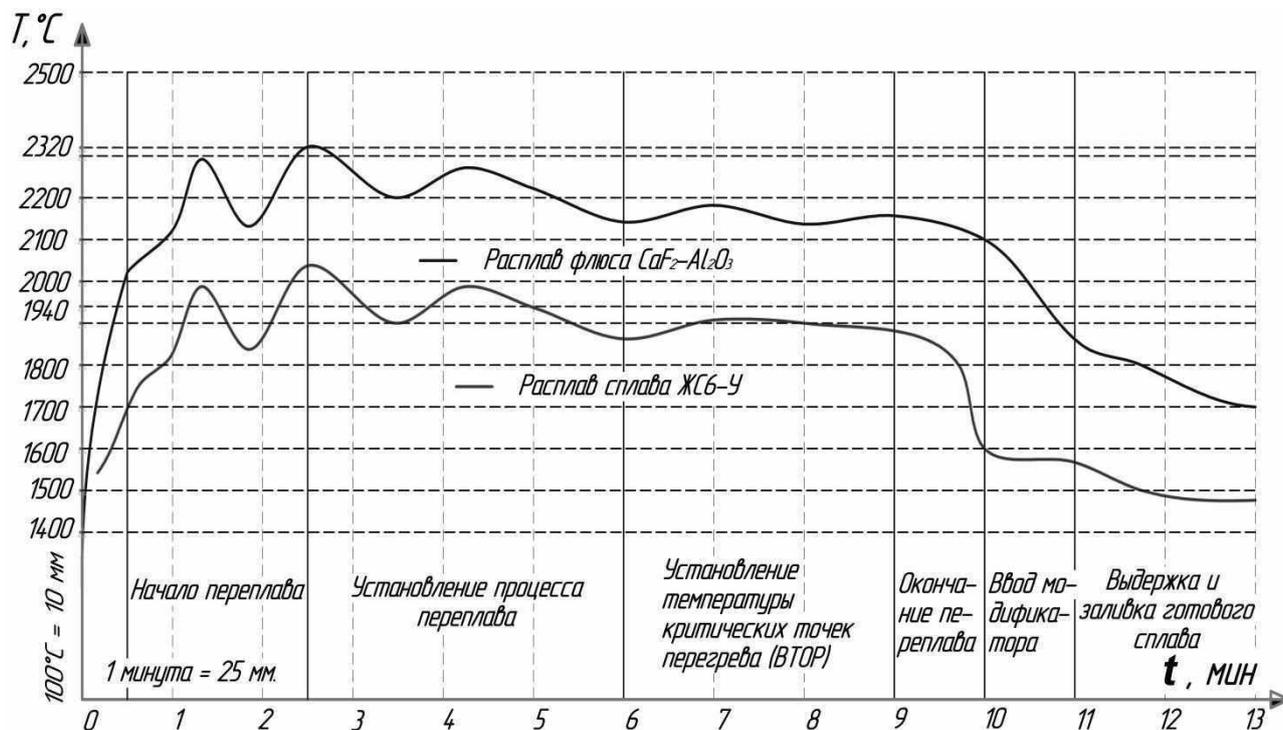


Рис. 1. Температурно-временная зависимость процесса ЭШКЛ+ВТОР расходуемого электрода из сплава ЖС6-У в плавильной ёмкости

Перевод расплава никелевых сплавов в равновесное состояние при воздействии высокотемпературной обработки расплава осуществляют перегревом выше второй критической температуры $t_{кр2}$ 1830°C (для ЖСЗ-ДК и ЖС6-У), и 1800°C для ЖС6-К [1, 4]. Необходимую температуру перегрева расплава ЖСЗ-ДК, ЖС6-К, ЖС6-У для перевода его в равновесное состояние определили по изменению кинематической вязкости и удельного сопротивления в жидком состоянии (рис. 2, а, б), по методикам рассмотренных в исследовательских и научных работах учёных [7, 8].

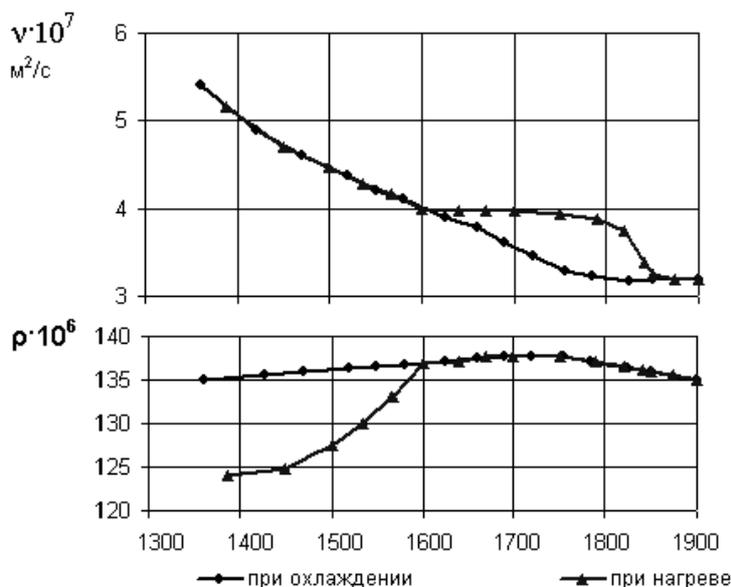


Рис. 2. Полимеры кинематической вязкости (ν) сплава ЖСЗ-ДК и полимеры удельного электросопротивления (ρ) сплава ЖСЗ-ДК

На политермах структурно-чувствительных свойств никелевого сплава ЖСЗ-ДК можно выделить два температурных интервала, в которых, по-видимому, происходят интенсивные изменения структуры расплава. В низкотемпературной области 1550-1650°C аномальный характер изменения свойств связан с разрушением неравновесных группировок атомов, соответствующих по составу и строению интерметаллидной γ' - фазе, а в интервале температур 1780-1830°C осуществляются полная диссоциация и растворение тугоплавких соединений, находящихся в расплаве.

Таблица 1

Влияние температуры введения модификатора после ВТОР при ЭШП (1830°C) на механические свойства сплава ЖСЗ-ДК

Температура введения, T_1 °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1570	1086/1074/1071	793/820/791	18,9/14,0/18,8	21,2/20,0/22,4
Среднее	1077	801	17,2	21,2
1610	1056/1075/1036	802/804/794	18,8/18,0/14,8	20,8/20,1/20,5
Среднее	1055	800	17,2	20,4
1650	1162/1162/1152	843/843/839	16,0/16,8/16,0	19,7/20,4/18,1
Среднее	1158	841	16,3	19,4
Паспорт	900	760	14,0	16,0

С учетом результатов опытов был выбран следующий температурный режим плавки и модифицирования: перегрев до 1840 - 1850°C, выдержка 5 - 10 мин; температура введения

УДПК не должна превышать 1700°C. Оптимальную температуру введения модификатора установили по изменению механических свойств образцов из сплава ЖСЗ-ДК, полученных с использованием технологии электрошлакового кокильного литья (табл. 1).

В качестве оптимизируемых технологических параметров ЭШКЛ были взяты: температура перегрева расплава (ВТОР), температура ввода УДПК в расплав, температура заливки, время выдержки от момента ввода модификатора до заливки и количество вводимых УДПК. В качестве функций сравнения использовали относительное удлинение, предел прочности, ударную вязкость и длительную жаропрочность исследуемых сплавов ЖС6-У, ЖСЗ-ДК, ЖС6-К, согласно ОСТ1 90126-85.

Была отлита большая партия образцов с добавкой модификаторов, приготовленных при различных режимах ТФА (температурная фазовая активация) и вводимых в расплав при различных температурах жидкого металла, а также последующей временной выдержки и заданной температурой заливки жидкого металла, в литейную форму и последующим определением качества отливки (табл.2). Для повышения эффективности модифицирования применяли принудительное охлаждение модифицированного расплава ЖСЗ-ДК, ЖС6-У, к двухкамерному поддону плавильной ёмкости под давлением подводили охладитель, с помощью которого задавали требуемые параметры температуры нагрева и охлаждения жидкого металла [2, 3].

Таблица 2

Влияние режимов ТФА модификатора и температуры введения и разлики сплава ЖС6-У на качество отливок

Номер плавки		Режимы ТФА, T, °C/мин	Температура введения T, °C	Температура заливки T, °C	Качество отливок
1	ЭШП	1000/60	1650	1570	Чистая
2	ЭШП	1000/60	1650	1575	Засоры
3	ВИП	1000/60	1670	1650	Чистая
4	ВИП	1000/60	1650	1620	Чистая
5	ВИП	1000/60	1570	1550	Засоры
6	ЭШП	1000/60	1670	1600	Чистая
7	ЭШП	950/30	1670	1570	Отливки качественные
8	ВИП	950/30	1680	1550	

Необходимость этой операции возникла в результате продолжительного времени «выстаивания» и выдержки перегретого модифицированного расплава в литейной форме до начала прохождения процесса кристаллизации отливки, из-за этого значительно снижается эффект модифицирования. Результаты испытания образцов, вырезанных из отливок «Сердечник рогообразный», показали, что предел прочности металла увеличился на 140-210 МПа при возрастании пластичности материала (табл. 3).

Таблица 3

Механические свойства образцов из модифицированного сплава ЖС6-У с принудительным охлаждением затравочного узла

Вид отливки	Наличие охладителя	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
1	2	3	4	5
Сердечник ВИП	(+)	909	10,0	18,1
	(-)	885	16,4	16,8
	(+)	934	10,8	19,7
Сердечник ЭШП мод.	(+)	1186	16,0	15,7
	(+)	1240	16,8	18,7
	(+)	1190	16,0	17,0

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
Образцы ЭШП без мод.	(-)	1045	12,8	15,0
	(+)	1070	13,6	13,0
	(-)	1065	8,8	14,9
Образцы ЭШП мод.	(+)	1260	20,0	20,1
	(-)	1120	16,0	17,3
	(+)	1150	16,8	18,9
	(+)	1196	20,0	20,1

Механические свойства испытанных образцов, вырезанных из отливок, свидетельствуют о том, что совмещение ВТОР с модифицированием и принудительным охлаждением расплава позволяет увеличить прочность изделия на 220-250 МПа, при росте пластичности примерно в два раза. Исследование длительной прочности на образцах, вырезанных из отливок не модифицированного и модифицированного сплава ЖС6-У, указывает, что показатель длительной прочности у модифицированного сплава выше на 80÷140 МПа, чем не модифицированного.

Следует отметить, что при последовательном увеличении нагрузки на испытываемый образец сопротивление разрушению модифицированного сплава повышается. Это может быть связано с диссипацией энергии на блоках структуры, окружающей модифицированные карбиды, а также меньшим углом «раз ориентировки» самих зерен модифицированного сплава [4].

Образцы из модифицированного сплава ЖС3-ДК после ЭШКЛ по сравнению с отлитыми в печах вакуумно - индукционного переплава (ВИП) выдерживают нагрузку 700-920 МПа при 700°C, при длительности испытания более 150-265 ч (табл. 4). Выполненные исследования наглядно показывают, что ЭШП по сравнению с ВИП более прогрессивная технология переплава высоколегированных никелевых сплавов.

Таблица 4

**Длительная прочность образцов модифицированного сплава ЖС-ЗДК,
вырезанных отливок ($t_{исп}$ -700°C)**

№ п/п	Нагрузка σ , МПа	Время до разрушения, ч	δ , %	ψ , %
ВИП	680/720/740	100/106/97	4,7	5,6
ВИП	688/720/740/760/780	100/100/100/100/168	3,1	3,7
ВИП	680/740	100/93	4,3	6,8
ЭШП	870/920	265/155	6,8	7,5
ЭШП	880/910	240/180	5,4	6,3
ЭШП	680/700	150/130	3,4	5,1
ВИП	820/800	130/145	5,2	4,0

Таблица 5

**Механические свойства образцов из сплава ЖС6-У после ВТОР и модифицирования,
испытанные при температуре 20°C**

Вид обработки	Механические свойства			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
ВТОР (ЭШЛ)	1100/1045/1120	970/920/990	5,2/4,7/4,9	8,3/6,3/7,2
ВТОР+(TiCN-Ti)	1210/1160/1180	1060/980/1005	8,3/6,7/7,1	12,7/10,0/11,3

Свойства модифицированного сплава ЖС6-У, подвергнутого ВТОР при ЭШП, верхняя критическая точка для сплава ЖС6-У составляет 1830°C, а нижняя 1650°C. Продолжительность выдержки расплава при 1830°C принимали равной 10 мин. Модификаторы вводили при 1650°C. Исследование механических свойств образцов показало (табл. 5), что свойства модифицированного сплава по сравнению со сплавом после ВТОР без модифицирования - улучшились: σ_B увеличился на 10÷15%, δ - на 35- 47%, ψ на 45-58%.

Размер макрозерна в отливках из модифицированного сплава при ЭШКЛ + ВТОР составил в среднем 0,7-1,2 мм, карбиды приобрели компактную форму, их средний размер составил 3-5 мкм. Наилучшие сочетания структуры и свойств из сплавов ЖС6-К, ЖС6-У получены при введении УДП комплекса при 1580°C и выдержке 5 мин с последующей разливкой изделий в литейные формы при 1490-1510°C.

Циклическая устойчивость образцов из модифицированного сплава ЖС6-У при 20°C увеличивается от 166 до 200 МПа при испытании на резонансной частоте и базе $2 \cdot 10^7$ циклов, полученных различными способами производства ВИП и ЭШКЛ.

Исследование длительной прочности образцов модифицированного сплава ЖС6-У при различных температурах и нагрузках показало, что при 100-часовой нагрузке на образец она может быть увеличена до 30 МПа (табл. 6). По сертификату завода изготовителя $\sigma_B=1000-1050$ МПа; $\delta=3-5\%$; $\psi=4-8\%$; $\sigma_{1000}^{1000} = 170$ МПа. Это связано с тем, что детали машин (энергетические установки, лопатки, ротора газотурбинных двигателей, изделия «Сердечник рогообразный» и др.), работающих в условиях высоких температур и агрессивных газовых средах, воспринимают большие знакопеременные механические нагрузки.

Таким образом, применение ВТОР совместно с модифицированием позволяют получать стабильные служебные свойства отливок, превышающие верхний уровень механических свойств серийных сплавов, указанных в сертификатах на металл поставляемые заводами изготовителями.

Таблица 6

Длительная прочность образцов из сплава ЖС6-У, после ВТОР и модифицирования

Плавка	Режим испытаний	Физико-механические свойства		
		τ , ч	δ , %	ψ , %
ВИП	σ_{250}^{975}	12,0	4,2	5,3
ЭШП		25,0	3,9	4,6
ВИП	σ_{200}^{1000}	32,0	6,2	2,8
ЭШП		69,8	5,3	1,5
ВИП	σ_{160}^{1100}	21,6	4,3	1,9
ЭШП		37	5,0	1,6
ВИП	σ_{120}^{1150}	12,0	3,2	4,1
ЭШП		28	4,0	5,4

Необходимо отметить, что особенности структуры жаропрочных никелевых сплавов, отлитых с применением ВТОР, требуют изменения режимов термической обработки изделий для получения максимальной жаропрочности: нагрев до температуры растворения 10% γ' -фазы с охлаждением на воздухе и старения при температуре начала растворения γ' -фазы. Но значительного изменения строения карбидной фазы при этом может не происходить. Отмечено, что повышение скорости охлаждения металла отливки способствует измельчению карбидов MeC при кристаллизации и γ' -фазы при распаде γ -фазы в интервале

температур 1400-1500°C, но четкой (прямой) функциональной зависимости между допустимым пределом повышения скорости охлаждения и наилучшими показателями по физико-механическим свойствам сплавов не установлено, в этом направлении ведутся дальнейшие исследования.

Для исследования возможности улучшения строения карбидной и γ' -фазы, за счёт повышения скорости процесса направленной кристаллизации, для увеличения физико-механических свойств металла отливок провели цикл опытных плавов сплавов ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК и т.д., с применением комбинированной технологии ВТОР и модифицирования, на базе производственных мощностей ЗАО «Омский завод специальных изделий», ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Омск.

Используя опыт НПО "Сатурн" и рекомендации ВИАМ, был принят следующий режим плавки и разливки сплава ЖС6-У в изделие «Сердечник рогообразный»: ВТОР - 1740°C, выдержка 10-20 мин, введение модификатора при 1670°C, температура заливки 1530°C. Для подбора составов модифицирующих комплексов проведен ряд экспериментальных плавов с заливкой образцов, испытания которых показали, что применение новых модификаторов практически оказало положительное влияние на физико-механические свойства изучаемых сплавов [3, 4].

Варьирование параметров процесса разливки позволило оценить влияние температуры введения модификатора, его состава на механические свойства сплава. Наиболее высокие и стабильные свойства получены при модифицировании 0,025% TiCN-Ti от массы заливаемого металла, при температуре введения добавки 1650–1670°C.

Следует отметить, что общий уровень механических свойств всех образцов из сплавов ЖС6-У после ВТОР и модифицирования выше по сравнению с сертификатом ОСТ1 90126-85: σ_b -на 140-320 МПа, $\delta\%$ -в 2-4 раза, причем он достигнут без образования посторонних кристаллов, образующихся при охлаждении.

В процессе выполнения работы был широко опробован технологический процесс /объемного модифицирования сплавов ЖС6-У, ВЖЛ12-У, ЖС3-ДК, позволивший увеличивать их пластичность в 1,5-2 раза и поднять предел циклической выносливости на 25-40 % [1, 4, 6].

Применение новой технологии модифицирования и совмещением с ВТОР при получении качественных заготовок, за счёт изменения микроструктуры и повышения химической однородности отливки, позволило улучшить качество литья, помимо ЭШКЛ, так и традиционными технологиями ВИП, ВДП, исключить сосредоточенную пористость, уменьшить размер зерна, значительно повысить прочностные показатели, пластичность, жаропрочность и служебные характеристики изделий.

Библиографический список

1. **Жеребцов, С.Н.** Применение метода высокотемпературной обработки жаропрочного сплава при литье изделия "Сердечник рогообразный" // Литейщик России. 2005. №7. С. 37–39.
2. **Жеребцов, С.Н.** Применение технологии электрошлакового переплава для производства изделия из хромоникелевых сплавов // Технология машиностроения. 2006. №5. С 12–14.
3. **Жеребцов, С.Н.** Исследование зависимости физико-механических свойств сплава ЖС6-У от технологических параметров литья // Литейщик России. 2005. №11. С. 35–36.
4. **Жеребцов, С.Н.** Применение наноматериалов и высокотемпературной обработки никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье: дисс. ... канд. техн. наук / Жеребцов С.Н. – Новокузнецк, 2006. – 213 с.
5. **Ларинов, В.Н.** Применение высокотемпературной обработки расплава при монокристалльном литье лопаток турбин на установке УВНК–8П / В.Н. Ларинов [и др.] // Авиационная промышленность. Приложение. 1989. № 2. С. 30–34.
6. **Еремин, Е.Н.** Повышение качества литого металла при электрошлаковом переплаве

- жаропрочных никелевых сплавов/ Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов, В.Г. Радченко // Известия Вузов. Черная металлургия. 2003. №8. С. 15–18.
7. **Колотухин, Э.В.** Совершенствование технологии выплавки и повышение качества жаропрочных сплавов на основе исследования их удельного электросопротивления: дисс. канд. техн. наук / Колотухин Э.В. – Свердловск, 1990. – 150 с.
 8. **Барышев, Е.Е.** Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии. УрО РАН / Е.Е. Барышев, А.Г.Тягунов, Н.Н. Степанова.– Екатеринбург, 2010. – 198 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.06.2015*

S.N. Zherebtsov¹, E. V. Lobov², E.A. Chernyshov³

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE IMPACT MODIFIER, THROUGH
THE USE OF TECHNOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE TREATMENT
OF THE MELT IN THE PROCESS OF ELECTROSLAG CHILL CASTING**

Omsk state pedagogical university¹,
Omsk research Institute of engineering technology²,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev³

Presented the results of many years of research supporting the positive impact of high-technology developed by melt processing (second) with the joint use of the process of modifying nickel alloys at electroslag diecasting. For the first time in practice shows the real parameters of direct measurements of the temperature of the molten metal and slag remelting of a number of heat-resistant nickel alloys such ZHS6-U, ZHS3-DC, etc., avtogarnisazhnoy smelting capacity, throughout the process of electroslag casting products. The comparative characteristics and test results of physical and mechanical properties and service characteristics of products obtained by vacuum induction remelting and electroslag remelting using a modification of the combined technology and high-melt processing.

Key words: electroslag chill casting, modification, temperature, liquid metal, slag, process parameters, physical and mechanical properties, nickel alloy.

УДК 669.021:621.762

И. М. Мальцев

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПОРОШКОВОГО ЭЛЕКТРОПРОКАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет и метод: Рассмотрены свойства порошковых лент из порошков разных классов, полученных электропрокаткой с воздействием тока высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² на очаг формования.

Цель работы: Целью настоящего исследования является изучение свойств порошкового электропроката двух классов: порошковой системы Fe-Cr-Ni и композиций с порошками наполнителями – графитом, нитрида бора и стекла.

Результаты и области применения: Применение электропрокатки порошковых металлических и композиционных материалов создает более совершенные межчастичные контакты, чем при формовании прокаткой без электрического тока. Электромагнитное поле, электрический ток при электропрокатке ленточных порошковых материалов повышают временное сопротивление при растяжении (в 2 – 10 раз), твердость и снижают удельное электрическое сопротивление порошковых лент (в десятки раз) в сравнении с методами холодной прокатки.

Выводы: Повышение свойств порошковых прокатанных лент зависит от химического состава материала, его электрофизических свойств.

Ключевые слова: порошковые ленты, ток высокой плотности.

Введение

Методом прокатки и последующего спекания получают материалы разного химического состава и назначения. Прокаткой получают конструкционные, высокопористые листовые материалы, уплотнительные, сварочные, электротехнические и резистивные материалы. Выпуск этих материалов осуществляется в цехе пористого проката Выксунского металлургического завода [1]. При прокатке используют порошки чистых металлов, сплавов, механические смеси порошков и разнообразные наполнители, к которым относят порошки графита, нитрида бора, стекла и др. Основными трудностями формования прокаткой порошка являются: низкая формуемость неметаллических частиц, вырождение процесса прокатки из-за высокой текучести порошков, неравномерность плотности проката по ширине полосы. Эти проблемы решены в способе прокатки, где на очаг формования накладывается электромагнитное поле и между вальками через порошок пропускается ток высокой плотности, обеспечивающий микросварку порошковых частиц, электропластический и пинч – эффекты. [2-5]. При электропрокатке используются порошки и композиции, которые формуют методом холодного формования прокаткой.

Целью настоящего исследования является изучение свойств порошкового электропроката двух классов: порошковой системы Fe-Cr-Ni и композиций с порошками наполнителями – графитом, нитрида бора и стекла. Первый класс порошковых материалов применяется как основа материала сварочных лент, второй – как триботехнический материал. Кроме того, они значительно различаются по электрофизическим свойствам (удельному электрическому сопротивлению), а это имеет важное значение в электрофизических технологиях.

Решение задачи

Изучению механизма консолидации частиц при электроспекании посвящено много работ, в частности [6–8]. Преимущественно рассматриваются условия неизотермического нагрева при постоянном или ступенчато возрастающем давлении в основном в процессе прессования порошков [9]. В варианте процесса электропрокатки не определено влияние температуры нагрева порошковой системы Fe-Cr-Ni на механизм консолидации частиц и свойства получаемого материала.

В данном исследовании изучено влияние температуры изотермического отжига на прочность и удельное электросопротивление сплавов, изготовленных электропрокаткой импульсным током высокой плотности (ЭИС). Выполнено сравнение свойств проката, полученного формованием порошковых смесей без тока и изготовленного электроимпульсным спеканием с последующим изотермическим нагревом. При изготовлении ЭИС лент из механических смесей порошковой системы Fe-Cr-Ni использовали режимы электрического тока, которые не приводили к значительным диффузионным изменениям в ЭИС прокате процессом спекания и рентгенографически не обнаруживались.

Пропорции компонентов в железохромоникелевых смесях (табл. 1) выбирали по структурной диаграмме литых хромоникелевых сталей [10], использованы также изотермические сечения тройной диаграммы Fe-Cr-Ni (рис. 1) [10].

Таблица 1

Содержание компонентов в порошковых смесях и аналог их фазового состава в литом состоянии

Марка	Содержание компонентов, %			Соотношение фазовых составляющих, %	
	Fe	Ni	Cr	Аустенит	Феррит
X18H9	73	9	18	100	-
X30H18	52	18	30	80	20
H30	70	30	-	100	-
X30	70	-	30	-	100

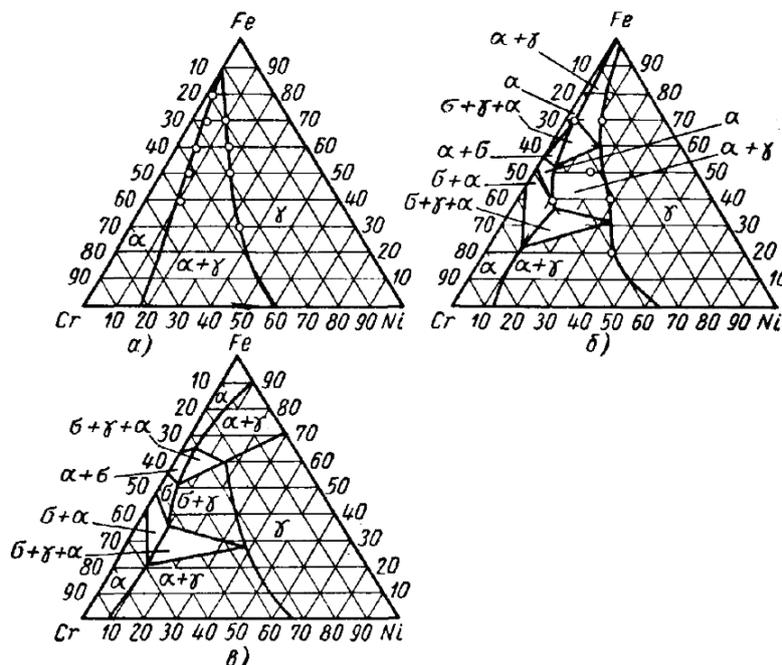


Рис. 1. Изотермические разрезы диаграммы состояния системы железо-хром-никель:
 а – при 1100 °С; б – при 800 °С; в – при 400 °С

Смеси готовили из порошков железа, никеля и хрома фракции 005 (ГОСТ 3584 – 73), используя механическое смешение в смесителе в течение четырех часов. Смеси прокатывали на лабораторной установке электроимпульсного спекания порошка при прокатке с ЭИС и без тока. Скорость вращения валков - электродов диаметром 0,1 м была равна 0,31 рад/с, эффективная плотность тока – 10^8 А/м², длительность импульсов – 0,02 с, скважность – 0,5 [2-5], напряжение на валках-электродах – 1,5 В. Ток пропускали от валка к валку. Форма

импульса - синусоидальная кратная 2π , исключая намагничивание и действие эффекта Томпсона-Пельтье. Температура лент, вышедших из валков, определена контактным методом с помощью стандартного прибора вольтамперметра В7-27-А1, который обеспечивает измерение температуры в диапазоне от -30 до $+100^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Стандартным термодатчиком служит бескорпусный транзистор 2Т331Б-1 ХМО 3360003ТУ. Температура лент через 20 с после их выхода из валков не превышала 380 К. Низкая температура электроспекания исключает появление жидкой фазы на межчастичных контактах. Тот же режим прокатки, но без тока, использовали для изготовления лент, полученных холодной прокаткой.

Предел прочности лент при растяжении определяли по стандартной методике (ГОСТ 1497–84), удельное электросопротивление – по методу двойного моста Томсона. Измерения проводили вдоль длины лент в направлении прокатки и поперек направления импульсов тока, которые проходили по толщине лент проката. Была определена также плотность порошковых лент, полученных с ЭИС и без тока (ГОСТ 18893 – 73), проведены рентгено - и металлографические исследования.

ЭИС - ленты имели в три – четыре раза большую прочность, чем обычные (табл. 2, рис. 2). Наибольшую прочность при растяжении (12 МПа) после спекания получили ленты состава Х18Н9. Выбранный режим ЭИС приводил к значительному снижению удельного электрического сопротивления, плотность оставалась на уровне обычного проката.

Таблица 2

Свойства железохромоникелевого проката

Марка	Условия получения	Толщина ленты, мм	Плотность, г/см ³	Удельное электросопротивление, 10^{-6} Ом · м
Х18Н9	Прокатка	$0,42 \pm 0,30$	$6,2 \pm 0,10$	1000,00
	ЭИС	$0,42 \pm 0,30$	$6,3 \pm 0,10$	1,00
Х30Н18	Прокатка	$0,54 \pm 0,02$	$5,9 \pm 0,10$	82,50
	ЭИС	$0,55 \pm 0,02$	$6,1 \pm 0,15$	3,77
Н30	Прокатка	$0,54 \pm 0,03$	$5,9 \pm 0,12$	90,80
	ЭИС	$0,55 \pm 0,03$	$6,0 \pm 0,09$	4,00
Х30	Прокатка	$0,62 \pm 0,03$	$5,4 \pm 0,10$	1000,00
	ЭИС	$0,61 \pm 0,03$	$5,5 \pm 0,10$	8,00

Полученные ЭИС и без тока способами прокатанные порошковые ленты подвергали изотермическому отжигу в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па) при температурах 970, 1120, 1270 и 1420 К в течение одного часа. С повышением температуры отжига предел прочности при растяжении лент повышается (рис. 2), что объясняется происходящими в прокате процессами спекания.

Предел прочности при растяжении и удельное электросопротивление ЭИС - материалов разных составов и при разных температурах могут быть как выше, так и ниже, чем у обычных лент (рис. 2, рис. 3), что объясняется процессами гетеродиффузии, проходящими на межчастичных контактах при отжиге лент и изменением свойств самих контактов.

На примере двойных порошковых сплавов видно (рис. 2, в, г), что при увеличении температуры отжига значение удельного электрического сопротивления (ρ) ЭИС материалов монотонно увеличивается тогда, как для лент, полученных без тока, характерно его монотонное снижение и рост только при температурах выше (1270 К (Fe - Ni) и 1420 К (Fe - Cr)). Это связано с тем, что межчастичные контакты, созданные механическим давлением без тока, совершенствуются процессами спекания, а по мере развития диффузионных процессов, образуется сплав, у которого удельное электрическое сопротивление выше, чем у чистых металлов. Процессы на ранних стадиях электроспекания при прессовании металлических порошков рассмотрены в [6-7]. Процессы диффузии в порошковой системе Fe-Cr-Ni в [8]. Результаты насто-

ящего исследования совпадают с данными, полученными в работах [6-8]. Процесс ЭИС порошковой ленты перед печным отжигом создает условия для ускорения диффузионных процессов за счет образования более совершенных межчастичных контактов [9].

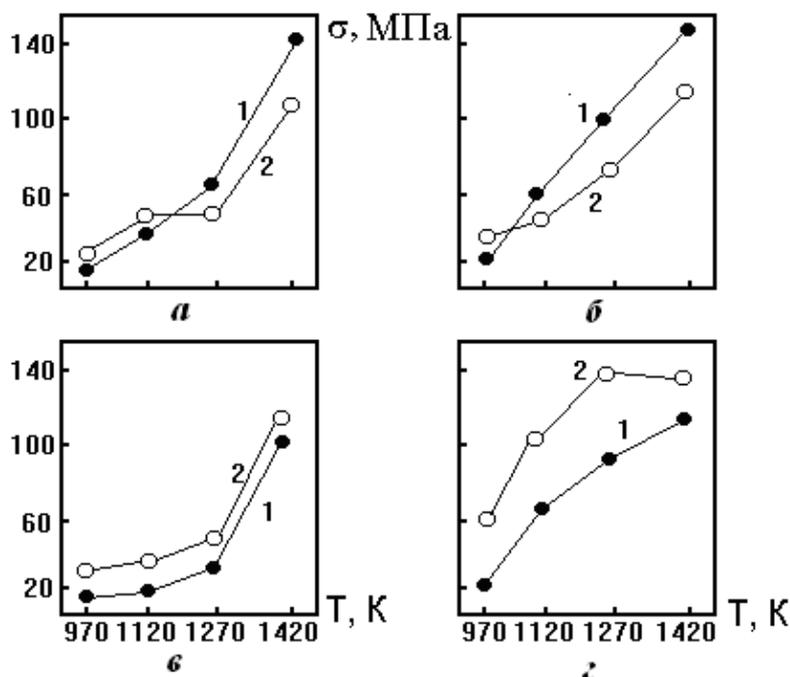


Рис. 2. Изменение предела прочности при растяжении порошковых материалов системы Fe-Cr-Ni в зависимости от температуры его изотермического отжига: 1 – холодный прокат; 2 – ЭИС – прокатка; марок: а – X30H18; б – X18H9; в – X30; г – H30

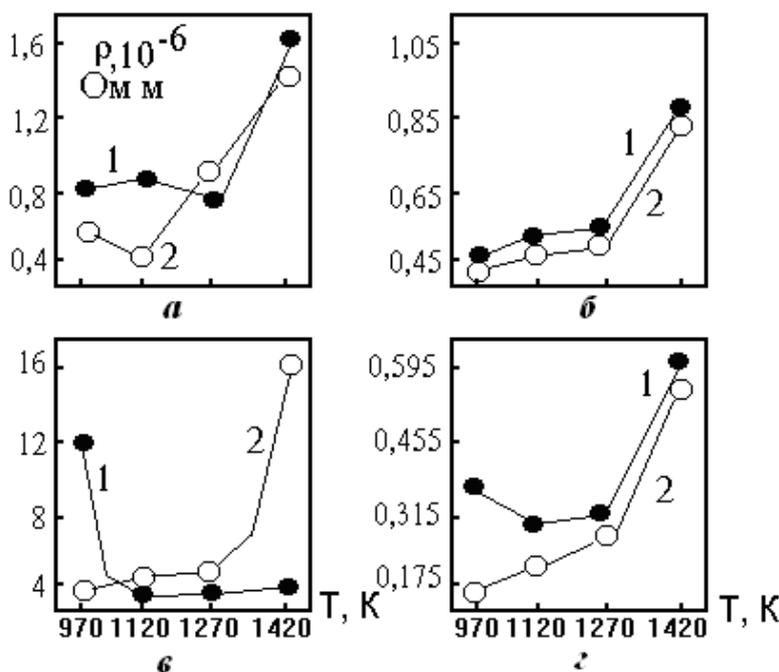


Рис. 3. Изменение удельного электросопротивления порошкового ленточного материала системы Fe-Cr-Ni в зависимости от температуры изотермического отжига: 1 – холодный прокат; 2 – ЭИС – прокат; марок: а – X30H18; б – X18H9; в – X30; г – H30

Чтобы изучить вклад изотермического нагрева в формирование свойств ЭИС порошковых лент на свойства материала, использовали относительные показатели:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\text{э}} - \sigma_x}{\sigma_x} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{э}} - \rho_x}{\rho_x} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{э}}$, $\rho_{\text{э}}$ и σ_x , ρ_x – предел прочности при растяжении и удельное электрическое сопротивление ЭИС - проката и обычных лент после нагрева.

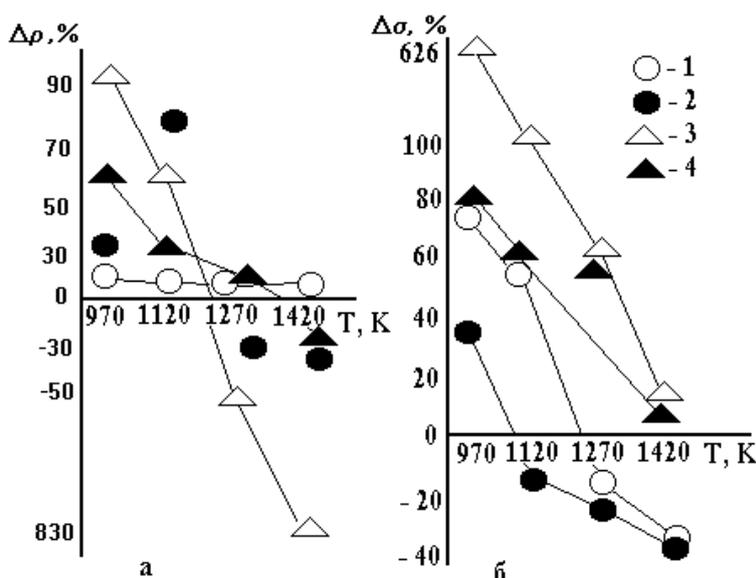


Рис. 4. Зависимость относительных показателей прочности и удельного электрического сопротивления от температуры изотермического отжига материалов порошковой системы Fe-Cr-Ni:

a – $\Delta\rho$; *б* – $\Delta\sigma$ проката марок 1 – X30Ni18; 2 – X18Ni9; 3 – X30; 4 – N30

Рост температуры нагрева приводит к снижению значений $\Delta\sigma$ и $\Delta\rho$ (рис. 4), причем кривые $\Delta\sigma$ располагаются в следующем порядке: по возрастанию приращения временного сопротивления при растяжении - аустенит – феррит с повышением температуры изотермического отжига (табл.1 Расположение кривых может быть связано с различной скоростью диффузионных процессов в порошковых системах Fe-Cr и Fe-Ni [8]. Известно также, что наложение магнитного поля на процесс прокатки порошкового железа повышает свойства проката [11]. Положение кривых $\Delta\sigma$ изменяется в сторону увеличения магнитной восприимчивости материалов от парамагнитной аустенитной структуры до ферромагнитной ферритной. Факторы магнитного поля оказывают действие на формирование межчастичных соединений при электропрокатке. Изменение знака величин $\Delta\rho$ и $\Delta\sigma$ на отрицательные значения показывает, что при температурах свыше 1100 К свойства ЭИС - материалов (и контактов) изменяются. Температура 1100 К для порошковых сплавов соответствует температуре, когда процессы спекания происходят и начинают развиваться наиболее интенсивно.

Рассчитывали показатель джоулевой составляющей электрического тока по формуле

$$F = \rho / (C_m \cdot G), \quad (3)$$

где ρ , C_m , G - удельные электрическое сопротивление, теплоемкость и плотность металлов. Показатель F отражает способность металла - проводника к нагреву при прохождении элек-

трического тока, получен из закона Джоуля - Ленца. Его размерность $\text{Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град/Н}$.

Для порошковых ленточных ЭИС лент составов Х30, Н30, Х30Н18 и Х18Н9 получили следующие значения: $1,98 \cdot 10^{-8}$; $7,73 \cdot 10^{-8}$; $8,33 \cdot 10^{-8}$; $1,81 \cdot 10^{-7}$ $\text{Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град/Н}$ соответственно. В расчетах использовали результаты табл. 2 и справочные данные. Видно, что существует связь показателя F приращением временного сопротивления при растяжении от действия электрического тока высокой плотности.

Детально авторами изучено влияние ЭИС на структуру и фазовый состав лент марки Н30. Рентгенограммы снимали на дифрактометре УРС50И в железном $K\alpha$ - излучении. После обычной прокатки и ЭИС на дифрактограммах присутствовали отражения от α -Fe и Ni (рис. 5). При этом угловые положения и интенсивность дифракционных максимумов были одинаковыми для обоих типов лент. С повышением температуры изотермического нагрева вид рентгенограмм изменяется. Это свидетельствует о том, что при нагреве происходит качественное изменение порошковых материалов, т.е. второе спекание. По мере повышения температуры интенсивность отражений α -Fe и Ni уменьшается, появляются новые отражения, угловые положения которых позволяют рассматривать их как отражение α -Fe и твердого раствора Ni в α -Fe. Отражения α -Fe обнаруживаются на дифрактограммах образцов, спеченных при 970 К. После нагрева до 1420 К углы, определяющие положение дифракционных максимумов, обозначенных как отражение α -Fe, соответствуют углам, рассчитанным для излучения $K\alpha - \text{Fe}$, исходя из справочных данных о межплоскостных расстояниях для γ -Fe [12].

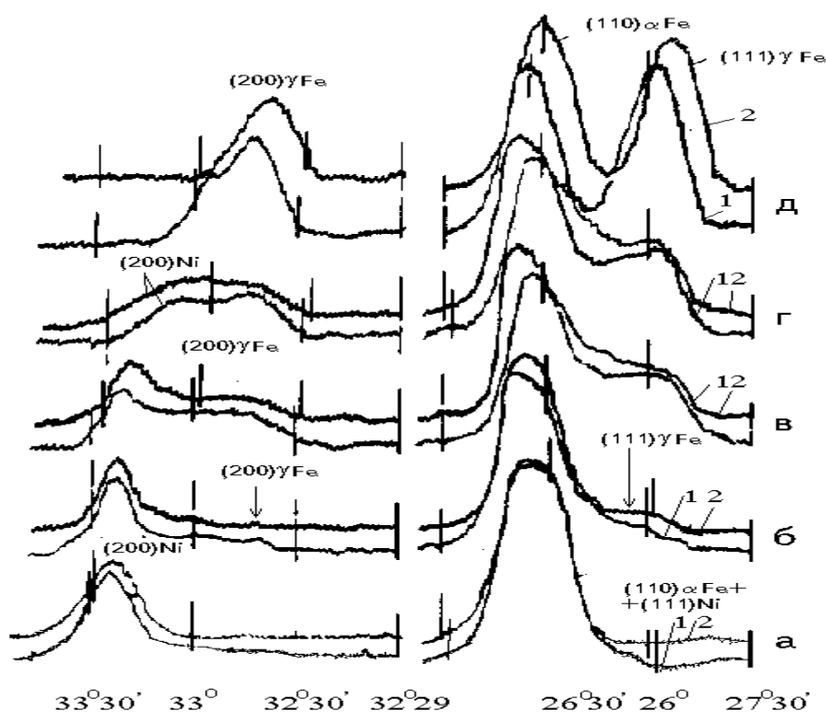


Рис. 5. Фрагменты дифрактограмм железоникелевых порошковых лент после прокатки с ЭИС и после дополнительного изотермического отжига в вакууме в течение одного часа:

а – с ЭИС (1) и без него (2); *б* – при 970 К; *в* – 1120 К; *г* – 1270 К; *д* – 1420 К

Металлографические исследования показали, что различий в форме пор и их числе после нагрева при 1120 и 1420 К не наблюдалось. Увеличение размера пор было наиболее выраженным в ЭИС - материале.

Переход α -Fe в γ -Fe реализуется диффузионно, аналогично механизму спекания косвенным нагревом [9]. Повышение температуры изотермического нагрева приводит к превращению α -Fe в γ -Fe. В ферритных материалах (и контактах), обогащенных хромом, этого

превращения не происходит, так как хром является α -стабилизатором. В результате взаимной диффузии компонентов образуются одно- и двухфазные структуры. Если формируется γ -фаза, то межчастичные контакты, созданные при ЭИС, уничтожаются, а при образовании α -твердого раствора они сохраняются (рис. 4, рис. 5).

Например, при 1270 К начинает снижаться предел прочности при растяжении лент Н30 и увеличиваться их удельное электросопротивление, что обусловлено появлением γ -фазы (рис. 4). Разница в свойствах контактов, сформированных при прокатке с ЭИС и без него, уничтожается посредством диффузии. Очевидно, что различие исчезает, когда диффузионные процессы завершены. Ускорение диффузионных процессов (рис. 5, в, з) можно объяснить повышенной концентрацией вакансий. Однако значения $\Delta\sigma$ составов, в которых γ -фаза образуется в большом количестве (табл. 1), с повышением температуры переходят в отрицательную область, т.е. предел прочности при растяжении материала, полученного методом ЭИС, становится ниже, чем у обычного. Кроме того, в материалах со структурой аустенита различие в значениях σ_b с повышением температуры нагрева исчезает раньше, чем в материалах с α -фазой. Более того, в материалах Х30 и Н30 переход $\Delta\sigma$ в область отрицательных значений в данных условиях нагрева не отмечен (рис. 5 в, з).

Результаты эксперимента указывают на то, что в ЭИС-материале гетеродиффузионные процессы наиболее развиты. Это подтверждается также изменением удельного электрического сопротивления в материалах, обогащающихся γ -фазой (рис. 5, а, б).

Таким образом, с повышением температуры нагрева прочностные свойства материалов Fe – Cr – Ni, сформированные в процессе ЭИС, сохраняются или оказываются в 1,5–2 раза выше, чем у обычного проката, если ЭИС-спеченная структура содержит преимущественно α -фазу (более 50 %). Напротив, прочность становится на 20–40 % ниже, чем у традиционно полученных материалов, если в большом количестве появляется γ -фаза, что обусловлено гетеродиффузионным процессом, происходящим при нагреве.

Материалы, состоящие из наполнителя и металлической матрицы, применяются в качестве уплотнительных элементов компрессоров, абразивных и резистивных материалов. В качестве наполнителей используются неметаллические вещества: керамика, ситаллы, стекла, алмазы, а также твердые смазки – нитрид бора турбостратной (графитоподобной) модификации, графит. Содержание неметаллической фазы в таких материалах достигает 70–80 % объема проката. Наполнители, обладающие свойствами твердых смазок, уменьшают коэффициент трения порошка о поверхность валков и процесс прокатки прерывается.



Рис. 6. Структура частиц порошка НПГ-80. В центре частиц расположен графит, окруженный слоем никеля толщиной 9 мкм. Увеличение 130

Для исключения этого явления применяют плакированные порошки, где частицы твердых смазок покрыты оболочкой из металла, например, никеля. На рис. 6 показана струк-

тура частиц порошка частиц НПГ-80, аналогичное строение частиц имеет порошок Нибон-20, но в нем окружены никелевой оболочкой частицы нитрида бора.

Для таких материалов важным является получение прочного металлического каркаса с равномерно распределенным в нем частицами неметаллической фазы, а для уплотнительных материалов требуется и наличие остаточной пористости. Достичь этого традиционными методами (прессование, прокатка, экструзия) не удастся, так как смеси с наполнителями имеют низкое значение формуемости. Использование плакированных порошков при прокатке показало, что в процессе уплотнения возможно разрушение оболочек частиц твердой смазки, что отрицательно влияет на процесс формования прокаткой. Неметаллические частицы не образуют прочных механических контактов между собой даже при давлениях свыше 2 ГПа. Способом получения материалов из композиционной смеси металлических и неметаллических порошков является электроспекание под давлением. В электроспекании неметаллические наполнители являются диэлектриками [9].

Процесс получения электроспеченных порошковых материалов с диэлектрической фазой при прессовании рассмотрен в [13, 14]. Осталось неисследованным влияние электрофизических свойств порошковых материалов, особенностей формования композиционных смесей с неметаллическими наполнителями на процесс электропрокатки (ЭИС) и свойства получаемого проката.

В качестве материалов использовали смеси порошка X20H80-2M и технического стекла, также смешивали порошок X20H80 с порошком нитрида бора, использовали и плакированные никелем порошки НПГ-80 и Нибон-20. Порошки стекла получали размолотом в бегунах технического стекла марки № 29. В смесях с X20H80 применяли фракцию порошка стекла, прошедшую через сито 010 ГОСТ 3584-73 (табл. 3).

Таблица 3

Физико - механические свойства лент с диэлектрической фазой

Состав или марка порошка	Толщина ленты, мм ± 3,5%	Плотность, г/см ³ ±2,5%	Временное сопротивление ленты при растяжении, МПа ±5,6%	Удельное электро-сопротивление, Ом мм ² /м
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	<u>0,68</u>	<u>4,20</u>	<u>менее 1</u>	<u>596</u>
	0,63	5,38	3,8	26
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	<u>0,61</u>	<u>4,29</u>	<u>менее 1</u>	<u>1000</u>
	0,60	4,37	22,0	52
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	<u>0,60</u>	<u>3,42</u>	<u>менее 1</u>	<u>1000</u>
	0,65	4,08	8,0	16
2% нитрида бора + 98% X20H80-2M	<u>0,38</u>	<u>6,36</u>	<u>8,5</u>	<u>0,14</u>
	0,36	6,43	18,2	0,09
НПГ – 80	<u>0,57</u>	<u>3,59</u>	<u>10</u>	<u>2,6</u>
	0,57	3,67	15	1,1
Нибон – 20	<u>0,45</u>	<u>3,40</u>	<u>4,0</u>	<u>18</u>
	0,45	3,75	4,4	6

Примечание: В числителе дана обычная прокатка; в знаменателе – ЭИС.

Композиции X20H80 с наполнителем (порошок стекла и/или нитрид бора) получали механическим смешиванием в течение четырех часов в баночном смесителе сухим способом. Проводили холодную без тока и ЭИС электропрокатку на стане и по режимам, показанным ранее в настоящей работе. Определяли толщину лент, плотность, временное сопротивление при растяжении и удельное электросопротивление. Для нихромостеклянных лент проводили измерение твердости лент шариком диаметром 1,5 мм по шкале НРТ № 15 ГОСТ 9012 - 59. Составы материалов, марки и свойства лент, полученных обычной и ЭИС прокаткой, приведены в табл. 3.

При прокатке без тока порошковых композиций (табл. 3) временное сопротивление лент было ниже, чем лент после электропрокатки. Увеличение содержания порошка стекла в композиции с порошком Х20Н80 до 20 % увеличивает временное сопротивление лент при растяжении, затем снижает. Электропрокатка (рис. 7, табл. 3) увеличивает прочность, незначительно (2-5%) плотность и значительно от 2 до 60 раз снижает удельное электросопротивление порошковых композиционных лент за счет образования совершенных межчастичных контактов. Показано (табл. 3), что повышение физико-механических свойств электропрокаткой в сравнении с методом без тока наиболее проявляется в нихростеклянных материалах (временное сопротивление при растяжении больше в 20 раз) и незначительно (в 1,2 -1,4 раза) – в композиции с твердыми смазками (нитрид бора, графит).

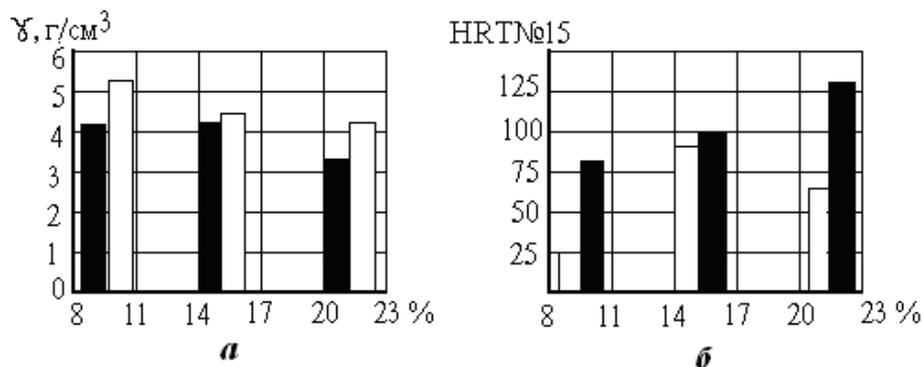


Рис. 7. Влияние содержания диэлектрической фазы:
а – на плотность; *б* – на твердость нихростеклянных лент;
 ■ – ЭИС прокат; □ – прокат без тока

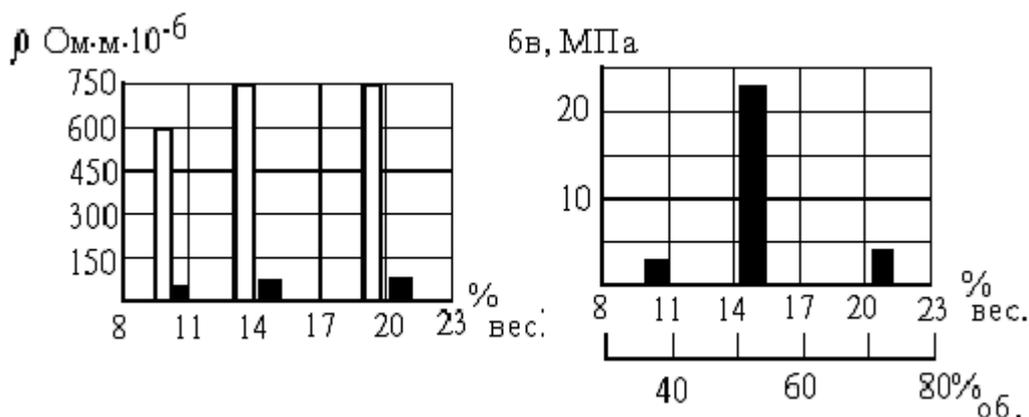


Рис. 8. Влияние содержания диэлектрической фазы:
а – на удельное электросопротивление; *б* – временное сопротивление при растяжении нихростеклянных лент: ■ – ЭИС прокат; □ – без тока

Для изучения влияния содержания диэлектрической фазы и ЭИС на свойства нихромостеклянных лент были построены гистограммы рис. 8. Видно, что ЭИС ленты (прокат) обладают большей прочностью и меньшим удельным электросопротивлением. Резкое падение удельного электрического сопротивления по сравнению с результатами прокатки без тока является характерным признаком спекания. Кроме того, в лентах, полученных без тока, увеличение содержания наполнителя более 20% (весовых) приводит к значительному падению плотности и прекращению процесса прокатки в то время, как для ЭИС сохраняется стационарность процесса. Очевидно, что для таких смесей применение электроспекания увеличивает технологические возможности прокатки, в частности, повышает прочность лент, т.е. увеличивает формуемость.

Подробное изучение полученных закономерностей невозможно без оценки электро-, тепло- и физико-механических характеристик диэлектрической фазы и материалов с ними. В смесях из нерастворимых компонентов соблюдается правило аддитивности [15]:

$$A_k = [V_m \cdot A_m + V_n \cdot A_n] \cdot K, \quad (4)$$

где A_k - свойство композиционной смеси; V_m и V_n - доли матричного материала и наполнителя (диэлектрической фазы); A_m и A_n - свойства матричного материала и наполнителя (диэлектрической фазы); K - коэффициент, учитывающий совершенство структуры (пористость и распределение компонентов). Для проведения ориентировочных расчетов в настоящей работе принимали $K=1$ [15].

В табл. 4 и табл. 5 представлены физико-механические свойства матричных материалов, взятые из справочной литературы [10, 16], а в табл. 6 приведены расчетные значения тепло- и электрофизических свойств композиционных материалов, вычисленные по данным табл. 4 и табл. 5, и значения показателя F (джоулевой составляющей электрического тока), рассчитанного по формуле (3).

Таблица 4

**Физико-механические свойства наполнителей (диэлектрической фазы)
композиционных порошковых смесей**

Материал	Кристаллическое состояние	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, Дж/кг · град	Удельное электросопротивление, Ом·м	Температура плавления, К	Нм, МПа
Нитрид Бора	Графитоподобное	2,25	720	10	2700	70
Графит	Графит	2,25	670	15	3400	180
Техническое стекло, №29	Аморфное	2,20	670	$2 \cdot 10^{13}$	1300	$3 \cdot 10^4$

Таблица 5

Физико - механические свойства нихрома и никеля технической чистоты

Материал	Плотность, г/см ³	Теплоемкость, Дж/кг · град	Удельное электросопротивление, Ом · м · 10 ⁻⁸	T _{пл} , К	Нм, МПа
Нихром	7,9	440	100	1650	1800
Никель	8,8	456	7,24	1730	1750

Данные табл. 6 показывают, что введение диэлектрической фазы увеличивает аддитивные свойства композиции, что имеет корреляцию с изменением свойств ЭИС лент, например, с твердостью и плотностью (рис. 2). Также обнаруживается корреляция показателя F со свойствами нихромостеклянных материалов при изменении содержания диэлектрической фазы (см. табл. 1). Однако для материала из смеси нихрома (98%) с нитридом бора (2%), лента из плакированных порошков НПГ - 80 и Нибон - 20 (табл. 3 и табл. 6) повышение прочностных свойств после ЭИС только в 1,1 - 1,2 раза. Более того, для Нибон - 20 разница в удельном электросопротивлении проката без тока и ЭИС проката незначительна (в два раза), во временном сопротивлении составляет несколько процентов и находится в пределах погрешности эксперимента. У него низкое значение F (табл. 6), но большое содержание диэлектрической фазы, высокое удельное электросопротивление и нанесен слой никеля на поверхность частиц VN.

Таблица 6

Расчетные значения аддитивных свойств порошковых композиционных материалов с диэлектрической фазой и значения показателя F

Материал	Плотность, г/см ³	Удельное электро-сопротивление, Ом · м	Теплоем-кость, Дж/кг · град	$\frac{F, \text{ Ом} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{град}}{\text{Н}}$
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	7,3	5	468	$1,46 \cdot 10^{-6}$
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	7,0	26	482	$7,76 \cdot 10^{-6}$
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	6,7	15	496	$4,51 \cdot 10^{-6}$
BN 2% + X20H80-2M 98%	7,8	1,4	445	$4,07 \cdot 10^{-7}$
НПГ - 80	5,6	2,0	500	$7,14 \cdot 10^{-7}$
Нибон - 20	5,6	16	500	$5,71 \cdot 10^{-7}$

На примере нихромостеклянных материалов видно, что прочностные характеристики достигают наибольшего значения, когда F максимально. Иную закономерность в изменении свойств ЭИС материалов имеют смеси, где с повышением содержания наполнителя снижается F . В данном случае наблюдается наименьший нагрев за счет действия эффекта Джоуля-Ленца в межзастичных контактах и самом порошковым материале. Например, Нибон - 20 имеет невысокое значение F и вследствие того незначительное изменение свойств при формовании с током.

Для изучения закономерностей влияния содержания диэлектрической фазы на твердость и плотность порошковых композиционных ленточных материалов применяли относительные показатели:

$$\Delta HR = [(HR_э - HR_п) / HR_п] \cdot 100 \%, \quad (5)$$

$$\Delta \gamma = [(\gamma_э - \gamma_п) / \gamma_п] \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $HR_э$ и $HR_п$, $\gamma_э$ и $\gamma_п$ - твердость, плотность ЭИС и проката без тока соответственно.

Таблица 7

Изменение относительных показателей твердости и плотности в нихромостеклянных порошковых лентах

Состав или марка порошка	$\Delta HR, \%$	$\Delta \gamma, \%$
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	200	25
Стекло 15% + X20H80-2M 85%	40	3
Стекло 20% + X20H80-2M 80%	120	18

В табл. 7 показаны зависимости ΔHR , $\Delta \gamma$, временного сопротивления (σ_b), удельного электросопротивления (ρ) и показателя F от содержания диэлектрической фазы в нихромостеклянных лентах.

Наибольшее удельное электросопротивление, временное сопротивление при растяжении (табл. 3) и наименьшее приращение плотности, твердости достигается (табл. 7) при максимальном значении показателя F . Изменение F с ростом содержания диэлектрической фазы не имеет линейной зависимости в нихромостеклянных порошковых материалах. Падение F приводит к снижению временного сопротивления при растяжении σ_b ленточного порошкового материала даже при росте плотности $\Delta \gamma$ ЭИС проката (табл. 3 и 7).



а



б

Рис. 9. Внешний вид элемента ленточного уплотнительного материала (ЛУМ) из порошка Нибон-20, плакированного никелем:

а – внешний вид ленты; б - торцевой срез уплотнительной плакированной ленты

Применение ЭИС при прокатке позволяет получать ленты с долей неформующейся фазы, достигающей 80% объема материала. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новой технологии электроспекания при прокатке абразивносодержащих и уплотнительных материалов, например, для триботехнических порошковых композиционных материалов [17]. На рис. 9 показан уплотнительный материал из порошка Нибон-20, полученный методом ЭИС при прокатке с последующей горячей прокаткой лент в пакет-оболочке из никелевых листов.

Выводы

Результаты настоящего исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Применение электропрокатки порошковых металлических и композиционных материалов создает более совершенные межчастичные контакты, чем при формировании прокаткой без электрического тока.

2. Электромагнитное поле, электрический ток при электропрокатке ленточных порошковых материалов повышают временное сопротивление при растяжении (в 2–10 раз), твердость и снижают удельное электрическое сопротивление порошковых лент (в десятки раз) в сравнении с методами холодной прокатки. Повышение свойств порошковых прокатанных лент зависит от химического состава материала, его электрофизических свойств.

Библиографический список

1. Производство порошкового проката / под ред. В.К. Сорокина. – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2002. – 296 с.
2. Мальцев, И.М. Установка для электроимпульсного спекания проводящих порошков при прокатке / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // Порошковая металлургия. 1993. №3. С. 103–106.
3. А. с. SU 1748943 Способ электроимпульсного спекания металлического порошка и установка для его осуществления / В.Г. Петриков, И.М. Мальцев, Л.А. Пырялов. – 1993.
4. Мальцев, И.М. Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах с током высокой плотности // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 4. С. 15–19.
5. Мальцев, И.М. Влияние электромагнитного поля скин - и пинч- эффектов при электропрокатке с импульсными токами высокой плотности порошковых металлических материалов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 3. С. 5–9.
6. Андрушик, Л.О. О движущих силах и кинетике диффузионных процессов при спекании металлических порошков / Л.О. Андрушик [и др.] // Металлофизика. 1987. №2. С. 32–37.
7. Андрушик, Л.О. Формирование межчастичных соединений при электроконтактном спекании металлических порошков / Л.О. Андрушик [и др.] // Металлофизика. 1981. №13. №10. С. 110–121.

8. **Анцифиров, В.Н.** Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых материалах / В.Н. Анцифиров, С.Н. Лещенко, П.Г. Курилов. – М.: Metallurgy, 1986.
9. **Райченко, А.И.** Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Metallurgy, 1987. – 128 с.
10. **Материалы в машиностроении: справочник.** – М.: Metallurgy, 1986. Т. 3.
11. **Виноградов, Г.А.** Прокатка металлических порошков / Г.А. Виноградов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1987. – 128 с.
12. **Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия** / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Metallurgy, 1982. – 623 с.
13. **Байденко, А.А.** Влияние удельных энергозатрат при электроразрядном спекании на структуру и свойства композиции медь – олово – абразив / А.А. Байденко [и др.] // Порошковая металлургия. 1986. № 4. С. 67–70.
14. **Райченко, А.И.** Влияние концентрации абразивной составляющей на механические свойства и структуру инструментального материала, изготовленного электроразрядным спеканием / А.И. Райченко [и др.] // Порошковая металлургия. 1985. №2. С. 77–80.
15. **Карпинос, Д.М.** Композиционные материалы / Д.М. Карпинос. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 683 с.
16. **Косолапова, Т.Я.** Свойства, получения и применения тугоплавких соединений: справочник / Т.Я. Косолапова. – М.: Metallurgy, 1986. – 628 с.
17. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсноспекенный при прокатке порошковой композиции антифрикционный уплотнительный материал // *Материаловедение*. 2005. № 6. С. 53–55.

*Дата поступления
в редакци 22.01.2015*

I.M. Mal'tsev

METAL SCIENCE OF ELECTRICAL ROLLING OF A METAL POWDER IN ROLL ELECTRODES WITH A HIGH-DENSITY CURRENT

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

Purpose: The aim of this research is to investigate properties of powder electrical rolling of two classes: Fe-Cr-Ni powder system and compositions with powder fillers - black lead, boron nitride and glass.

Design/methodology/approach: The study considers the properties of powder tapes from powders of different classes, derived by electrical rolling with the impact of high-density current of 10^8 - 10^9 A/m² on the forming focus.

Observations and application field: Application of electrical rolling of powdered metal and composite materials creates better interparticle contacts than at rolling without current. The electromagnetic field, current at electrical rolling of powder materials increase ultimate resistance strength (in 2–10 times), hardness and reduce electrical resistance of powder tapes (in ten times) in comparison with the cold rolling method.

Findings: Increasing properties of powder rolling tapes depends on a chemical composition of the material and its electrophysical properties.

Key words: powder rolling, high-density current.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

А.Н. Долгов

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного
технического университета им. Р.Е. Алексеева

Применение связки датчик – вычислитель позволяет проводить коррекцию характеристик, хранить справочные данные, осуществлять самотестирование, автокалибровку, проводить предварительную обработку полезного сигнала и многое другое.

Рассмотрены особенности использования наиболее ресурсоемких из часто применяемых алгоритмов – коррекции характеристик, цифровой фильтрации и спектрального анализа.

Приведено типовое включение микроконтроллера как в чисто аналоговых датчиках, так и в датчиках с цифровым выходом прямого измерения и с отрицательной обратной связью, даны особенности применения.

Использование микроконтроллеров в интегральных датчиках позволяет улучшить их эксплуатационные свойства: повысить точность, облегчить интеграцию в систему, автоматизировать калибровку, тестирование и т.п. Кроме того, развитие интегральной электроники позволило массово производить дешевые контроллеры, поэтому следует ожидать увеличение доли "интеллектуальных" датчиков от общего количества.

Ключевые слова: интегральный датчик, интеллектуальный датчик, микроконтроллер в датчиках.

Современные датчики электрических величин представляют собой сложную систему разнородных компонентов – аналоговых и цифровых электронных схем, алгоритмов измерения и конструктивных элементов. Все чаще в них встраиваются микроконтроллеры, позволяющие за счет математической обработки информации непосредственно в процессе измерения и активного управления измерением значительно повысить точность [1]. В настоящее время потребность в так называемых "интеллектуальных" датчиках непрерывно увеличивается. Разумеется, никаким интеллектом такие приборы не обладают. Речь идет лишь о связке датчик – вычислитель. В качестве вычислителя может быть использована специализированная схема, программируемая логическая матрица и т.п., но чаще всего используется микроконтроллер. Преимущества, получаемые от использования микроконтроллера, связаны с привлечением вычислительных ресурсов в сам датчик. При этом обработка данных производится в самом датчике, т.е. становится распределенной, в отличие от централизованной, как в большинстве традиционных систем. "Интеллектуальный" датчик может быть динамически запрограммирован в зависимости от изменений в требованиях пользователя. Это позволяет уменьшить номенклатуру датчиков, увеличить программу выпуска и, как следствие, существенно снизить цену.

Применение цифровых методов обработки информации позволяет повысить качество измерений, и значительно расширить функции приборов.

Датчики давления, например, с микроконтроллерами выпускаются зарубежными компаниями Fisher–Rosemount, Honeywell, Endress & Hauser, Yokogawa, Valcom и рядом других [2–9]. Из предприятий СНГ следует отметить Метран, Манометр и Элемер [10–12].

Микроконтроллер – микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессо-

ра и периферийных устройств, содержит оперативное или/и постоянное запоминающее устройство. По сути, это однокристалльный компьютер, способный выполнять простые задачи.

Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

- универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод;
- различные интерфейсы ввода-вывода, такие как UART, I²C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;
- аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи;
- компараторы;
- широтно-импульсные модуляторы;
- таймеры;
- контроллеры прямого доступа к памяти
- контроллеры бесколлекторных двигателей;
- контроллеры дисплеев и клавиатур;
- радиочастотные приемники и передатчики;
- массивы встроенной флеш-памяти;
- встроенный тактовый генератор и сторожевой таймер.

В специализированных микроконтроллерах для обработки информации (цифровые сигнальные процессоры) могут быть аппаратно реализованы функции цифровой фильтрации, преобразования Фурье, перемножения векторов и т.п.

Применение вычислителя в интегральном датчике позволяет проводить коррекцию характеристик, хранить справочные данные, осуществлять самотестирование, автокалибровку, проводить предварительную обработку полезного сигнала и многое другое.

Коррекция характеристик может проводиться при наличии математической модели либо по табличным данным. В первом случае в качестве модели чаще всего используется разложение в ряд Лорана (первые несколько членов). На этапе калибровки снимается несколько точек фактической зависимости выходного сигнала от воздействующего фактора (полезный сигнал, температура, перекрестный сигнал). Затем аппроксимируют характеристику по предполагаемой модели (находят недостающие коэффициенты).

Чаще всего используется метод наименьших квадратов. Из получившейся полной модели выражают полезный сигнал. Этот способ чуть более сложен на этапе калибровки, однако, как правило, требует меньше ресурсов (памяти и вычислительных) при восстановлении полезного сигнала. При удачном выборе модели можно сократить количество точек калибровки и увеличить точность.

При втором способе также снимается несколько точек зависимости выходного сигнала, все они хранятся в памяти микроконтроллера.

Восстановление полезного сигнала чаще всего осуществляют с помощью кусочно-линейной аппроксимации (характеристика датчика между калибровочными точками считается линейной). Основной недостаток этого способа – при существенной нелинейности характеристики датчика требуется очень много точек калибровки, как следствие, большие трудоемкость калибровки и расход памяти микроконтроллера.

Предварительная обработка полезного сигнала чаще всего включает в себя цифровую фильтрацию либо спектральный анализ.

Линейный стационарный цифровой фильтр характеризуется передаточной функцией. Передаточная функция может описать, как он будет реагировать на входной сигнал. Таким образом, проектирование его состоит из постановки задачи (например, фильтр восьмого по-

рядка, нижних частот с конкретной частотой среза), а затем производится расчет передаточной функции, которая определяет его характеристики.

Передаточная функция фильтра имеет вид

$$H(z) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}, \quad (1)$$

где порядок фильтра – большее из N или M , $z = \exp(sT)$; T - период дискретизации; s - оператор Лапласа.

Сигнал на выходе примет вид

$$y(k) = \sum_{i=0}^N b_i x(k-i) - \sum_{i=1}^M a_i y(k-i).$$

Цифровые фильтры бывают двух видов: с конечной импульсной характеристикой (нерекурсивные, знаменатель в (1) равен 1) и бесконечной (рекурсивные).

Таким образом, результат фильтрации – алгебраическая сумма, количество слагаемых напрямую зависит от порядка фильтра. С учетом того, что вычисления производятся с использованием дискретной математики, из-за ошибки округления применение фильтров высоких (более 8-го) порядков затруднено.

Преимущества цифровых фильтров перед аналоговыми:

- высокая точность (точность аналоговых ограничена допусками на элементы);
- стабильность (в отличие от аналогового передаточная функция не зависит от дрейфа характеристик элементов);
- гибкость настройки, лёгкость изменения;
- компактность – аналоговый на очень низкую частоту (доли герца, например) потребовал бы чрезвычайно громоздких конденсаторов или индуктивностей.

Недостатки цифровых фильтров по сравнению с аналоговыми:

- трудность работы с высокочастотными сигналами. полоса частот ограничена частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации сигнала. поэтому для высокочастотных сигналов применяют аналоговые, либо, если на высоких частотах нет полезного сигнала, сначала подавляют высокочастотные составляющие с помощью аналогового, затем обрабатывают сигнал цифровым фильтром;
- большая загрузка ресурсов контроллера – вычисления должны быть завершены в течение периода дискретизации;
- для большой точности и высокой скорости обработки сигналов требуется не только мощный процессор, но и дополнительное, возможно дорогостоящее, аппаратное обеспечение в виде высокоточных и быстрых ЦАП и АЦП.

Спектральный анализ базируется на разложении периодической функции в ряд Фурье. Временной интервал для исследования спектра должен быть кратен периоду сигнала. Выполнить это условие для реальных сигналов удается редко. На практике, чтобы снизить погрешность, выбирают временной интервал (окно преобразования) много больше максимального периода входного сигнала. Для экономии вычислительных ресурсов в качестве основного алгоритма используют быстрое преобразование Фурье – разновидность дискретного преобразования Фурье. В нем интегрирование заменяют суммированием, количество отсчетов (отрезков дискретизации по времени) обычно выбирают равным степени 2. Увеличение скорости преобразования происходит за счет снижения точности. Однако снижение точности из-за упрощенности алгоритма можно компенсировать увеличением количества отсчетов в окне преобразования.

Микроконтроллер может использоваться как в чисто аналоговых датчиках (рис. 1, а), так и в датчиках с цифровым выходом прямого измерения (рис. 1, б) и с отрицательной об-

ратной связью (рис. 1, в) [13]. На рисунке показаны лишь те цепи, что напрямую влияют на прохождение сигнала.

Первый вариант может использоваться, например, для коррекции температурной погрешности, если требуется именно аналоговый сигнал на выходе. Следует обратить внимание, что математическая модель такого датчика будет более сложной, чем аналогичного без контроллера. Другими словами, если предполагается использование в системе с вычислителем, использующей свои алгоритмы улучшения точности, следует отдавать предпочтение датчику без внутренней коррекции.

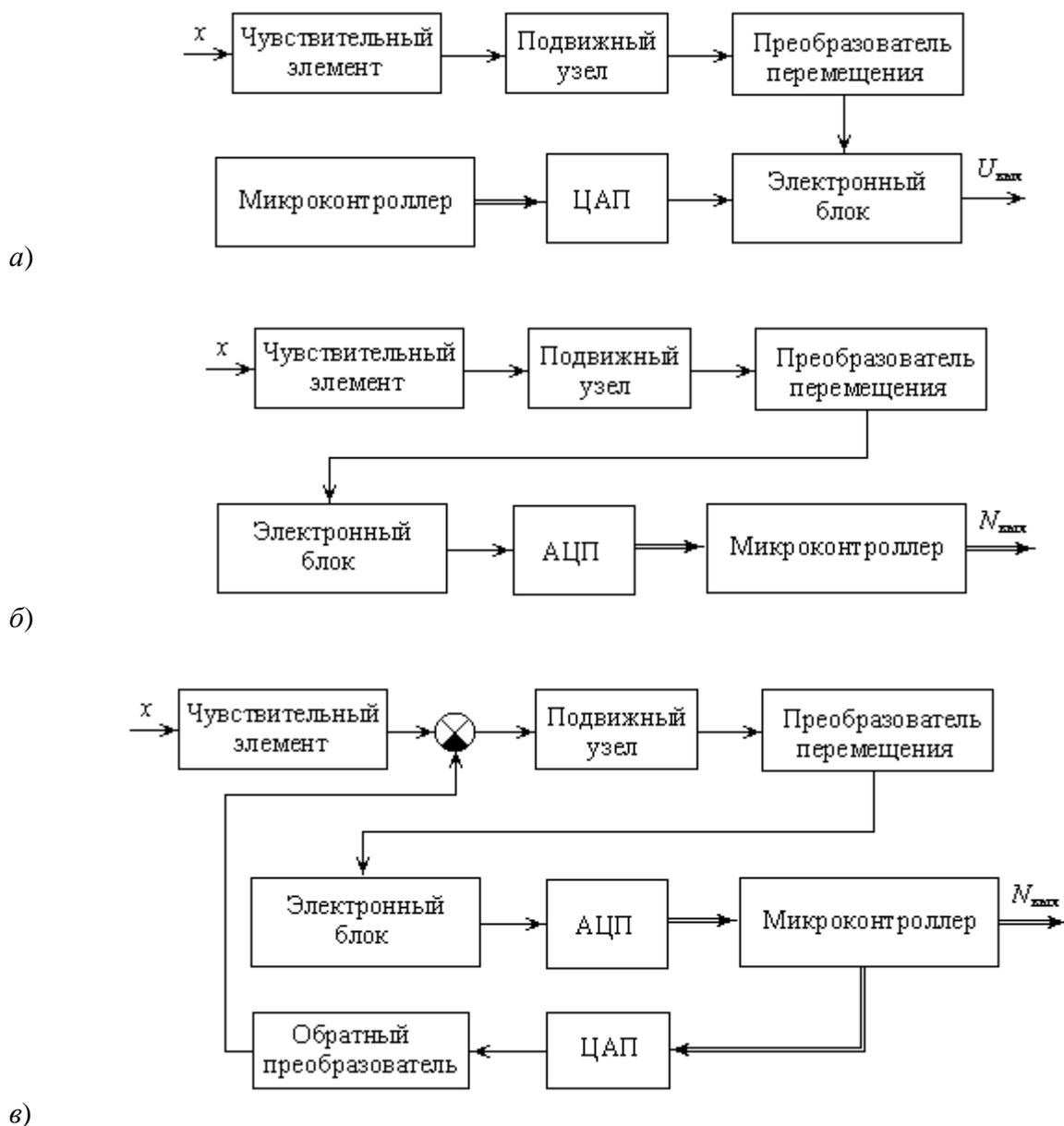


Рис. 1. Включение микроконтроллера в состав интегрального датчика. Аналоговый датчик (а), с цифровым выходом прямого измерения (б), с отрицательной обратной связью (в)

Второй вариант достаточно популярен из-за простоты реализации: датчик с цифровым выходом подключается через микроконтроллер к потребителю.

В последнем случае погрешность АЦП практически не влияет на точность датчика, но цифровая часть вносит задержку в обратную связь, как следствие, необходим дополнитель-

ный анализ устойчивости. Для улучшения динамики можно добавить корректирующее устройство в обход цепочки АЦП–микроконтроллер–ЦАП.

Необходимо отметить появление специфических цифровых шумов из-за дискретного представления информации, импульсных помех на выходе ЦАП при изменении кода, а также по питанию от цифровых схем. Методы борьбы (фильтрация, раздельное питание цифровой и аналоговой части, экранирование) позволяют лишь снизить влияние шумов, но не устранить.

Вывод

Использование микроконтроллеров в интегральных датчиках позволяет улучшить их эксплуатационные свойства: повысить точность, облегчить интеграцию в систему, автоматизировать калибровку, тестирование и т.п. Кроме того, развитие интегральной электроники позволило массово производить дешевые контроллеры, поэтому следует ожидать увеличение доли "интеллектуальных" датчиков от общего количества.

Библиографический список

1. **Шишов, О.В.** Интеллектуальные датчики в системах промышленной автоматизации // Электроника и информационные технологии. Электронное научное периодическое издание
2. url: http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/smart_sensors.pdf (дата обращения: 17.05.15)
3. url: www.tek-know.ru
4. url: www.emersonprocess.com
5. url: www.mks-instruments.com
6. url: www.all-impex.ru
7. url: <http://fisher-rosemount.nm.ru/>
8. url: <http://www.endress.com/>
9. url: <http://www.yokogawa.ru/>
10. url: <http://www.valcom.ru/>
11. url: <http://www.metran.ru/>
12. url: <http://www.manometr.com/>
13. url: <http://www.elemer.ru/>
14. Схемотехника интегральных датчиков: учеб. пособие / А.Н. Долгов; под ред. В.Д. Вавилова; Нижегород. гос. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 129 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.06.2015*

A.N. Dolgov

THE USE OF MICROCONTROLLERS IN INTEGRATED SENSORS

Arzamas polytecnic institute (branch)
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Goal of this paper is to provide a basis for the design of sensors containing a processor.

Findings: In this article shown the basic use of the microcontroller in the sensor, are given features of they application. There described the features of the most useful algorithms for sensors.

Application: The present article provides a starting-point for design advanced integral sensor.

Conclusion: Using a microcontroller integrated in the sensor allow enhance performance characteristics: increase the accuracy, simplify the integration in the system, automate calibration, testing, etc.

Key words: integral sensor, sensor intelligence, microcontroller in sensors.

УДК 62.752

Б.А. Миркин¹, Р.А. Денисов²**АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ
ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ И ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ**

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного
технического университета им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина²

Цель: Исследование амплитудно-частотных характеристик виброизоляторов с резиновыми эластичными элементами, взаимосвязь которых между коэффициентом динамичности и динамической жесткостью априори неизвестна.

Методика: амплитудно-частотные характеристики определялись на электродинамическом вибрационном стенде с программно-управляющим комплексом "SANTECH". Исследования проводились в интервале частот от 20 до 2000 Гц. Амплитуда вибрационного ускорения на столе стенда выдерживалась на уровне 2g.

Результаты и область их применения: Выявлен характер зависимости коэффициента динамичности от жесткости виброизоляторов. Полученные закономерности могут быть использованы при проектировании малогабаритных инерциально-измерительных систем, построенных на микроэлектромеханических датчиках.

Выводы: При увеличении динамической жесткости виброизоляторов коэффициент динамичности увеличивается нелинейно. В интервале жесткости от $(100 \text{ до } 300) \times 10^4 \text{ Н/м}$ значение коэффициента динамичности увеличивается плавно, в пределах 5%. При жесткости более $300 \times 10^4 \text{ Н/м}$ происходит резкий скачок величины коэффициента динамичности более чем на 25%.

В диапазоне рабочих температур коэффициент динамичности изменяется в пределах 10% от своего исходного значения при нормальной температуре.

Ключевые слова: виброизолятор, амплитудно-частотные характеристики, коэффициент динамичности, динамическая жесткость.

Введение

При проектировании новых изделий логично стремление сократить сроки и материальные затраты. Учитывая существенный прогресс в развитии вычислительных средств и алгоритмов обработки информации, логично тенденция уменьшения затрат выражается в замене части работ по изготовлению и испытанию макетных образцов математическим моделированием. Однако нередко возникает искушение полностью отказаться от натурного макетирования и после исследования математических моделей, сразу переходить к изготовлению опытных образцов. Тем не менее, практика всегда заметно отличается от любой теоретической модели, поскольку априори всех «мелочей» предусмотреть невозможно.

Характерным примером того, что моделирование обязательно должно сопровождаться изучением реальных объектов, являются представленные далее результаты исследования виброизоляторов блока чувствительных элементов, содержащего гироскопические датчики угловой ориентации и микроэлектромеханические датчики линейных ускорений (МЭМС акселерометры).

Виброизоляция предназначена для снижения влияния кинематических возмущений объекта на узлы подвеса инерционных масс чувствительных элементов. Виброизолятор уменьшает динамические нагрузки на объект, но при этом возникают различные дополнительные явления, связанные с

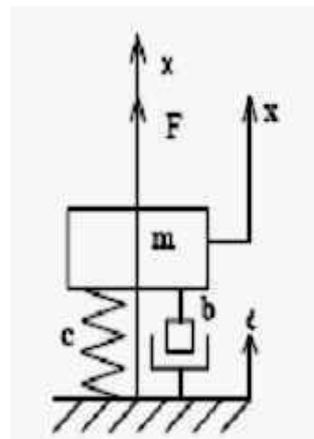


Рис. 1

увеличением статических смещений объекта или ростом амплитуд колебаний на определенных частотах.

Традиционной моделью такой упруго-массовой системы, изображенной на рис. 1, является [1] дифференциальное уравнение второго порядка

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = f(t),$$

где x – деформация; m – масса нагрузки; b – коэффициент демпфирования; c – жесткость; $f(t)$ – внешняя возмущающая сила.

Одной из проблем проектирования подобных устройств является то, что такое важнейшее свойство виброизолятора, как способность рассеивать энергию движения основания, зависит от множества факторов, инструментальный контроль которых крайне затруднителен, а порой – просто невозможен (например, величин люфтов между элементами крепления, размерами и вязкостью эластичных вкладышей, степенью их начальной деформации и т.п.). Поэтому взаимосвязь между конструктивными размерами, массой и параметрами амплитудно-частотных характеристик конкретных виброизоляторов априори неизвестна [2] и требует специальных исследований.

Объект исследований

Конструктивно рассмотренные виброизоляторы представляют собой набор вкладышей, выполненных из резиновой смеси, которые расположены в двух уровнях (верхнем и нижнем) по углам платформы с чувствительными элементами. Схематично их устройство и расположение показаны на рис. 2.

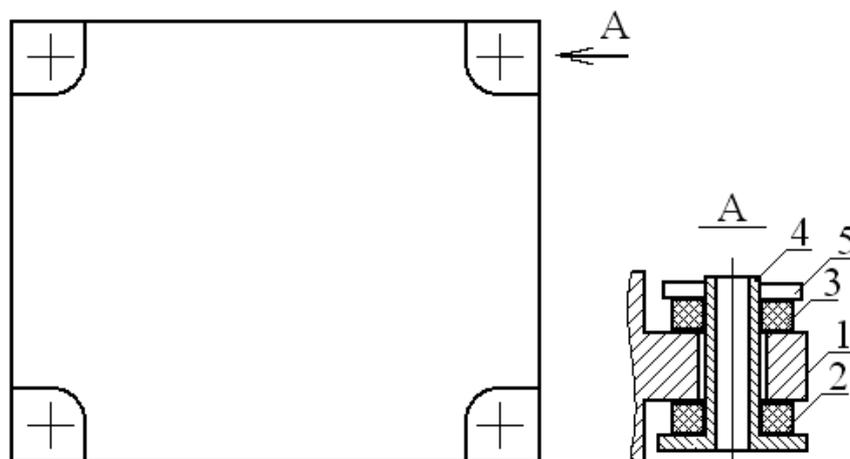


Рис. 2

Корпус 1 платформы изолирован от основания через вкладыши 2 и 3, которые зажаты между стойкой 4 и корпусом с одной стороны, корпусом и гайкой 5 – с другой. Нижняя поверхность стоек 4 опирается на неподвижное основание. С целью обеспечения требований к амплитудно-частотным характеристикам, указанным в конструкторской документации, в верхней части каждой стойки имеется гладкий участок без резьбы, позволяющий устанавливать шайбы различной толщины (в связи с выбранным масштабом не показанные на рисунке) для регулировки начального усилия сжатия вкладышей.

Методика исследований

Амплитудно-частотные характеристики снимались на вибрационном стенде ВЭДС-1200 по единой методике: на столе вибростенда задавалось виброускорение 2g в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц, второй вибродатчик устанавливался вблизи вертикали, проходящей через центр масс испытываемого образца.

Регистрация показаний и построение виброграмм выполнялись на автоматизированном рабочем месте «САНТЕК». Сами виброграммы имеют вид, представленный на рис. 2 (масштаб по горизонтали – логарифмический, по вертикали – линейный).

Для каждого из полученных графиков определены резонансные частоты, коэффициенты динамичности – отношение виброперегрузок на испытываемой платформе и на столе вибростенда, динамическая жесткость $C = 4\pi^2 f^2 m$ на резонансной частоте [3].

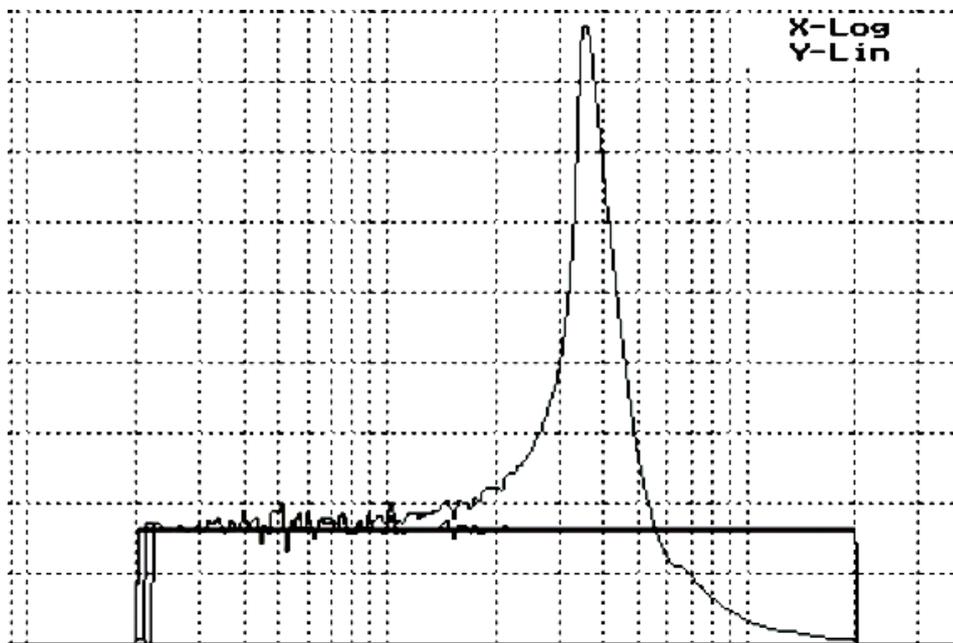


Рис. 3

Следует отметить, что одновременное обеспечение заданной резонансной частоты, степени ослабления колебаний на границе полосы заграждения и минимального коэффициента ослабления, характеризующего относительную высоту резонансного пика, представляют собой весьма противоречивую задачу. Это обусловлено тем, что изменение каждого из параметров влияет и на все остальные, причем ни характер, ни степень такого влияния для конкретной конструкции неизвестны.

Материалы исследований

В табл. 1 представлены характеристики виброизоляторов, полученные в процессе их регулировки и проверки.

Таблица 1

Номер образца	Резонансная частота f_0 , Гц	Коэффициент динамичности k	Динамическая жесткость C , 10^4 Н/м	Примечание
1	2	3	4	5
1	317	3,9	285	по оси X, НКУ
2	323	3,8	296	по оси X, НКУ
3	275	4,8	215	по оси X, +65 °С
4	275	4,6	215	по оси X, +65 °С
5	279	4,7	221	по оси Z, +65 °С
6	227	3,4	146	по оси X, -55 °С
7	219	2,4	136	по оси Z, -55 °С
8	307	4,3	268	по оси X, НКУ после термоцикла

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
8	290	4,0	239	по оси Z, НКУ после термоцикла
9	350	5,5	362	НКУ, по оси X
10	305	4,8	275	НКУ, по оси X
11	357	5,6	339	НКУ перед +Т*
11	323	5,5	278	Через 15 мин после +Т*
12	351	5,3	328	НКУ после +Т*
13	310	4,9	280	НКУ после +Т*
14	327	5,7	316	НКУ после +Т*
16	270	4,2	234	НКУ
17	276	4,6	245	НКУ
18	194**	4,5	101	НКУ
18	225**	4,6	136	НКУ, по оси Y
19	213***	4,4	133	НКУ
20	229***	4,5	153	НКУ
21	299***	4,4	261	НКУ
21	295***	5,2	254	НКУ, по оси Y
22	286	4,0	239	НКУ по оси X
23	212	3,8	131	НКУ, по оси X
23	207	4,1	125	НКУ, по оси Y
23	207	3,2	125	НКУ, по оси Z
24	219	3,7	140	НКУ, по оси X
25	259	3,9	196	НКУ, по оси X
26	341	3,5	339	по оси X
27	320	4,0	299	по оси X
28	271	3,3	214	по оси X
29	293	4,0	256	по оси X

Примечание. * – +Т-воздействие повышенной температуры; ** – с массой нагрузки 680 г, *** – с массой нагрузки 740 г.

Из представленных результатов видно, что резонансная частота виброизоляторов зафиксирована в диапазоне от 194 до 350 Гц, динамическая жесткость – от 101×10^4 до 362×10^4 Н/м (в среднем 228×10^4 Н/м), при этом коэффициент динамичности виброизоляторов отмечен в пределах от 2,4 до 5,7 (в среднем – 4,5),

Основные параметры амплитудно-частотных характеристик при изменении рабочей температуры для одного из образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Условия	Резонансная частота f_0 , Гц	Полоса пропускания Δf , Гц	Добротность Q	Коэффициент динамичности k
1	2	3	4	5
По оси X				
НКУ	317	112	2,8	3,89
+65°C	275	60	4,6	4,85
минус 55°C	227	70	3,2	3,46
НКУ	289	102	2,8	3,75
+65°C	279	78	3,6	4,62
минус 55°C	219	45	4,9	2,30
НКУ после ±Т	290	97	3,0	4,01
НКУ после ±Т	307	90	3,4	4,28

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
По оси Z				
НКУ	289	102	2,8	3,75
+65°C	279	78	3,6	4,62
минус 55°C	219	45	4,9	2,30
НКУ после ±T	290	97	3,0	4,01

Примечание. Полоса пропускания Δf рассчитана как ширина амплитудно-частотной характеристики на уровне половинной мощности, добротность Q – как отношение резонансной частоты f_0 к ширине полосы пропускания Δf , коэффициент динамичности – как отношение ускорения на испытываемой платформе к ускорению на столе вибростенда.

При воздействии вибрации по обеим осям максимальное значение резонансной частоты зафиксировано в нормальных условиях, а коэффициента динамичности – при повышенной температуре. Наибольшее изменение характеристик отмечено при воздействии на блок датчиков пониженной температуры (снижение резонансной частоты на 28... 32%; коэффициента динамичности – на 11% по оси X и на 63% по оси Z).

После температурных воздействий значение резонансной частоты практически восстановилось, а коэффициент динамичности увеличился на 7...10%, добротность несколько возросла (на 20% по оси X, на 7% по оси Z).

На рис. 4 приведена диаграмма взаимосвязи коэффициента динамичности и динамической жесткости. С целью выявления тенденции изменения экспериментальные результаты были разделены по величине жесткости на пять интервалов через $50 \cdot 10^4$ Н/м.

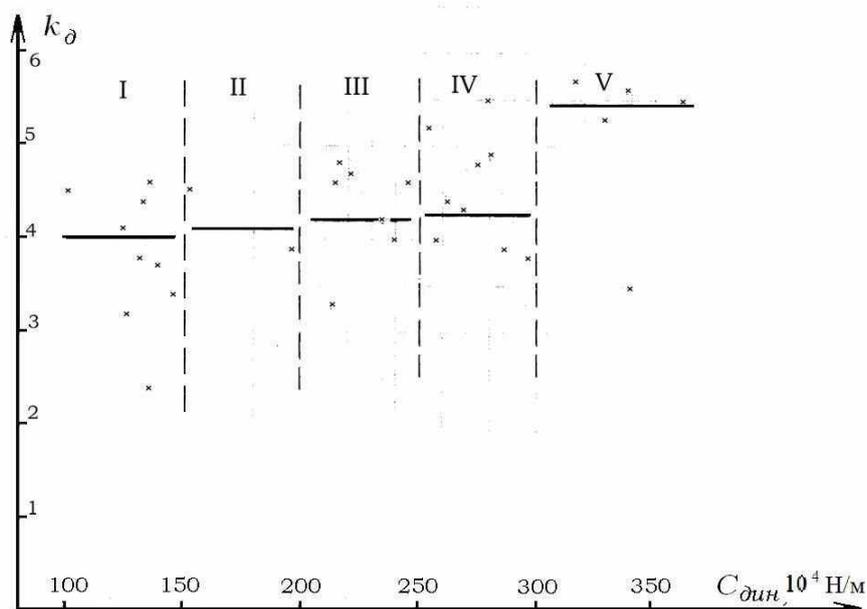


Рис. 4

Выводы

По результатам анализа амплитудно-частотных характеристик обнаружена взаимная связь между коэффициентом динамичности виброизоляторов с резиновыми эластичными элементами и коэффициентом их динамической жесткости.

С увеличением динамической жесткости коэффициент динамичности возрастает, причем зависимость коэффициента динамичности от динамической жесткости является нелинейной.

В диапазоне значений жесткости от $(100 \text{ до } 300) \times 10^4$ Н/м в интервалах с I по IV средние значения коэффициента динамичности возрастают сравнительно плавно, в пределах 5 %.

В V интервале при жесткости более 300×10^4 Н/м отмечен существенный скачок среднего значения коэффициента динамичности – более 25 %.

В диапазоне рабочих температур коэффициент динамичности изменяется в пределах 10% относительно его исходного значения в нормальных условиях.

Библиографический список

1. Вибрации в технике. Колебания линейных систем: справочник. Т. 1 / под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978.
2. Ильинский, В.С. Защита аппаратов от динамических воздействий / В.С. Ильинский. – М.: Энергия, 1970.
3. Пановко, Г.Я. Теория механических колебаний / Г.Я. Пановко. – М.: Наука, 1981.

Дата поступления
в редакцию 16.06.2015

B. Mirkin¹, R. Denisov²

ANALYSIS OF DEPENDENCE OF VIBROINSULATORS DYNAMIC QUALITY COEFFICIENT AND THEIR DYNAMIC INFLEXIBILITY

Arzamas polytechnic institute (branch)

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev¹,

Open Joint Stock Company “Arzamas instrument plant n. a. P. I. Plandin”²

Purpose: Research of rubber elastic elements based vibroinsulators gain-frequency characteristics. Dependence of concrete vibroinsulators dynamic quality coefficient and their dynamic inflexibility to experience is unknown.

Methodology/approach: gain-frequency characteristics were certain on an electrodynamic oscillation stand with a programmatic-managing complex “SANTECH”. Researches are executed in the frequency interval (20...2000) Hz. On the table of oscillation stand the vibroacceleration of 2g was set.

Results and their application domain: Character of dependence of coefficient of dynamic quality is certain from inflexibility of vibroinsulators. Can be drawn on the got results at planning of vibroinsulators for the small inertial-measurings systems built on the basis of mikroelektromechanical sensors.

Conclusions: With the increase of dynamic inflexibility the coefficient of dynamic quality increases, thus dependence of coefficient of dynamic quality on dynamic inflexibility is nonlinear.

In the range of values of inflexibility from $(100 \text{ to } 300) \times 10^4$ N/m the mean values of coefficient of dynamic quality increase comparatively fluently, within the limits of 5 %.

At inflexibility more than 300×10^4 N/m is marked substantial jump of mean value of coefficient of dynamic quality – more than 25 %.

In the range of workings temperatures the coefficient of dynamic quality changes within the limits of 10% in relation to his initial value in normal terms.

Key words: vibroinsulator, gain-frequency characteristics, coefficient of dynamic quality, dynamic inflexibility.

УДК 629.7.05

В.Л. Волков, Н.В. Жидкова

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ОРИЕНТАЦИИ НА ОСНОВЕ МЭМС

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)

Предмет, тема, цель работы: Исследование алгоритма бесплатформенной системы ориентации (БСО) с использованием микроэлектромеханических сенсоров (МЭМС).

Методология проведения работы: Составлена математическая модель БСО на основе МЭМС, обеспечивающая вычисление углов ориентации подвижного объекта с использованием кинематических уравнений Пуассона с помощью кватернионов. Использована методика компьютерного эксперимента на основе *Matlab* для исследования оценок эффективности БСО в условиях дрейфа гироскопов.

Результаты: Исследована работоспособность БСО, использующей МЭМС гироскопы, акселерометры и магнитометры. Приведены результаты по значениям среднего квадрата ошибки (СКО) и предельной ошибки для каждого из углов ориентации при наличии дрейфа гироскопов.

Значения исследования: Применение предложенной методики компенсации дрейфа гироскопов в алгоритме БСО дает приемлемые для практики ошибки.

Новизна/ценность: Применен современный алгоритм БСО, основанный на использовании параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов). Исследование БСО проведено в среде *Simulink Matlab*, что дает визуальную наглядность схем, возможность их повторения и модификации математических моделей.

Ключевые слова: МЭМС, бесплатформенная система ориентации, кватернионы, средний квадрат ошибки, моделирование, эффективность, *Matlab*.

Введение

Использование МЭМС в инерциальных измерительных системах сдерживается их относительно невысокими точностными характеристиками [1]. Тем не менее, достижения в МЭМС технологии дают для военной, аэрокосмической техники и техники специального назначения датчики инерции уже с достаточно приемлемыми характеристиками. В последние годы точность инерциальных МЭМС датчиков неуклонно повышается. Нестабильность смещения гироскопов компании *Silicon Sensing* теперь составляет не более $0,3 \text{ }^\circ/\text{ч}$, а акселерометра – 50 мкг [2]. Более значительный эффект для инерциальных измерений дает применение инерциальных блоков, т.е. совмещение в одном корпусе 3-осевых датчиков угловых скоростей (ДУС) с акселерометрами, магнитометрами и датчиками температуры. В этом случае путем совместной калибровки их характеристик удастся достичь высокой точности измерения инерциальных параметров. Однако следует отметить недоступность зарубежных электронных компонентов, к которым относятся и МЭМС, для применения в военной технике и технике специального назначения, что заставляет искать альтернативные – алгоритмические пути решения проблем точности инерциальных навигационных систем.

Особенности построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и их составных частей – бесплатформенных систем ориентации (БСО) стали особенно актуальны в условиях интенсивно развивающейся техники мобильных подвижных устройств. Системы ориентации стали необходимой составной частью беспилотных летательных аппаратов, роботов, мобильных навигационных устройств, подвижных объектов специального назначения. Бесплатформенный принцип исполнения БСО стал практически основным при использовании МЭМС и микро ЭВМ в мобильных подвижных объектах.

В последние годы появилось множество работ в области бесплатформенных инерциальных систем, это связано, в первую очередь с интенсивным развитием летательных аппаратов 4-го и 5-го поколений, беспилотных летательных аппаратов и робототехники. Здесь следует отметить фундаментальную работу В.Н. Бранца и И.П. Шмыглевского [3]. Осново-

полагающими также являются работы [4–6]. Особенно следует отметить современное учебное пособие В.Я. Распопова и В.В. Матвеева [4], эффективно используемое для изучения основ БИНС.

Математическое представление БСО, как правило, реализуется в компьютерные модели с целью проверки работоспособности алгоритмов БСО и с целью исследования их эффективности еще на этапе проектирования. Компьютерное исследование алгоритмов БСО наиболее удачно реализуется на основе инженерного программного обеспечения *Matlab Simulink* [4, 7].

Основная задача данной статьи состоит в исследовании БСО, реализуемой на основе параметров Родрига-Гамильтона (кватернионов) путем компьютерного моделирования в *Matlab Simulink*. Следует отметить, что большинство авторов по БИНС и БСО в настоящее время отдают предпочтение именно алгоритмам на базе математических моделей с параметрами Родрига-Гамильтона [3 – 6]. Хорошей особенностью БСО на основе кватернионов является линейность и интегрируемость кинематических уравнений при любых углах Эйлера-Крылова.

Базовой основой для данной статьи явились исследовательские материалы, представленные в [6]. В данной статье рассматривается составление схем БСО в инструментальной среде *Simulink* с целью проверки математических моделей и получения результатов исследования эффективности БСО при их работе в различных динамических режимах. Исполнение математических моделей БСО в *Simulink* позволяет получить более понятную визуальную модель системы и реализовать многочисленные операции дифференцирования и интегрирования более гибко на стандартных элементах. Важное место в статье уделено методике и эффективности компенсации основной погрешности БСО, возникающей вследствие дрейфа гироскопов.

Статья имеет, прежде всего, практическую направленность, позволяющую повторить предлагаемые модели и схемы, получить результаты симуляции и оценить эффективность алгоритмов БСО. Работу над статьей авторы проводили на основе многочисленных источников информации, отраженных в списке литературы, и собственных разработок [6].

Математическая модель БСО

Источником информации алгоритма ориентации с кватернионами являются проекции угловой скорости, получаемые на основе сигналов трех датчиков угловых скоростей (ДУС) и вычисляемых проекций абсолютной угловой скорости географического трехгранника. Выходом алгоритма ориентации являются оценки углов тангажа, крена и рыскания: υ , γ , ψ .

Алгоритм определения ориентации по данным об угловой скорости объекта основан на решении двойного кинематического уравнения Пуассона [4]:

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \Omega_S - \Omega_G \circ \Lambda + \Lambda(1 - \Lambda^2), \quad (1)$$

где Λ – кватернион, определяющий переход из географической системы координат $OX_gY_gZ_g$ к связанной системе $OXYZ$; Ω_S , Ω_G – гиперкомплексные отображения векторов абсолютной угловой скорости в связанной и горизонтальной системах координат соответственно; $\Lambda^2 = \lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$ – норма кватерниона; λ_0 , λ_1 , λ_2 , λ_3 – параметры Родрига-Гамильтона.

Абсолютная угловая скорость $\omega_S = [\omega_{XS}, \omega_{YS}, \omega_{ZS}]$, измеряемая ДУСами в связанной системе координат, складывается из вектора переносной угловой скорости земной системы координат, вызванной вращением Земли, из вектора переносной угловой скорости, связанной с перемещением объекта относительно Земли с линейной скоростью и из вектора угловой скорости связанной системы координат относительно базовой [4]. В векторно-матричном виде это соответствует соотношению:

$$\omega_S = A\omega_G + \omega_0, \quad (2)$$

где $\omega_G = [\omega_{Xg}, \omega_{Yg}, \omega_{Zg}]$ – проекции переносной угловой скорости в земной системе координат;

$\omega_0 = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ – проекции относительной угловой скорости в связанной системе координат; A – матрица направляющих косинусов, имеющая вид:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \upsilon & \sin \upsilon & -\sin \psi \cos \upsilon \\ -\cos \psi \sin \upsilon \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma & \cos \upsilon \cos \gamma & \sin \psi \sin \upsilon \cos \gamma + \cos \psi \sin \gamma \\ \cos \psi \sin \upsilon \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma & -\cos \upsilon \sin \gamma & -\sin \psi \sin \upsilon \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Относительная угловая скорость ω_0 определяется следующим соотношением [4]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\psi} \sin \upsilon + \dot{\gamma}; \\ \omega_y &= \dot{\psi} \cos \upsilon \cos \gamma + \dot{\upsilon} \sin \gamma; \\ \omega_z &= -\dot{\psi} \cos \upsilon \sin \gamma + \dot{\upsilon} \cos \gamma; \end{aligned} \quad (4)$$

где υ, γ, ψ – углы Эйлера-Крылова: тангаж, крен и рыскание; $\dot{\upsilon}, \dot{\gamma}, \dot{\psi}$ – угловые скорости соответственно по тангажу, крену и курсу.

Проекции $\omega_{XG}, \omega_{YG}, \omega_{ZG}$, в свою очередь, вычисляются по следующим известным соотношениям [4]:

$$\begin{aligned} \omega_{XG} &= U \cos \varphi + V_{ZG} / R; \\ \omega_{YG} &= U \sin \varphi + \tan \varphi \cdot V_{ZG} / R; \\ \omega_{ZG} &= -V_{XG} / R. \end{aligned} \quad (5)$$

где V_{ZG}, V_{XG} – составляющие линейной скорости объекта соответственно вдоль оси Z_g и X_g географической системы координат; U – угловая скорость вращения Земли; φ – широта местоположения объекта; R – радиус Земли.

Решение уравнения (1) позволяет определить собственный кватернион ориентации Λ между горизонтальной и связанной системами координат при задании начальных условий $\Lambda(0)$ [4]:

$$\begin{aligned} \lambda_0(0) &= \cos(\psi_0 / 2) \cos(\upsilon_0 / 2) \cos(\gamma_0 / 2) - \sin(\psi_0 / 2) \sin(\upsilon_0 / 2) \sin(\gamma_0 / 2); \\ \lambda_1(0) &= \cos(\psi_0 / 2) \cos(\upsilon_0 / 2) \sin(\gamma_0 / 2) + \sin(\psi_0 / 2) \sin(\upsilon_0 / 2) \cos(\gamma_0 / 2); \\ \lambda_2(0) &= \sin(\psi_0 / 2) \cos(\upsilon_0 / 2) \cos(\gamma_0 / 2) + \cos(\psi_0 / 2) \sin(\upsilon_0 / 2) \sin(\gamma_0 / 2); \\ \lambda_3(0) &= \cos(\psi_0 / 2) \sin(\upsilon_0 / 2) \cos(\gamma_0 / 2) - \sin(\psi_0 / 2) \cos(\upsilon_0 / 2) \sin(\gamma_0 / 2), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\psi_0, \upsilon_0, \gamma_0$ – начальные значения углов рыскания, тангажа и крена.

Начальные значения углов υ_0 и γ_0 определяются на основе проекций ускорения свободного падения на оси связанной системы координат (требуется информация с акселерометров):

$$\begin{aligned} \upsilon_0 &= \arcsin(-g_x / g); \\ \gamma_0 &= \arctan(g_z / g_y), \end{aligned} \quad (7)$$

где g_x, g_y, g_z – проекции ускорения свободного падения на оси связанной системы координат, измеряемые акселерометрами при равномерном движении объекта.

Для вычисления угла ψ_0 требуется информация с трехосного магнитометра. Магнитометр измеряет составляющие напряженности магнитного поля Земли по осям связанной системы координат: H_x, H_y, H_z . Значение H для магнитного поля Земли составляет: $H = 0,25 - 0,65$ Ое (эрстед).

В качестве трехосевых магнитометров часто применяют магниторезистивные датчики фирмы *Honeywell* [8]. Для построения электронного компаса *Honeywell* выпускает набор *НМС1055*, включающий двух- и одноосевые датчики магнитного поля, а также М-датчик ускорения для определения крена объекта. *НМС1055* является фактически трехосевым с диапазоном ± 6 Гаусс и разрешающей способностью 85 мкГаусс. Вычисление угла курса в диапазоне почти ± 90 град. на основе показаний магнитометра осуществляется на основе соотношения:

$$\psi_0 = \arcsin\{(H_z \cos \gamma_0 - H_y \sin \gamma_0) / L\} - D, \quad (8)$$

где H_Y, H_Z – составляющие напряженности магнитного поля Земли по осям связанной системы координат; D – магнитное склонение.

Вычисление начальных условий для кинематического уравнения (1) необходимо производить периодически для компенсации довольно значительного дрейфа показаний ДУСов (0,02 – 0,03 град/с). Однако режим компенсации можно применять только в моменты прямолинейного равномерного движения объекта. Такой режим можно определить по показаниям акселерометров, когда $\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \approx g$, где a_x^2, a_y^2, a_z^2 – составляющие кажущегося ускорения на оси связанной системы координат.

По элементам найденного в результате интегрирования кватерниона Λ (см. уравнение (1)) на конечном этапе определяются углы ориентации [4]:

$$\begin{aligned} \upsilon &= \arcsin(2\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3); \\ \gamma &= \arctan((\lambda_0\lambda_1 - \lambda_2\lambda_3)/(\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - 0.5)); \\ \psi &= \arctan((\lambda_0\lambda_2 - \lambda_1\lambda_3)/(\lambda_0^2 + \lambda_1^2 - 0.5)). \end{aligned} \tag{9}$$

Компенсация дрейфа показаний ДУСов осуществляется на основе показаний акселерометров, измеряющих кажущееся ускорение в виде проекций на оси связанной системы координат и показаний магнитометров. Известные алгоритмы выделения ускорения свободного падения из кажущегося ускорения и информация о скорости движения объекта относительно земной системы координат позволяют дополнительно определить два угла поворота связанной системы координат относительно земной (см. соотношения (7)) и еще один угол (курс) определяется по показаниям трехосного магнитометра (8). Далее применяется компенсационная схема на основе ПИ-регулятора [9], которая позволяет отфильтровывать имеющиеся измерительные шумы акселерометров и выделить и компенсировать ошибки дрейфа гироскопов.

Схема для симуляции БСО составлена в инструментальной среде *Matlab Simulink* [10] и представлена на рис. 1. Она имеет блоки: *Objects Model*, *Wg*, *Angl0*, *Poisson*, *Quaternion to Angle*, *Compensator*, *Result* и ряд дополнительных.

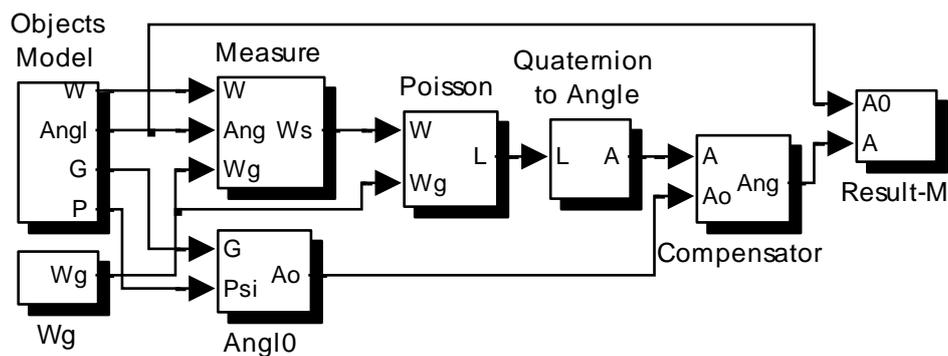


Рис. 1. Схема симуляции БСО на основе кватернионов

При моделировании алгоритма БСО в *Simulink* необходима имитация угловых движений подвижного объекта и показаний сенсоров, измеряющих это движение. Для имитации истинных значений углов υ, γ, ψ , угловых скоростей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ и вектора проекций ускорения свободного падения g_x, g_y, g_z создан блок *Objects Model*. Этот блок вырабатывает векторы $Angl=[\upsilon, \gamma, \psi]$, $W=[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$, $G=[g_x, g_y, g_z]$ и вектор $H=[H_x, H_y, H_z]$.

Схема блока *Objects Model* представлена на рис. 2. Истинные угловые движения объекта имитируются источниками с названиями *psi, tet, gam*. В данном примере моделирования приняты законы изменения углов рыскания, тангажа и крена синусоидальными со следующими параметрами: рыскание – начальное значение $\psi_0 = \arctg(V_z g / V_x g)$, амплитуда $A_\psi = 1^\circ$, ча-

стота $\omega_\psi=0,1$ Гц; тангаж – начальное значение $\nu_0=\pi/24$, амплитуда $A_\nu=1,5^\circ$, частота $\omega_\nu=0,15$ Гц; крен – начальное значение $\gamma_0=\pi/24$, амплитуда $A_\gamma=0,3^\circ$, частота $\omega_\gamma=0,2$ Гц.

Выработка вектора проекций ускорения свободного падения $G=[g_x, g_y, g_z]$ в схеме рис. 2 производится подсистемой – *Accelerometer* на основе формул в соответствии с работой [5]: $g_x=g \cdot \sin(\nu)$, $g_y=g \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\nu)$, $g_z= g \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\nu)$. Для имитации идеальных проекций относительной угловой скорости на оси связанной системы координат: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ на основе истинных ν, γ, ψ создан блок *Angle Velocity*, работающий на основе уравнений (4). Блок *Mag* осуществляет имитацию показаний магнитометра на основе формул из [5]:

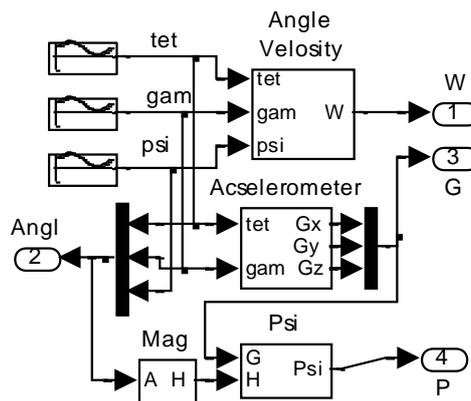


Рис. 2. Блок *Objects Model*

$$\begin{aligned} H_x &= L \cos \psi \cos \nu + B \sin \nu; \\ H_y &= L \sin \psi \sin \gamma + B(\cos \nu - L \cos \psi \sin \nu) \cos \gamma; \\ H_z &= L \sin \psi \cos \gamma - B(\cos \nu - L \cos \psi \sin \nu) \sin \gamma. \end{aligned} \tag{10}$$

где $B=H \cdot \sin(I)$; $L=H \cdot \cos(I)$ – вертикальная и горизонтальная составляющие напряженности магнитного поля Земли; $H=(H_x^2+H_y^2+H_z^2)^{1/2}$ – полная напряженность магнитного поля Земли.

Входными данными для блока *Mag* являются истинные значения углов Эйлера-Крылова *Anagl*. Блок *Mag* выдает показания магнитометров в виде вектора H . Далее в блоке *Psi* эти показания используются для вычисления угла курса в соответствии с формулой (8). Угол курса ψ_0 является выходом блока *Psi*. Выработка угла магнитного наклона I осуществляется на основе информации о широте и долготе местности по карте магнитных наклонов. В данном случае имитатора показаний магнитометра, используя истинные значения углов ν, γ, ψ , при вычислении угла курса в соответствии с формулой (8) получаем угол по отношению к географическому северу, т.е. то, что используется в навигации и ориентации объекта в земной системе координат. Для определенности при имитации H выбрано конкретное значение магнитной напряженности Земли $H=0,0314$ [А/м] (в системе СИ – в амперах на метр), соответствующее местоположению объекта.

Блок имитации показаний ДУСов *Measure* содержит схему вычисления абсолютной угловой скорости, измеряемой ДУСами в соответствии с матричным соотношением (2). Его входами являются векторы $\omega_0=[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$, $Ang=[\nu, \gamma, \psi]$, $\omega_G=[\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}]$ и вектор ошибок $dW=[d\omega_x, d\omega_y, d\omega_z]$. Этот блок вырабатывает вектор измерений $\omega_S=[\omega_{xS}, \omega_{yS}, \omega_{zS}]$. Для каждого ДУС добавлен соответствующий дрейф: dwx, dwy, dwz : $W_S=\omega_S+dW$. Блок *Wg* формирует вектор переносной угловой скорости в земной системе координат $\omega_G=[\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}]$.

Для реализации рассматриваемого алгоритма БСО на кватернионах в *Simulink* требуется ряд матричных блоков – один из них производит умножение кватернионов Λ и Ω в уравнении Пуассона. Для формирования матрицы $M(\lambda)$ используется стандартный блок *Matrix Concatenation*, объединяющий столбцы в матрицу. Входным параметром блока является кватернион L , а выходным квадратная гиперкватернионная матрица $M(\lambda)$. Блок формирования матрицы гиперкватерниона типа $M(\lambda)$ назван *Matrix Quaternion*.

Умножение кватернионов Λ и Ω в уравнении Пуассона соответствует умножению следующих матриц [4]

$$M(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda_0 & -\lambda_1 & -\lambda_2 & -\lambda_3 \\ \lambda_1 & \lambda_0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_0 & -\lambda_1 \\ \lambda_3 & -\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_0 \end{bmatrix}; \quad \omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Для формирования вектора кватерниона угловой скорости на основе второй формулы (11) используется простая схема, добавляющая ноль в верхней части трехмерного вектора угловой скорости. Перемножение матриц $M(\lambda)$ и Ω выполняется с помощью стандартного блока *Matrix Multiply*.

Для составления схемы решения уравнения Пуассона (1) требуется еще интегратор, несколько масштабирующих элементов и несколько сумматоров. Для задания начальных условий интегрирования потребуется еще блок *Quat0*, вычисляющий кватернион $L(0)$. Блок решения уравнения Пуассона (1) на основе описанных элементов представлен на рис. 3.

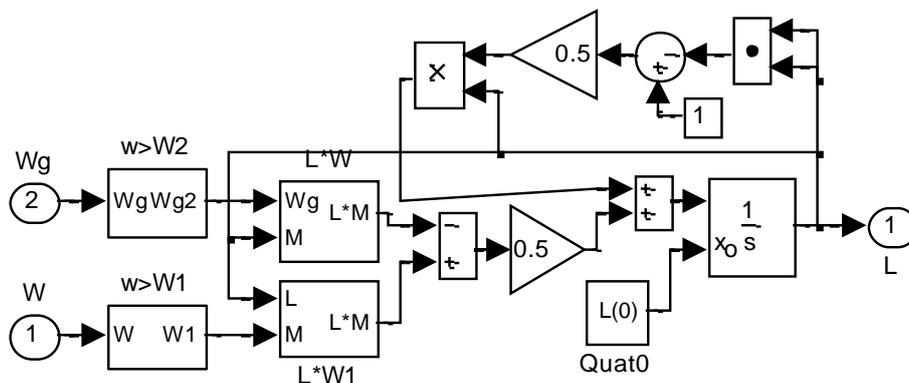


Рис. 3. Блок решения уравнения Пуассона (1) – *Poisson*

Этот блок назван *Poisson*. Входами этого блока являются трехмерные векторы угловых скоростей W и Wg , соответственно связанной и географической систем координат. Выходом блока является кватернион, являющийся решением уравнения Пуассона (1).

В верхней части схемы рис. 3, справа представлена схема формирования элемента коррекции нормы кватерниона $\Lambda(1-\Lambda^2)$. В итоге, при работе схемы рис. 3 на ее выходе получается кватернион оценки вектора углов Эйлера-Крылова. Его уже можно преобразовать в углы по формулам (9). Блок *Quat0*, входящий в схему рис. 3 и вычисляющий $L(0)$ – элементы кватерниона в начальный момент времени, работает на основе формул (6). Входами этого блока являются начальные значения углов тангажа, крена и рыскания – ψ_0 , γ_0 , φ_0 , а выходом кватернион начальных условий, элементы которого вычисляются на основе формул (6).

Блок, преобразующий кватернион L в углы по формулам (9), на схеме рис. 1 назван *Quaternion to Angle*. Блок *Compensator* предназначен для компенсации ошибок дрейфа гироскопов. В основе блока *Compensator* лежит компенсационная схема на основе ПИ-регулятора [9]. Ошибки оценивания углов Эйлера относительно дополнительных углов A_0 , вычисленных на основе данных акселерометров и магнитометров, подаются на ПИ-регуляторы. При этом выделяются низкочастотные ошибки дрейфа гироскопов. Выделенные ошибки вычитаются из неточных оценок, что дает существенно более точные результаты оценивания углов Эйлера.

Блок *Result* схемы рис. 1 предназначен для регистрации результатов симуляции БСО.

Результаты симуляции БСО с кватернионами

Выполняя симуляцию без подключения блока компенсации дрейфа гироскопов, построим также графики оценивания углов Эйлера на фоне реальных углов в случае с дрейфом гироскопов. Для примера дрейф гироскопов задан следующим: $dw_x=0,01$ град/с; $dw_y=0,01$ град/с; $dw_z=0,01$ град/с. Графики оценок углов Эйлера на фоне их истинных значений представлены на рис. 4.

Средние квадраты ошибок, рассчитанные по результатам эксперимента, получены следующие: $СКО_T=0,23$ – для угла тангажа, $СКО_P=0,1$ – для угла рыскания, $СКО_G=0,17$ – для угла крена. Пересчет в предельные погрешности (при $A_\psi=1^\circ$, $A_\psi=1,5^\circ$, $A_\gamma=0,3^\circ$) дает следующие результаты в процентах: $dT\%=1834\%$, $dP\%=1819\%$, $dG\%=7934\%$.

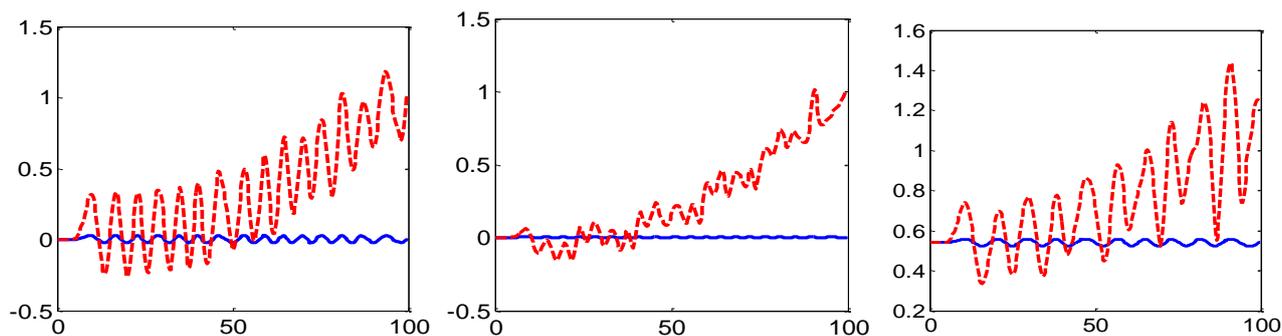


Рис. 4. Графики оценок углов Эйлера на фоне их истинных значений
(слева для угла тангажа, в средние – угла крена, справа – угла рыскания)

При включенном блоке компенсации дрейфа гироскопов и достаточно большом уровне дрейфа ($dwx=0,01$ град/с; $dwy=0,01$ град/с; $d wz=0,01$ град/с) получены графики оценок углов Эйлера на фоне их истинных значений (см. рис. 5) и численные результаты погрешностей.

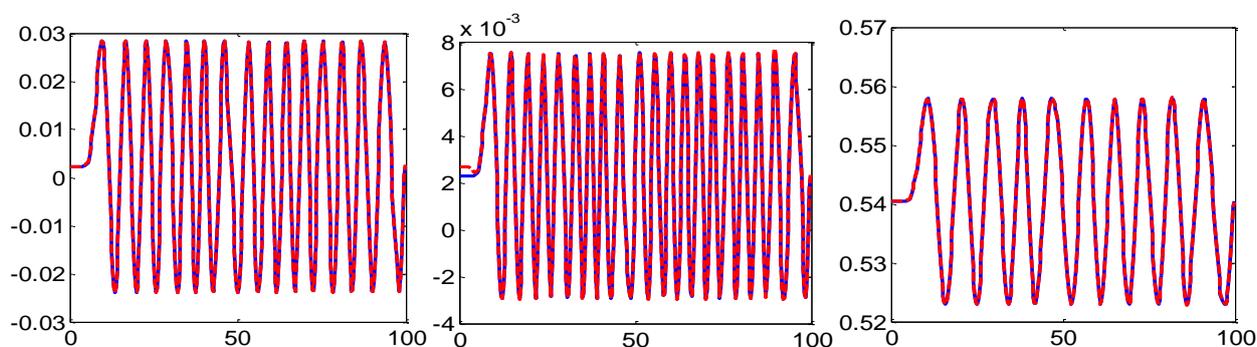


Рис. 5. Графики оценок углов Эйлера на фоне их истинных значений с учетом компенсации дрейфа гироскопов (графики оценок практически совпадают с истинными значениями углов)

Средние квадраты ошибок, рассчитанные по результатам эксперимента, в этом случае получены следующие: $СКО_T=1,7 \cdot 10^{-12}$ – для угла тангажа, $СКО_P=6,5 \cdot 10^{-13}$ – для угла рыскания, $СКО_G=7,2 \cdot 10^{-13}$ – для угла крена. Пересчет в предельные погрешности (при $A_\psi=1^\circ$, $A_\varphi=1,5^\circ$, $A_\gamma=0,3^\circ$) дает следующие результаты в процентах: $dT\%=0,005\%$, $dP\%=0,0046\%$, $dG\%=0,015\%$.

Выводы

Математическая модель бесплатформенной системы ориентации построена на основе традиционных кинематических уравнений Пуассона с использованием параметров Родрига-Гамильтона. Применение алгоритма БСО на кватернионах имеет существенные преимущества по сравнению с другими алгоритмами (на углах Эйлера-Крылова, на направляющих косинусах), так как имеет существенно меньшие погрешности расчетов при прочих равных условиях.

Моделирование алгоритма БСО проведено с помощью программной среды *Matlab Simulink*. В качестве результатов моделирования приведены графики основных процессов и численные результаты по ошибкам оценивания углов ориентации. Результаты компьютерного эксперимента подтверждают эффективность алгоритма БСО в системах определения пространственного положения маневренных подвижных объектов в широком диапазоне сигналов и шумов. Ввиду незначительного расхождения результаты в виде графиков оценок практически совпадают с реальными углами, что доказывает эффективность компенсации ошибок дрейфа показаний гироскопов. В итоге, компенсация дрейфа гироскопов, применяемая в алгоритме оценивания на основе кватернионов дает высокую точность оценок (не хуже 0,02%).

Новым результатом, полученным в статье, является алгоритм компенсации дрейфа в измерительных данных гироскопов. Эффект компенсации дрейфа достигнут с помощью информации с микроакселерометров и магнитометров при использовании схемы с отрицательной обратной связью на основе ПИ-регуляторов. Таким образом, решена задача компенсации дрейфа показаний микрогироскопов, как основной ошибки БСО.

Библиографический список

1. **Сысоева, С.С.** Тенденции рынка *Higt-end* МЭМС датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 4. С. 41–46.
2. **Бакмачев, А.** МЭМС-гироскопы и акселерометры *Silicon Sensing*: английские традиции, японские технологии // Компоненты и технологии. 2014. № 4. С. 18–26.
3. **Бранец, В. Н.** Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
4. **Матвеев, В. В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов; под ред. В. Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»», 2009. – 280 с.
5. **Распопов В.Я.** Микросистемная авионика: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – Тула: «Гриф и К», 2010. – 248 с.
6. **Жидкова, Н.В.** Моделирование бесплатформенной системы ориентации / Н.В. Жидкова, В.Л. Волков // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1; URL <http://www.science-education.ru/121-17099>.
7. **Белочкин, П.Е.** Особенности моделирования бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера в среде *Matlab* и *Mathcad* / П. Е. Белочкин, Д. А. Кацай // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. С. 18–20;
8. **Маргелов, А.** Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell. Chip News. URL: www.chip-news.ru. 2005. № 95. С. 52–56.
9. **Premerlani, W.** Direction Cosine Matrix IMU: Theory / W. Premerlani, P. Bizard. URL: <http://gentlenav.googlecode.com/files/DCMDraft2.pdf>. 2009. 30 p.
10. **Дьяконов, В.П.** *Matlab*. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 768 с.

Дата поступления
в редакцию 13.06.2015

V.L. Volkov, N.V. Zhidkova

INFORMATION PROCESSING IN SYSTEM OF ORIENTATION, BASED ON MEMS

Arzamasskiy pollytechnic institute (branch),
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Study algorithm strapdown orientation system (SSR) using micro electro-mechanical sensors (MEMS).

Design/methodology/approach: The mathematical model SSR MEMS calculates orientation angles of moving object using Poisson kinematic equations using quaternions. Used computer simulation method based on Matlab for studying effectiveness evaluations SSR in a gyro drift.

Results: A study using SSR performance MEMS gyroscopes, accelerometers and magnetometers. The results of values of mean square error (RMSE) and limit of error for each of angles of orientation in presence of drift gyros.

Research limitations/implications: Application of proposed method gyroscopes drift compensation algorithm gives BSO acceptable for practice of error.

Originality/value: Using modern algorithm SSR, based on of parameters Rodrigues-Hamilton (quaternions). A study conducted among SSR Simulink Matlab, giving visual clarity schemes, possibility of repetition and modification of mathematical models.

Key words: MEMS strapdown orientation system, quaternions, the mean square error, modeling, efficiency, Matlab.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.242.2

Т.М. Крюкова

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УКЛАДЫ КАК ОСНОВА РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена актуальность решения задачи ускоренного перехода экономики России к шестому технологическому укладу. В работе проанализированы наиболее характерные проблемы, оказывающие отрицательное влияние на процесс смены укладов, которые также являются общими для промышленных комплексов экономики России. Обозначена роль промышленной политики для решения указанной совокупности проблем.

Представлены общие характеристики технологических укладов, обоснована актуальность ускорения перехода и реализации промышленной политики. Практическое применение заключается в разработке предложений по более широкому применению и реализации промышленной политики на всех уровнях государственного управления.

Ключевые слова: технологический уклад; инновационная деятельность; промышленная политика; производственная система; машиностроение; конкурентоспособность.

Развитие производительных сил на современном этапе общественного производства в масштабах мирового хозяйства свидетельствует о возникновении ряда совершенно новых процессов, оказывающих существенное растущее воздействие на экономики абсолютно всех стран, в частности, как промышленно развитых, так и развивающихся. Эти явления и процессы происходят в связи с изменением характера и особенностей осуществления научно-технического прогресса.

В настоящее время происходят процессы интернационализации предпринимательской деятельности, вызванные нехваткой ресурсов в условиях ускоренного технологического и технического обновления всех факторов и средств производства, а также ужесточения предпринимательской конкуренции и, как следствие, возникновение необходимости решения новых и порой неожиданных задач. Кроме этого, происходит усложнение решения кроме выше обозначенных проблем, еще сложностями в организации процессов производства и сбыта продукции с усилением воздействия влияния технологических прорывов, устаревания производственной базы, изменения в структуре экономики и рынка, отношения между предприятием – производителем и обществом, как потребителем.

Необходимо отметить, что конкурентная борьба возникает не только в сфере реализации продукции, но и на стадиях создания нового товара, где формируются основные параметры будущей конкурентоспособности предприятия. И в комплексе определяющих факторов конкурентоспособности выступает показатель её качества, в частности, научно-технического уровня производимого товара или оказываемой услуги, как результат реализации достижений научно-технического прогресса и стратегическое средство выхода на новые рынки и сокращения издержек производства.

Современный этап научно-технической революции вызвал небывалый рост производства

и спроса на те товары, в которых реализуются достижения научно-технического прогресса. Научный и технический уровень технологий и товаров рассматривается ныне как определяющий фактор коммерческого успеха. Это выдвигает на первый план требование ускорения инновационных процессов, прежде всего, в направлении организации модернизации производственных систем. При сохранении поддержки движущих сил научно-технического прогресса во всей их взаимосвязи среди научных и технических факторов приоритет отдается таким, которые имеют решающее значение с точки зрения обеспечения технологического превосходства.

С целью достижения высоких результатов в конкурентной борьбе, ведущие предприятия стремятся к достижению технического и технологического превосходства, прибегая при наличии соответствующих ресурсов к технологической монополии в избранных ими ключевых отраслях, чтобы создать максимальный разрыв, который конкуренты не смогли бы преодолеть. Данная стратегия означает, что следует производить такие товары, производство которых будет недоступно и недостижимо ближайшим конкурентам в течение определенного времени. В практической деятельности ее реализация заключается в разработке новых технологий производства товаров и завоеванием на их основе новых рынков потребителей данной продукции. При этом происходит постепенный переход конкурентной борьбы от простой ценовой конкуренции к сфере научно-технического и инновационного развития. А предприятия, выходящие на рынок применяя данную стратегию, занимают ведущее положение не только с технологической и технической точки зрения, но и монополизировав сферу ценообразования и, как следствие, максимизируя прибыль.

В мировой экономике инновации являются признанным стратегическим фактором экономического роста. Инновации оказывают существенное воздействие на структуру общественного производства, изменяют экономическую организацию общества. В результате сложившейся экономической ситуации и надвигающихся радикальных социально-экономических преобразований в условиях экономического кризиса, инновационная деятельность в России переживает трудные времена, отечественная экономика оказалась в принципиально новых условиях, требующих от хозяйствующих субъектов в жесткой конкурентной борьбе и негативного воздействия многих факторов, доказать свое право на существование путем насыщения экономики новыми технологиями. Необходимо отметить, что в настоящее время Правительством РФ и руководителями регионов все больше внимания уделяется инновационному развитию отдельных хозяйствующих субъектов, приходит осознание того, что это важнейшая составная часть государственного устройства. Официально принятым государственными органами управления стратегическим направлением развития экономики страны на современном этапе является именно его инновационная направленность.

Инновационная деятельность определяется составом и уровнем развития ее составляющих, их взаимосвязями и способностью работать как единая система реализации нововведений. Следовательно, необходимо повышать конкурентоспособность российских предприятий, в том числе на мировом рынке, так как именно он дает возможности реализации прорывных технологий и реализации программ импортозамещения с дальнейшим созданием серьезных инструментов его регулирования, а именно - специализированных промышленных площадок - индустриальных парков.

Главной целью импортозамещения выступает создание той среды для национальной промышленности, в которой будет наблюдаться наибольший ее рост. Представители этой концепции говорят о том, что устойчивое экономическое развитие государства возможно только в случае значительного увеличения уровня промышленного самообеспечения, повышения объемов выпуска продукции внутри страны. Такой подход является следствием нестабильности процессов, происходящих в мировой экономике и настороженным отношением к иностранному капиталу. Но что при реализации концепции импортозамещения основным источником средств для придания экономике первоначально импульса роста выступают доходы экспортного сектора. Таким образом, можно говорить о том, что создаваемый на импортозамещающих производствах товар должен быть ориентирован не только на внутренний

рынок, но и на внешний, поскольку только в этом случае уровень конкурентоспособности продукции будет приемлемым и достигнутые в результате положительные результаты деятельности не будут потеряны при возвращении к привычному для данной страны курсу. То есть нужно развивать не только производство определенных отраслей внутри страны, но и повышать уровень развития экономики, социальной сферы, инфраструктуры, делая Россию высококонкурентоспособной, способной на равных конкурировать с развитыми промышленными странами и предприятиями, в частности.

Поэтапно развивающееся импортозамещение ведет:

- к росту занятости населения, и, как следствие, снижению безработицы и повышению уровня жизни;
- повышению уровня научно-технического прогресса и, как следствие, уровня образования;
- укреплению экономической и продовольственной безопасности страны;
- росту спроса на товары внутреннего производства, что в свою очередь стимулирует развитие экономики страны, расширение производственных мощностей;
- сохранению валютной выручки внутри страны и, как следствие, росту валютных резервов и улучшению торгового баланса страны.

Импортозамещение – это не только уменьшение или прекращение импорта определенного товара посредством производства, выпуска в стране того же или аналогичных товаров, но и тип экономической стратегии и промышленной политики государства, который направлен на защиту внутреннего производителя путем замещения импортируемых промышленных товаров товарами национального производства. Результатом этого типа должно стать повышение конкурентоспособности отечественной продукции предприятий посредством стимулирования технологической модернизации производства, повышения его эффективности и освоения новых конкурентоспособных видов продукции с относительно высокой добавленной стоимостью.

Стратегия импортозамещения предполагает постепенный переход от производства простых товаров к наукоемкой и высокотехнологичной продукции путем повышения уровня развития производства и технологий, образования широких слоев населения. Сама по себе стратегия импортозамещения опирается на развитие всего производства, повышение качества производимого товара, технологий, применяемых на предприятиях, развитие инноваций. И это особенно актуально для страны, уровень производственных отраслей которой отстает от уровня государств, с которыми она взаимодействует.



Рис. 1. Жизненный цикл технологического уклада

Необходимо отметить, что реализовывая какую-либо стратегию, нужно смотреть на ре-

шение проблемы комплексно, а в частности, необходимо учитывать современное развитие науки, техники и технологии. Поэтому дальнейшие направления развития должны выбираться с учетом мировых тенденций и быть ориентированы на концепцию технологических укладов.

Технологический уклад характеризуется единым техническим и технологическим уровнем составляющих его производств, связанных горизонтальными и вертикальными потоками качественно однородных ресурсов, основывающихся на общих ресурсах научно-технического потенциала, высококвалифицированной рабочей силы и прочих индивидуальных факторах организации производственного процесса.

На рис. 1 представлена система жизненного цикла технологического уклада, которая характеризует стадии развития науки, техники и технологии во времени.

Технологический уровень развития передовых стран в последние четыре десятилетия относился к пятому технологическому укладу, ядро которого составляли электроника и вычислительная техника, телекоммуникации, роботостроение, информационные услуги. Технологическое лидерство в рамках данного уклада принадлежит Японии, США, Германии, Швеции и другим странам ЕС. Современный этап развития мировой экономики связан с переходом к шестому технологическому укладу, основанному на внедрении компьютерных технологий во все стадии воспроизводственного процесса и на развитии нано - и биотехнологий.

На рис. 2 представлено экономическое развитие технологических укладов и поколений техники в историческом разрезе.

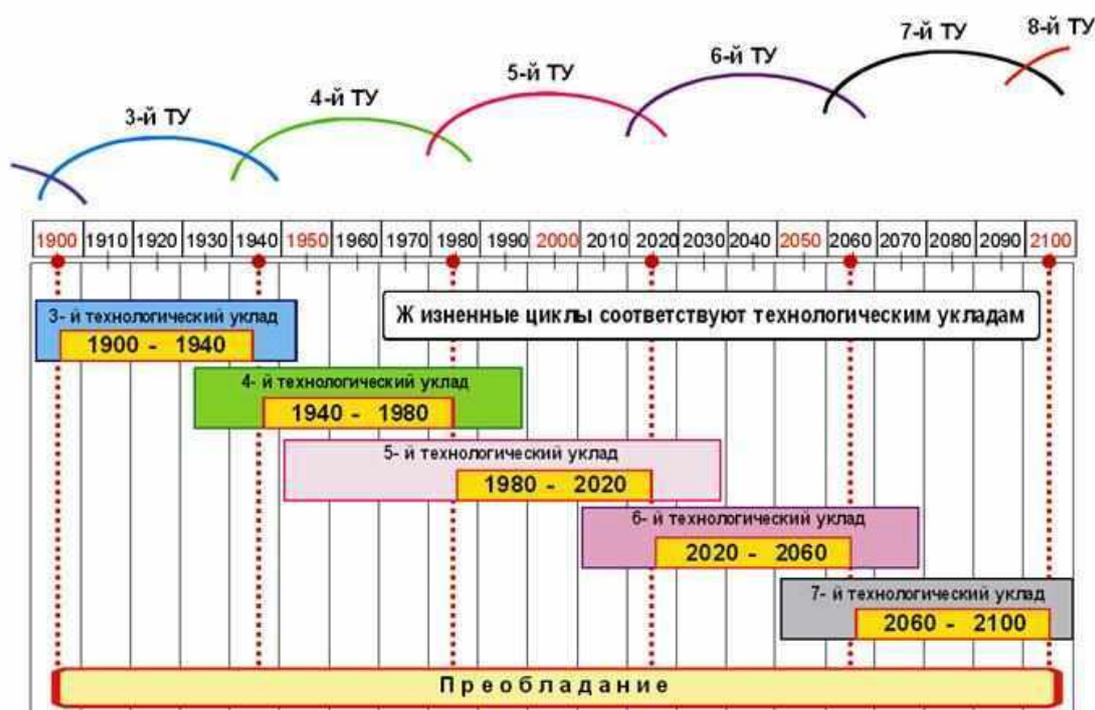


Рис. 2. Ритм смены технологических укладов и поколений техники

Основными направлениями нового шестого технологического уклада станут:

- 1) биотехнологии, основанные на достижениях молекулярной биологии и геномной инженерии;
- 2) нанотехнологии;
- 3) системы искусственного интеллекта;
- 4) глобальные информационные сети и интегрированные высокоскоростные транспортные системы.

Дальнейшее развитие получат гибкая автоматизация производства, космические технологии, производство конструкционных материалов с заранее заданными свойствами, атомная промышленность, авиаперевозки.

Вместе с отраслями ядра нового технологического уклада быстро растущими сферами применения нанотехнологии станут его несущие отрасли. В их числе останутся несущие отрасли предшествующего пятого технологического уклада: электротехническая, авиационная, ракетно-космическая, атомная отрасли промышленности, приборостроение, станкостроение, образование, связь. Благодаря появлению наноматериалов, в число несущих отраслей нового технологического уклада также войдут: химико-металлургический комплекс, строительство, судо- и автомобилестроение.

С.Ю. Глазьев связал «глубокие изменения в технике (технологии производства)», отмеченные Н.Д.Кондратьевым, со сменой технологических укладов. Чередование деловых циклов принято связывать со сменой технологических укладов в общественном производстве [2].

На рис. 3 представлена взаимосвязь технологических укладов с ключевыми отраслями промышленности во временном промежутке.



Рис. 3. Технологические уклады

В то же время в целях снижения временных и финансовых затрат на создание высокоэффективных индустриальных парков и управляющих компаний необходимо учитывать существующий опыт лучших международных практик в этой области.

На рис. 4 представлено место России в международном сообществе и ее внутренние и внешние взаимосвязи.

Согласно прогнозам, при сохранении нынешних темпов технико-экономического развития, 6-й технологический уклад вступит в фазу распространения в 2010–2020 гг., а в фазу зрелости – в 2040-е гг. При этом в 2020–2025 годах произойдет новая научно-техническая и технологическая революция, основой которой станут разработки, синтезирующие достижения в названных ранее базовых технологиях. Для подобных прогнозов есть основания. В США, например, доля 5-го технологического уклада составляет 60%, 4-го – 20%. И около 5% уже приходится на 6-й технологический уклад. В России, к сожалению, 6-й технологический уклад пока не достаточно активно формируется. Доля технологий 5-го уклада составляет примерно 10% (в военно-промышленном комплексе и в авиакосмической отрасли), 4-го – свыше 50%, третьего – около 30%. Отсюда видно: чтобы Россия в течение ближайших 10 лет

смогла войти в число стран с 6-м технологическим укладом, ей необходимо виртуально усвоить 5-й уклад [5].



Рис. 4. Место России в международном сообществе

Управление сменой технологических укладов предполагает программно-целевое управление техническим развитием производства и перераспределение ресурсов для развития нового технологического уклада путем создания техники и технологий новых поколений, а также строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения производств для осуществления инновационной конверсии, внедрения прорывных инноваций, реновации основных производственных фондов, которые обеспечивают технологические сдвиги и введение новаций в экономический оборот. Если это условие не выполняется, то формируется менее эффективная модель многоукладной экономики, что вызывает межотраслевые диспропорции, возрастание экономических потерь и снижение, в конечном счете, эффективности и конкурентоспособности как производства, так и государства с его неуклюжей инновационной политикой.

Исследование публикаций различных ученых и исследователей, а также систематизация данных концепций развития машиностроительного комплекса позволяют выявить наиболее значимые и системные проблемы, оказывающие негативное влияние на процесс смены технологических укладов, к которым относятся:

1. Моральный и физический износ оборудования и технологий, достигающий критического уровня;
2. Острый дефицит квалифицированных кадров вследствие относительно низкой заработной платы, падения престижа инженерно-технических и рабочих специальностей, обострения социальных проблем и снижение общей численности активного населения;
3. Дефицит денежных ресурсов, вызванный низкой рентабельностью производства и низкой кредитной и инвестиционной привлекательностью предприятий для реализации программ стратегических преобразований, в том числе: внедрение передовых управленческих и организационно-технических решений, модернизация производственной инфраструктуры, подготовка и привлечение квалифицированных кадров, разработка и освоение новых конкурентоспособных видов продукции и услуг;
4. Наличие избыточных производственных мощностей, как правило, с морально устаревшей конфигурацией и архитектурой производственных зданий (излишние габариты, высокая энергоемкость, низкая ремонтпригодность и т. п.) и соответственно крайне высокие

издержки на их содержание (в станкостроении уровень загрузки производственных мощностей составляет около 20%, а на предприятиях сельхозмашиностроения - не более 25%);

5. Морально устаревшую инфраструктуру производственных мощностей (промышленные коммуникации, внутризаводская транспортная и складская система (внутренняя логистика), экологическая безопасность, санитарные нормы и требования).

По моему мнению, основным выводом из обозначенных ранее проблем является следующее: наиболее значимыми, требующими комплексного решения проблемами, оказывающими существенное отрицательное влияние на процесс смены технологических укладов являются недостаточная эффективность инвестиционных процессов; низкая рентабельность производства и инвестиционная привлекательность; критический физический и моральный износ и технологическая отсталость основных фондов. Указанные комплексные проблемы, по моему мнению, целесообразно решать в рамках всеобщей промышленной политики.

Системообразующей целью промышленной политики должно выступать повышение конкурентоспособности продукции и технического уровня промышленности, обеспечение выхода инновационной продукции и высоких технологий на внутренний и внешний рынки, замещение импортной продукции и перевод промышленности на основе инновационно активного промышленного производства в стадию устойчивого роста.

Исходя из изложенного, можно сформулировать задачи промышленной политики:

1. Обеспечение опережающего роста производства продукции перерабатывающих отраслей по сравнению с добывающими отраслями, разработка новых видов продукции, технологий, материалов, использование имеющегося научно-технического задела и новых результатов фундаментальных и прикладных исследований;

2. Формирование конкурентной среды, создание равных и предсказуемых условий экономической деятельности;

3. Стимулирование экономического роста через поддержку формирующихся цепочек импортозамещения;

4. Содействие созданию кредитных и лизинговых институтов, направленных на поддержку экспорта и освоение новых сегментов внутреннего рынка;

5. Обеспечение прозрачности процедур кредитования со стороны органов государственной власти субъекта РФ, их конкурсный или аукционный характер;

6. Модернизация производственных звеньев и отдельных технологий;

7. Усиление технического контроля и внедрение современных систем качества, сертификации продукции;

8. Развитие технологий двойного назначения, включая технологии получения новых материалов, информационные технологии, высокопроизводительное промышленное оборудование, оборудование для защиты окружающей среды и др. [4].

В заключение необходимо отметить, что необходимо осуществление и реализация направления создания благоприятных и целенаправленных мотивирующих условий деятельности предприятий как самостоятельных рыночных субъектов (включая правила разрешения хозяйственных споров, процедуры поглощений, санации и т.п.). Причем от эффективности реализации промышленной политики как на макро-, так и на микроуровне, зависит не только развитие конкуренции, появление новых и повышение эффективности деятельности и, в конечном итоге, – прибыли действующих промышленных и производственных предприятий, но и решение важной задачи для государственного управления на всех уровнях управления, особенно в кризисный период – это увеличение объемов финансовых поступлений в бюджеты всех уровней.

Вследствие чего существует объективная необходимость и потребность в совершенствовании методов стратегического и тактического регулирования развития промышленных и производственных предприятий в процессе системной активизации промышленной политики государства, предполагающей эффективное взаимодействие органов государственной власти с субъектами хозяйственной деятельности промышленного и производственного комплекса.

Библиографический список

1. Глазьев, С.Ю. Возможности и ограничения технико-экономического развития России в условиях структурных изменений в мировой экономике / <http://spkurdyumov.ru/economy/vozmozhnosti-i-ogranicheniya-techniko-ekonomicheskogo-razvitiya/>
2. Глазьев, С.Ю. Об освоении 6-го технологического уклада / <http://www.youtube.com/watch?v=TEul3UN80xw>
3. Гусев, А.А. Проблема формирования адаптивных систем управления в условиях перехода к шестому технологическому укладу // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2 (18). С. 94–103.
4. Давыдова, Н.С. Промышленная политика на региональном уровне: цели, задачи и направления развития / Н.С. Давыдова, Е.В. Валова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Экономика и финансы. 2004. Вып. 2(6).
5. Делия, В.П. Технологический уклад инновационной экономики / Актуальные вопросы развития современного общества // Материалы Международной научно-практической конференции: в 2 т. 2011. С. 143–145.
6. Крюкова, Т.М. Совершенствование системы оценки эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий в современных условиях: автореферат дисс. ... канд. эконом. наук: 08.00.05 / Крюкова Тамара Михайловна. – Нижний Новгород, 2009. – 24 с.
7. Селиванов, С.Г. Методы и модели управления сменой технологических укладов в системе научно-технологической подготовки производства / С.Г. Селиванов, О.Ю. Панышина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2010. Т. 14. № 1 (36). С. 74–79.
8. Сытник, А.А. Технологические изменения как результат смены технологических укладов // Проблемы современной экономики (Новосибирск). 2011. № 3–1. С. 338–340.
9. Сафина, А.А. Критерии эффективности развития производственно-технологических цепочек нового технологического уклада // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2012. № 4. С. 34–38.
10. Федотова, А.Ю. Промышленные кластеры и переход к новому технологическому укладу: исторический аспект и перспективные тенденции // Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 23. № 4-2 (23). С. 45.

*Дата поступления
в редакцию 04.06.2015*

Т.М. Kryukova

TECHNOLOGICAL STRUCTURES AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF SOCIAL PRODUCTION AND INNOVATION THROUGH THE IMPLEMENTATION OF INDUSTRIAL POLICY IN THE CURRENT ECONOMIC CONDITIONS AND MANAGEMENT

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

The authors consider the solution of the problem of the accelerated transition of Russian economy to the sixth technological structure. This paper analyzes the most typical problems that have a negative impact on the process of change orders, which are also common to industrial complexes of the Russian economy. The role of industrial policy to address this set of problems. Presents General characteristics of the technological structure, the urgency of accelerating the transition and implementation of industrial policy. The practical application is to develop proposals for wider application and implementation of industrial policy at all levels of government.

Key words: technological structure; innovation; industrial policy; manufacturing; mechanical; competitiveness.

УДК 338

К.И. Колесов, К.А. Ганкевич, А.Ф. Плеханова, А.А. Иванов, А.Г. Каракушьян**ОБ АКТУАЛЬНОСТИ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕКТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Изучение функционирования протяженных замкнутых объектов (ПЗО) и обоснование актуальности их своевременной диагностики технического состояния.

Методология: Сбор информации и выявление основных причин возникновения аварий на магистральных газопроводах.

Результаты и область их применения. Результатом исследования является систематизация причин и факторов возникновения аварий на газопроводах. Обоснована необходимость планового проведения технического диагностирования состояния газопровода.

Выводы. Оценка и мониторинг технического состояния газопроводов и поддержания работоспособности должна производиться на постоянной основе для снижения рисков возникновения аварий.

Ключевые слова: авария, диагностика, протяженный замкнутый объект (ПЗО), газопровод, единая система газоснабжения.

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) является основной составляющей экономики РФ. Большую часть доходов бюджета РФ составляют поступления от этой отрасли. Общий объем доходов бюджета в 2014 году вырос на 668,2 млрд руб. (1,4% к ВВП прошлого года) до 14 трлн 238,8 млрд руб. (19,9% к ВВП) за счет увеличения доходов нефтегазовой отрасли. Доходы данной отрасли выросли на 952,1 млрд руб.

На территории России сосредоточена приблизительно треть мировых запасов природного газа (47 600 млрд. куб. м). Газовая отрасль РФ включает в себя предприятия, которые осуществляют геологоразведочные работы, бурение разведочных и эксплуатационных скважин, добычу, транспортировку и хранение газа.

В России действует Единая система газоснабжения (ЕСГ), которая включает в себя разрабатываемые месторождения, сеть газопроводов и компрессорных установок, подземных газохранилищ и т.д. Единая система газоснабжения Российской Федерации является самой протяженной газотранспортной системой в мире. За последнее десятилетие значительно возросла потребность населения в природном газе. В связи с этим сети подземных газопроводов как внутри субъектов, так и межрегиональные, постоянно растут и усложняются. Кроме того, цели государства в области увеличения экспорта ресурсов с помощью трубопроводного транспорта в дальнейшем приведут к строительству новых протяженных замкнутых объектов (ПЗО) и увеличению нагрузки на старые.

Трубопроводы - единственный способ для передачи больших масс газа. Трубопровод - инженерное сооружение (ПЗО), которое предназначено для транспортировки различных сред, а именно: газообразных и жидких веществ, пылевидных и разжиженных масс, а также твердого топлива и иных твердых веществ в виде раствора под воздействием разницы давлений в поперечных сечениях трубы.

Классификация трубопроводов

Технические трубопроводы можно классифицировать в зависимости от уровня прокладки, в зависимости от транспортируемой среды, а также в зависимости от назначения (рис. 1–3).



Рис. 1. Классификация трубопроводов в зависимости от уровня прокладки



Рис. 2. Классификация трубопроводов в зависимости от транспортируемой среды



Рис. 3. Классификация трубопроводов в зависимости от назначения

Общая протяженность магистральных трубопроводов России составляет 217 тыс. км, в том числе газопроводных магистралей (включая газоконденсатопроводы) - 151 тыс. км, нефтепроводных - 48 тыс. км, нефтепродуктопроводных - 19 3 тыс. км.

ПЗО, в частности газопроводы, являются источниками повышенной опасности, как при эксплуатации, так и при производстве строительных или ремонтных работ. В системе обеспечения безопасности трубопроводного транспорта самую большую сложность представляют пересечения газопроводами и нефтепроводами рек, каналов, озёр и водохранилищ.

Значительная часть подводных переходов построена траншейным способом непосредственно в руслах рек и в водоёмах. Самому методу присущ ряд недостатков, которые снижают уровень долговременной надёжности подводных переходов. Зоны подводных переходов являются постоянными зонами риска. Аварии на подводных переходах наносят огромный экономический ущерб, а ликвидация аварий очень трудоёмкий, дорогостоящий и долговременный процесс, если сравнить с сухопутной линейной частью.

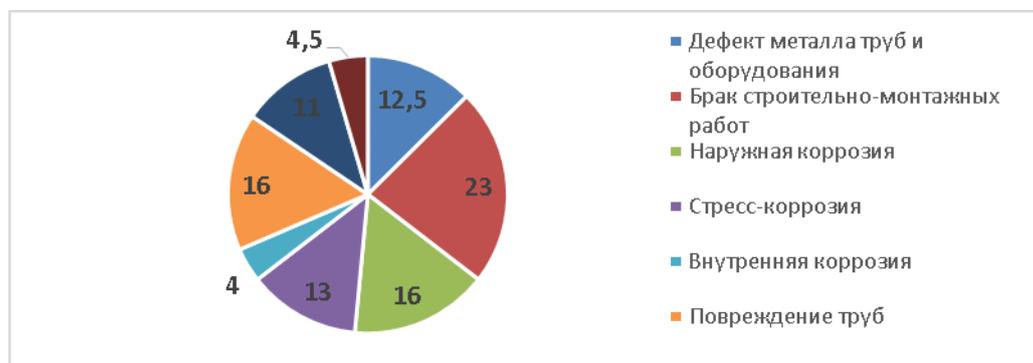


Рис. 4. Основные причины возникновения аварий на ПЗО, %

Для безопасной работы подводных переходов трубопроводов необходимо применять самые инновационные и современные технические средства на этапах изысканий для проектирования, строительства и последующей диагностики. Основные причины возникновения аварий на ПЗО в процентном соотношении представлены на рис. 4.

Основными факторами и причинами, которые могут способствовать возникновению аварийных разрывов газопроводов, являются: рост исходных дефектов в процессе эксплуатации, которые не были выявлены в процессе испытаний при вводе в эксплуатацию; развитие коррозии и дефектов; механические повреждения труб техникой; некачественное проведение диагностических работ или их отсутствие.

Для того чтобы по возможности снизить риск возникновения аварийных ситуаций и поддержания единой системы газоснабжения России в работоспособном состоянии, необходимо на постоянной основе проводить комплекс мероприятий по предупреждению и снижению аварийности на магистральных газопроводах. Повреждения газопровода высокого давления могут привести к взрыву, к жертвам среди людей, к материальным потерям и прекращению газоснабжения потребителей. Утечка газа или иного продукта из подземного трубопровода может нанести ущерб окружающей среде, а также может стать причиной прекращения газоснабжения.

Экономические потери при авариях на газопроводах:

- Приблизительные затраты на ликвидацию последствий каждого аварийного случая в условиях современного города составляют от 0,3 до 10 млн руб.;
- Общий ущерб от утечек по РФ оценивается около 90 млрд руб. в год.

Таблица 1

Пример статистики по авариям на газопроводах в России (2010–2014)

Год	Аварии	Последствия
1	2	3
2010 год	Взрыв газа на трубопроводе (месторождение Ханчейское, Ямало-Ненецкий автономный округ)	Разрушение: взрыв производственного блока. Пострадало: 13 человек. Погибло: 1 человек
	Взрыв сжатого воздуха во время опрессовки газоотвода (Дмитровское шоссе, Москвы)	Госпитализировано: трое человек с различными степенями тяжести. Погибло: 1 челове.
2011 год	Провыв пожара на ответвлении газопровода Калуга – Белоусово (г. Малоярославец, Калужской области)	В результате аварии никто не пострадал.
	Возгорание остатков газа в трубе (ул. Гагарина, г. Ярославль)	Пострадало: водитель сгоревшего автомобиля Загорелась строительная техника – машина «УАЗ» и экскаватор
	Взрыв газопровода на территории компрессорной станции "Байдарацкая" системы магистральных газопроводов "Бованенково-Ухта (Ямальский район)	Пострадало: 11 человек. 1 пострадавший скончался
2012 год	Взрыв магистрального газопровода в Федоровском районе, Саратовской области	Возникновение пожара на месте взрыва. Жертв и пострадавших нет
	Пожар на участке магистрального газопровода Моздок-Казимагомед в Кизилюртовском районе республики Дагестан.	Прекращение газоснабжения города Кизилюрт и Хасавюрт. Жертв и пострадавших нет.
	Взрыв при проведении работ по опрессовке труб газопровода произошел взрыв (г. Москва, 89-й километр МКАД).	Погибло: 3 человека
	Взрыв на подземном газопроводе высокого давления (г. Ижевск).	Прекращение газоснабжения в двух городах с населением приблизительно 110 тыс. чел.
	Авария магистрального газопровода высокого давления. Возникновение пожара (Московская область, село Алмазово)	Без газоснабжения остались три населенных пункта – Балашиха, Монино, Черная. Загорелось 10 частных домов

Окончание табл. 1

1	2	3
2013 год	Повреждение подземного полиэтиленового газопровода высокого давления диаметром 110 мм (Алтайский край, г. Барнаул).	Жертв и пострадавших нет. Газоснабжение населения прервано не было
2014 год	Повреждения стального газопровода высокого давления (г. Омск)	Жертв и пострадавших нет

Ремонт протяженных замкнутых объектов (ПЗО) представляет собой сложную, дорогостоящую и трудоемкую задачу. На восстановление и ремонт линейной части трубопровода затрачивается гораздо большее количество финансовых средств и трудовых ресурсов, чем на его строительство. Техническое диагностирование подземных и подводных коммуникаций - один из наиболее сложных и ответственных видов технической диагностики в системах газораспределения и газопотребления. Сложность данного вида работ обусловлена тем, что линейная часть магистрального газопровода часто закрыта от прямого доступа, поэтому применение обычных приборных методов диагностики зачастую оказывается невозможным.

Таким образом, можно сделать вывод об актуальности предупреждения возникновения аварийных ситуаций на ПЗО путем проведения диагностических и плановых ремонтных работ. При этом необходимо разработать такую диагностику, которая не потребует масштабных земляных работ и обеспечит высокий уровень качества.

Библиографический список

1. СНиП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы. – М., 1985.
2. РД 03-418-01 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов утв. Постановлением № 30 Госгортехнадзора России от 10.07.2001. – М., 2001. – 18 с.
3. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора / Б.А. Красных [и др.]. – М.: ООО «Анализ опасностей». 2003. – 320 с.
4. **Иванов, А.А.** Инновационные технологии снижения рисков возникновения аварийных ситуаций (на примере АО «Нижегородский водоканал») / А.А. Иванов [и др.] // Научное обозрение. 2015. №2. С. 357–361.
5. **Кретинин, О.В.** Разработка конструкции робототехнического комплекса для диагностирования протяженных замкнутых объектов малых диаметров в среде Autodesk Inventor с использованием системы автоматизированной оптимизации / О.В. Кретинин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. №5 (107).

Дата поступления
в редакцию 20.06.2015

K.I. Kolesov, K.A. Gankevich, A.F. Plekhanova, A.A Ivanov, A.G. Karakushyan

ABOUT THE RELEVANCE OF TIMELY DIAGNOSIS TECHNICAL STATE EXTENDED CLOSED OBJECTS

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

Objective: The study of the functioning of the extended closed objects (PZO) and the development of timely diagnosis of the relevance of their technical condition.

Methodology: Gathering information and identifying the main causes of accidents on gas pipelines.

Results and their field of application: The result of the study is to systematize the causes and contributing factors of accidents at gas pipelines. The necessity of the planned technical diagnosing the state of the pipeline.

Conclusions: Assessment and monitoring of the technical condition of pipelines and maintenance of performance should be made on an ongoing basis to reduce the risks of accidents.

Key words: accident, diagnostics, extended closed object pipeline, unified system of gas supply.

УДК 30.3

Н.И. Егорова¹, О.И. Митякова²**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ**

Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики
– Нижний Новгород¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Раскрываются теоретические аспекты разработки и введения экологических инноваций. Перечислены преимущества от их внедрения и барьеры, с которыми сталкиваются организации, работающие в данной области, описаны различные подходы к классификации экологических инноваций.

Ключевые слова: устойчивое развитие экономики, экосистема, экологические инновации, ресурсосбережение, экопродукт.

На ранних стадиях развития современного общества вмешательство человека в природу носило несистемный, локальный характер, не сопровождавшийся, как правило, разрушением природных комплексов на сколь-нибудь обширной территории. Это объясняет позицию многих представителей экономической мысли, которые использовали предпосылку о неисчерпаемости природных ресурсов. Так, XVIII–XIX вв. многие экономисты утверждали, что природные богатства неисчерпаемы, всем доступны, и поэтому не являются объектом экономических отношений [1].

В ходе промышленного прогресса стремительно возрастает интенсивное использование природных ресурсов, когда в производство широко вовлекаются возобновляемые и невозобновляемые ресурсы. Постепенно в обществе созревает идея о необходимости сохранения естественных природных комплексов для рекреации, охраны зверей, научных исследований. Меняются и позиции некоторых экономистов, которые начинают говорить об экологической ответственности общества перед будущими поколениями.

Начало XX века ознаменовано формированием учения о биосфере и ее трансформации под влиянием деятельности человека, появляются работы, в которых отражается осознание глобальности экологических катастроф. В начале 70-х годов XX в. был проведен прогноз основных тенденций развития цивилизации, согласно которому сырьевые ресурсы планеты окажутся исчерпанными, нехватка продовольствия станет катастрофической.

Согласно различным конференциям Организации Объединенных Наций, концепция устойчивого развития экономики предполагает сбалансированное взаимодействие трех составляющих: экономической, социальной и экологической, направленное на достижение устойчивого развития системы за счет синергетического эффекта. При этом основной задачей экологической составляющей в рамках данной концепции является обеспечение нормального функционирования любой экосистемы [1, 2].

Под экосистемой, согласно определению Ю. Одум, следует понимать объединение жизни и окружающей среды, которое характеризуется определенной стабильностью и обладает четко функционирующим внутренним круговоротом веществ [3]. В концепции устойчивого развития экономики экологическая составляющая является неотъемлемым элементом, который в совокупности с экономической составляющей должен решать вопросы стоимостной оценки воздействия производства на окружающую среду и усилий, направленных на ее защиту. Возрастающая роль экологического компонента обусловлена тем, что в начале XXI в. наблюдается тенденция возрастания уровня ответственности в вопросах, затрагивающих сферу экологии. Вопросы защиты окружающей среды и снижения отрицательного воз-

действия на нее актуальны для государственных органов, коммерческих организации и различных групп населения. Киотский протокол, принятый в 1997 г. в определенной степени стал первой попыткой мирового сообщества в глобальном масштабе включить экосистемные услуги, платежи за них и компенсацию отдельным странам в международные и страновые экономические механизмы для борьбы с изменением климата [4]. В настоящее время Организация Экономического Сотрудничества и Развития совместно с ООН активно изучает направление «зеленого» роста и «зеленой» экономики, подходы к статистическому измерению «зеленой» составляющей экономики с применением принципа затраты-результат (OECD, 2011). С каждым годом растет количество исследований, целью которых является изучение экономической природы инноваций, возникающих в рамках реализации бизнес-моделей и стратегий развития организации не только в рамках производственной или хозяйственной деятельности. Создание «зелёной» экономики соответствует государственному направлению развития как развитых стран, членов ОЭСР, Германии, Японии, Швеции, так и активно развивающихся государств, например, Китая и стран, богатых природными ресурсами, например, ОЭА и Бразилии. Окружающая среда, ее состояние и качество в настоящее время становятся в какой-то степени экономической категорией.

Исследователи и практики рассматривают инновации как результат долгосрочных проектов, включающих в себя этапы исследования и апробации. Технологические инновации имеют большое значение для коммерческих организаций, при этом, что касается фундаментальных научных идей, то лишь немногие из них успешно реализуются и коммерциализируются, что открывает возможность для дальнейшей работы в этом направлении.

В современной науке тема инноваций находит отражение в области природопользования и ресурсосбережения, и, как следствие, появляется понятие экоинноваций.

В зарубежных библиографических источниках встречаются различные термины, описывающие данное понятие: экоинновации (ecoinnovations), «чистые» технологии (cleantech), «зеленые» технологии (green technologies). Все эти термины включают в себя широкий спектр нововведений, объединенных одним общим признаком: их применение должно одновременно формировать положительный экономический и экологический эффекты. К экологическим технологиям (экотехнологиям) относятся: технологии, направленные на повышение энергоэффективности, оптимизации переработки отходов, разработки в сфере возобновляемой энергетики, «зелёного» строительства, экологического транспорта, управление ресурсами и отходами, рециклинг материалов; природосберегающие методы строительства и строительные материалы (создание экодевелопмента, включая специализированное машиностроение, формирование рынка экологичной продукции и экологических услуг); альтернативный транспорт, логистику.

В литературе существует несколько определений экологических инноваций.

Организация экономического сотрудничества и развития определяет экологические инновации как любые инновации, которые приводят к снижению воздействия на окружающую среду. Экологические инновации могут быть в форме технологий, продуктов или услуг. Одной из главных задач использования инноваций подобного рода является снижение рисков, сопряженных с окружающей средой, и минимизация загрязнения окружающей среды в результате производственной деятельности.

Иное определение экоинноваций формулируется следующим образом: экоинновации – создание новых и конкурентных по цене товаров, процессов и систем, которые удовлетворяют потребности людей с минимальным использованием природных ресурсов и минимальными выбросами ядовитых веществ [5].

Проводя параллель с идеей инноваций в организации, где они рассматриваются как результат целенаправленных объединенных усилий нескольких субъектов, экологические инновации можно интерпретировать как производный вид инноваций (как правило, технологического характера), возникающий на базе основных четырех типов, характерных для организаций.

Экоинновации, как и любые инновации, по своей природе являются чем-то новым (продуктом, услугой, бизнес-процессом и т.д.) и в результате внедрения должны привести к увеличению рыночной стоимости организации, созданию дополнительной ценности, при этом снизить отрицательное воздействие на окружающую среду.

К экоинновациям следует относить всякий новый продукт или процесс, представляющий определенную потребительскую и экономическую ценность, но при этом существенно уменьшающий отрицательное воздействие на окружающую среду по сравнению с уже существующими альтернативами [6].

К. Реннингс и Ч. Цвик выделили пять стимулов к созданию экоинноваций [7]:

- регулирование,
- возрастающий спрос со стороны потребителей;
- завоевание новых рынков;
- снижение затрат;
- формирование положительного имиджа.

Процесс разработки и внедрения экоинноваций является в достаточной степени сложным, так как существует ряд барьеров, тормозящих его:

1) экономические барьеры (рыночные цены, которые полностью не отражают издержки производства продукта или услуг, например, затраты на здравоохранение из-за загрязнения воздуха в городах; увеличение затрат на инвестиции в природоохранные технологии из-за их предполагаемого риска; размер первоначальных инвестиций; сложность перехода от традиционных технологий к экологическим);

2) отсутствие нормативно-правовой базы, регулирующей взаимоотношения в сфере экоинноваций;

3) недостаточная проработанность темы на теоретическом уровне, отсутствие четко сформулированной методологической базы, малое количество исследований в данной области;

4) недостаточная проработанность инструментов оценки рисков и доходности от внедрения экоинноваций;

5) низкий уровень спроса на экоинновации со стороны государственного сектора и потребителей.

Эшфорд разработал более подробный список барьеров внедрения экоинноваций, классифицировав их по следующим категориям [8]:

1. Технологические барьеры (несоответствие технологии заданным экономическим требованиям и технологическим нормам проектирования, отсутствие альтернативных материалов, способных заменить опасные компоненты, высокий уровень сложности при разработке технологий снижения уровня загрязнения окружающей среды, низкий уровень инвестиционной активности по причине отсутствия инструментов оценки доходности вложений в экоинновации);

2. Финансовые барьеры (высокий уровень затрат на исследования в области экотехнологий, расходы, связанные с риском изменений предпочтений потребителей в отношении экопродуктов, отсутствие методов, позволяющих всесторонне проанализировать соотношение затрат и выгод от разработки и внедрения экоинноваций, трудности при прогнозировании затрат, отсутствие гибкости капиталовложений из-за низкой рентабельности, неэффективность инвестиций в процесс модификации для компаний, которые давно существуют на рынке);

3. Барьеры, связанные с трудовыми ресурсами (недостаток высококвалифицированных кадров в области управления, контроля и реализации экоинноваций, нежелание компаний вкладывать средства в подготовку кадров, возросшие требования к контролю за внедрением экоинноваций);

4. Нормативные барьеры (неопределенность в вопросах экологического регулирования в будущем);

5. Барьеры, связанные с потребительским поведением (устойчивая ассоциация экоин-

новаций с продуктами технического назначения, риск потери клиентов при внесении изменений в продукт и его составляющие);

6. Барьеры, связанные с созданием цепи поставок (недостаток посредников, способных взять на себя функции по маркетинговой поддержке и продвижению экопродуктов);

7. Барьеры управления (отсутствия опыта взаимодействия технических специалистов со специалистами в области ресурсосбережения, экологии и природных ресурсов, нежелание компаний внедрять любые изменения в производственные и управленческие процессы, недостаток опыта в руководстве подобными изменениями).

Все перечисленные трудности при разработке и внедрении экоинноваций связаны между собой, поэтому решение данной проблемы должно быть комплексным.

Исходя из этого, можно говорить о существовании пересечения и расхождения в подходах к вопросу разработки и внедрения экоинноваций, а также характера и эффекта их воздействия на функционирование экономической системы какого-либо уровня.

А. Арандел и Р. Кемп в своих работах приводят несколько возможных классификаций экоинноваций. В основе первой классификации лежит цель внедрения новых технологий. Согласно этой классификации, экоинновации подразделяются на четыре группы [9]:

- 1) технологии, направленные на защиту окружающей среды;
- 2) организационные инновации для окружающей среды;
- 3) инновационные продукты и услуги, использование которых приносит выгоду окружающей среде;
- 4) инновации экосистем.

В первую группу попадают такие экоинновации, как технологии борьбы с загрязнением, в том числе водоочистные технологии; технологии, позволяющие нейтрализовать отрицательные воздействия загрязнения окружающей среды; технологии, внедряемые на производстве, например, новые процессы производства, способствующие снижению загрязнений окружающей среды, наиболее эффективное использование производственных ресурсов; технологии и оборудование, оптимизирующие процесс утилизации отходов; технологии и инструменты мониторинга за состоянием окружающей среды; технологии энергосбережения; технологии наблюдения за водообеспеченностью; технологии контроля уровня шума.

Ко второй группе экоинноваций, согласно данной классификации, относятся: меры по предотвращению загрязнения окружающей среды; экологический аудит: система управления, включающая измерение, отчетность и контроль за решением вопросов использования ресурсов, энергии, воды и отходов, например, системы EMAC и ISO 14001; создание цепей управления: взаимодействие организаций с целью снижения отрицательного влияния на окружающую среду и предотвращения экологического ущерба на всей производственной цепочке.

Третья группа экоинноваций включает в себя: новые или экологически улучшенные продукты, например, ЭКОдома и здания; «зеленые» финансовые продукты; услуги в сфере экологии: утилизация твердых и опасных отходов и сточных вод, экологический консалтинг, тестирование и проектирование; услуги, направленные на снижение загрязнения окружающей среды и оптимальное расходование ресурсов.

К четвертой группе авторы относят альтернативные методы производства и привычки потребления, которые являются более экологически безопасными, чем существующие системы: биологическое сельское хозяйство и возобновляемые источники энергии.

Организация экономического сотрудничества и развития в 2001 году разработала свою классификацию экоинноваций по следующим категориям:

- 1) инновации, направленные на борьбу с загрязнением окружающей среды (технологии по контролю за загрязнением воздуха, удаление и очистка сточных вод, утилизация твердых отходов, работы по восстановлению почвы и очистке воды, борьба с шумом, экологический мониторинг, анализ и оценка);
- 2) «чистые» технологии и продукты (технологии ресурсосбережения и ресурсосберегающие продукты);

3) управление ресурсами (контроль за загрязнением воздуха в помещениях, водообеспеченность, вторичное использование материалов, возобновляемые источники энергии, технологии тепло- и энергосбережения, экологически рациональное сельское хозяйство и рыболовство, экологически рациональное лесопользование, управление экологическими рисками, эко-туризм).

Разработка экоиноваций, как и иных инновационных технологий, должна способствовать повышению эффективности производства, предотвращению негативного воздействия на окружающую среду и достижению экологической безопасности, под которой понимается одна из составляющих национальной безопасности, совокупность природных, социальных, технических и других условий, обеспечивающих качество жизни и безопасность жизни и деятельности проживающего на данной территории населения (Экологическая доктрина РФ, 2002) приобретает важное значение. В соответствии с рекомендациями Евростата по сбору и анализу данных по инновациям в государственной статистике инноваций по Российской Федерации, начиная с 2009 г., ведется отдельный учет экологических инноваций [10].

Ожидаемый положительный экологический эффект является основной причиной разработки и внедрения экоиноваций. Однако с точки зрения организаций, которые сталкиваются с ростом затрат на производство товаров и вынужденные решать вопросы снижения отрицательного влияния на окружающую среду и переработки отходов, их конкурентоспособность, все в большей степени обуславливается способностью внедрять экоиновации. Преимущества от внедрения экоиноваций для производственных организаций могут быть вполне очевидны, например, с помощью экоиноваций можно решить вопрос утилизации тяжелых металлов в целях сокращения расходов. Тем не менее, до недавнего времени вопросам, затрагивающим производство и торговлю экопродуктами в процессе глобализации, уделялось недостаточно внимания.

Основными преимуществами внедрения и отслеживание экоиноваций могут быть [9]:

- расчет и прогнозирование деятельности организаций в области экоиноваций, поведения потребителей, а также развитие «чистого» производства;
- идентификация катализаторов и барьеров создания и внедрения экоиноваций, необходимых при разработке эффективной налоговой и торговой политики;
- повышение уровня информированности об экологических инновациях среди заинтересованных сторон и поощрение компаний к экоиновационной деятельности, основанные на анализе выгод для компаний, секторов и экономики;
- оказание помощи обществу, чтобы разорвать связь между экономическим ростом и загрязнением окружающей среды;
- создание потребности в экологических продуктах и стиле жизни.

Вкладывая в инновации целесообразно в первую очередь в инфраструктурные проекты, дающие мультипликативный эффект для экономики (стоимость произведенных товаров значительно превышает инвестиции, а значит, инфляция сокращается). Развитие инфраструктуры является также одним из приоритетов инновационного развития [11].

С точки зрения территориального развития, существующие подходы и стратегии в сфере маркетинга территории, применяемые в российских регионах, не учитывают инновационную составляющую, в частности, работы в области экоиноваций, как конкурентное преимущество, на основе которого можно построить стратегию развития. При этом поддержка и развитие экологических технологий может стать основой стратегии развития определенной территории, повысить ее конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность. На данный момент существует четыре группы стратегий маркетинга региона, направленных на создание благоприятного климата территории и привлечение инвестиций [12]. Внедрение экологических инноваций соответствует стратегии развития территории, которая называется «маркетинг инфраструктуры». Суть данной стратегии заключается в увеличении степени цивилизованности рыночных отношений на выбранной территории. Основ-

ная задача, которая ставится при этом, – развивать инфраструктуру территории с целью повышения уровня и качества жизнедеятельности. Для жителей города важным представляется качество жилья, стоимость и качество коммунальных услуг, комфортность городской среды. С точки зрения туристов основными критериями выбора территории являются историческая значимость территории, доступность объектов исторического наследия, а также следующие составляющие инфраструктуры: виды транспорта, близость транспортных развязок, наличие мест общественного питания, наличие гостиниц для людей с разным уровнем доходов центра города.

В случае, когда речь идет о разработке и внедрении экоинноваций, важным является такой критерий, как обеспечение не только экономического, но и устойчивого социально-экономико-экологического развития. В настоящее время можно говорить об отсутствии универсального инструментария, позволяющего исследовать инновационные процессы, которые обладают различным природоохранным эффектом и уменьшают негативное воздействие на окружающую среду, в рамках различных систем. Важным аспектом является соединение теоретического подхода к методике разработки экоинноваций и оценки эффективности их применения с инструментами, применяемыми на практике для измерения инновационной деятельности на уровне организаций, территориальных субъектов и других экономических систем.

За рубежом существуют исследовательские центры, которые занимаются этой проблематикой, например, EU Ecoinnovation Observatory, университетские структуры, такие как Center for Innovation, Research and Competence in the Learning Economy и International Institute of Industrial Environmental Economics at Lund University.

Важно отметить, что, как и любые нововведения, экоинновации требуют системного подхода к управлению ими, который должен заключаться в комплексности, единстве организационного, экономико-экологического регулирования процессов создания и распространения инноваций на всех уровнях.

Экоинновации направлены на развитие способности предприятий и потребителей к их созданию – поиску новых путей и технологий для сокращения загрязнений и их последствий, что может существенным образом сократить расходы на проведение политики в области окружающей среды в будущем.

Разработка и внедрение экоинноваций может быть мотивирована экономическими или экологическими соображениями. Экоинновации нацелены на решение задач по снижению потребления ресурсов, контроль за загрязнением окружающей среды, производство экопродуктов, снижение затрат на устранение отрицательного воздействия производственной деятельности.

Библиографический список

1. **Митякова, О.И.** Проблемы устойчивого развития экономики России на основе инновационных преобразований / О. И. Митякова; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 244.
2. Доклад Всемирного экономического форума *Redesigning Business Value & A Roadmap to Sustainable Consumption*, 2009.
3. **Одум, Ю.** Экология / Ю. Одум. – М.: Мир, 1986. Т. 1. – 328 с.; Т. 2. – 376 с.
4. **Бобылев, С.Н.** Экономика устойчивого развития / С.Н. Бобылев, Э.В. Гирусов, Р.А. Перелет. – М.: Ступени, 2004.
5. **Sarkar, A.** Promoting Ecoinnovations to Leverage Sustainable Development of Ecoindustry and Green Growth // *European Journal of Sustainable Development*, Rome, 2013. V. 2. №. 1.
6. **James, P.** The Sustainability Circle: a new tool for product development and design // *Journal of Sustainable Product Design*, 1997.
7. **Rennings, K.** Employment Impacts of Cleaner Production / K. Rennings, Th. Zwick. – Heidelberg, New York: Physika-Verlag, 2002.

8. **Ashford, N.** Understanding Technological Responses of Industrial Firms to Environmental Problems: Implications for Government Policy, Environmental strategies for industry: International perspectives on research needs and policy implications, Island Press, Washington, DC, 1993.
9. **Arundel, A.** Measuring eco-innovation. - Working paper series / A. Arundel, R. Kemp // United Nations University, UNU-MERIT. 2009. № 017.
10. www.gks.ru
11. **Ленковец, О.М.** Экодевелопмент и экоиновации на рынке недвижимости // Проблемы современной экономики. 2013. №3.
12. **Панкрухин, А.П.** Маркетинг: учебник / А.П. Панкрухин. – 4-е изд. – М.: Омега – Л, 2006.

*Дата поступления
в редакцию 20.06.2015*

N. I. Egorova¹, O. I. Mityakova²

ENVIRONMENTAL INNOVATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Higher School of Economics National Research university¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

This paper presents the theoretical aspects of the development and implementation of environmental innovation. Lists the advantages of their implementation and the barriers faced by organizations working in this area describes the different approaches to the classification of ecological innovations.

Key words: sustainable development of economy, ecosystem, ecoinnovation, resource-saving, ecoproduct.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 387.4

А.Е. Смирницкий

РЕФОРМЫ ДЭН СЯОПИНА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ИСТОРИОГРАФИИ ПЕРИОДА «ПЕРЕСТРОЙКИ»: ПРОБЛЕМЫ СОЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

Анализируется научная и научно-популярная литература о Китае периода 1970–1980-х гг. и о ее влиянии на советское общественное сознание. Опыт китайских реформ рассматривается как недостаточно востребованный в ходе постсоветских преобразований, выявляется сфера его возможного применения для анализа перспектив социального развития.

Ключевые слова: Китай, реформы, советский народ.

С началом перестроечных процессов в СССР у советских людей возрос интерес к китайским реформам. Этот интерес не был праздным. Реформы, проводимые в КНР, оказывали самое непосредственное воздействие на развитие советского общества. В этих условиях советские китаеведы обратились к изучению специфики китайских реформ. Нельзя сказать, чтобы советские исследователи вовсе не обращались к проблемам развития КНР в 1970-1980-е гг. XX в. Однако круг тем был жестко ограничен и предельно политизирован. В основном историки посвящали свои штудии разоблачению гегемонистского курса Мао Цзэдуна на мировой арене и «культурной революции». Как правило, авторами этих работ были советские журналисты и сотрудники аппарата ЦК КПСС. Уровень их компетенции в китайской проблематике соответствовал их статусу. В период «перестройки» все изменилось. В лучших традициях советской исторической науки историки не ограничились написанием научных монографий. Ими были изданы интересные документы, позволяющие понять сущность китайских реформ и научно-популярные работы. Историки-китаеведы не ограничивались академическими изысканиями. Они стремились обратить внимание советского общества на проблемы и противоречия китайских реформ и познакомить советского читателя с китайской повседневностью.

Следует отметить, что такой поворот в изучении новейшей истории Китая был подготовлен задолго до появления первых работ, освещающих опыт китайских реформ. *Во-первых*, в СССР существовала сильная школа китаеведов, работавших в Институте Дальнего Востока АН СССР. *Во-вторых*, в Советском Союзе были высокопрофессиональные журналисты-международники, среди которых было немало китаистов. Их статьи регулярно печатались в журналах «Азия и Африка сегодня», «Эхо планеты», «Новое время» и др. Сложность и запутанность общественных отношений Востока предохраняли китаистов от чрезмерной назойливости советской цензуры. Как отмечал известный советский журналист В. Овчинников, «чтобы писать о чем-либо надо знать о данном предмете на порядок больше, чем потенциальные читатели. Когда я осознал это, именно моя компетентность стала тем коконом, который защищал меня от цензуры в советские времена. Как газетные, так и телевизионные начальники чувствовали, что я знаю о Китае и Японии гораздо больше их. И не решались делать мне замечания и давать указания, дабы не попасть впросак» [1, с. 429].

Из документов, посвященных китайским реформам, следует выделить «Избранные произведения Дэн Сяопина», благодаря чему читатель, хотя и в сильно урезанной форме, познакомился с взглядами патриарха китайских реформ на проблемы социально-экономического развития КНР. Прежде всего обращает внимание отход от того примитивного эгалитаризма, который был характерен для партийных руководителей периода «культурной революции». «Мы выступаем за то, чтобы часть районов становилась зажиточной раньше других именно для того, чтобы районы, первые пришедшие к зажиточности, помогали отсталым районам в деле их лучшего развития. По той же самой причине мы стоим за то, чтобы часть людей раньше других переходила к зажиточной жизни, чтобы та часть людей, которая уже стала зажиточной помогала остальным идти к зажиточной жизни» [2, с.129]. В то же время Дэн Сяопин выступал за ограничение демократии, причем ее патриарх китайских реформ умело связывает с недоброй памятью «культурной революцией», чтобы укрепить положение КПК в обществе и дискредитировать идеи либерализма, ставшие популярными в кругах китайской интеллигенции и части партийного аппарата. «В 1980 г. ВСНП принял решение об отмене «широкого высказывания мнений, широкого изложения взглядов, широких дискуссий и широкого вывешивания дацзыбао». Поклонники же западной «демократии» так или иначе стараются возродить эти «четыре широко». Наученный горьким опытом десятилетней «культурной революцией», Китай не может возвращаться к старой практике» [2, с.143].

На наш взгляд, именно такая позиция обеспечила успех «линии Дэн Сяопина» в проведении китайских реформ и поддержку ее большинством китайского общества. В то время как М.С. Горбачев и его окружение апеллировали при проведении своих реформ к идеалам Октябрьской революции, Дэн Сяопин всячески стремился создать у населения КНР негативный образ «культурной революции». Это принесло успех не только в экономике, но и в политике. Учитывая позицию Дэн Сяопина, можно понять, почему потерпели поражение выступления на площади Тяньаньмэнь в 1989 году. Усилиями Дэн Сяопина этим манифестации расценивались значительной частью населения страны как продолжение пресловутой «культурной революции», а их организаторы, как продолжатели дела хунвэйбинов, хотя демонстранты 1989 года выступали под диаметрально противоположными лозунгами. Население КНР очень хорошо помнило «культурную революцию» и не желало ее повторять.

В то же время Дэн Сяопин предстает перед нами как весьма прагматичный политик. Он видит трудности на пути реформ и честно предупреждает о них сограждан. В то время как в СССР периода «перестройки» любое проявление власти рассматривается как «покушение на свободу» и «рецидив сталинизма». Дэн Сяопин призывает беспощадно расправляться с нарушителями социалистической законности. «Когда руководство занимает решительную позицию, тогда волнения прекращаются» [2, с. 200]. Следует отметить, что эти различия дают ключ к пониманию успеха китайских реформ. Наряду с избранными произведениями патриарха китайских реформ был издан сборник законодательных актов КНР под редакцией известного специалиста по законодательству КНР профессора, доктора юридических наук Л.Н. Гудошникова. Многие законы, опубликованные в этом сборнике, носят экспериментальный характер и распространяются на одну или несколько провинций. Законы, помещенные в сборнике, посвящены различным аспектам экономической деятельности в КНР. Особое внимание уделялось работе совместных предприятий, причем их деятельность поощрялась, прежде всего, в технологически передовых отраслях экономики [3, с.292]. Эта практика резко отличалась от безудержного масштабного экспериментирования, свойственного советской «перестройке».

Среди работ, посвященных Китаю второй половины 1980-х гг., особенно выделяется книга, написанная учениками Л.П. Делюсина А.Д. Дикаревым и А.В.Лукиным «Три путешествия по Китаю». Книга представляет собой научно-популярную работу страноведческого характера. Такого рода работы выходили в СССР и ранее и пользовались большой популярностью у советских читателей, так как писались в основном людьми, долгое время работав-

шими за рубежом и, как правило, очень хорошо знающими страну пребывания. Однако данная работа носила во многом знаковый характер: впервые после разрыва советско-китайских отношений в начале 1960-х гг. два молодых советских ученых, представители «советского ревизионизма» в оценке маоистской пропаганды, посетили различные районы КНР. Авторам удалось показать различные аспекты китайской повседневности середины 1980-х гг. Они не ограничились анализом политической обстановки в стране в постмаоистском Китае, а уделили внимание социально-экономическому и культурному развитию китайского общества. Для советского руководства и рядовых советских граждан кануна «перестройки» эта книга была своего рода предостережением о том, какие трудности ждут СССР на пути к реформам. Во многих чертах китайской действительности того времени мы без труда узнаем более поздние реалии нашей жизни.

Так, по наблюдениям авторов, реформы Дэн Сяопина способствовали коммерциализации китайского общества от партийных работников до рядовых китайцев. Этот процесс сопровождался эрозией коммунистических идеалов, в том числе и на бытовом уровне. Так, китайские граждане, особенно южных провинций, в повседневном общении предпочитали обращение «господин» традиционному обращению «товарищ» («тунчжи»). Девальвация коммунистических идеалов сопровождалась ростом националистических великоханьских настроений. Так, находясь в Тибете, авторы были свидетелями того, как этнические китайцы глумились над обычаями местного населения [4, с. 210]. В то же время авторы обратили внимание на стремление китайской молодежи 1980-х гг. к познанию западной культуры. Характерно, что это стремление у китайцев выражалось не во внешней форме как у значительной части советской молодежи («хиппи», «панки», «рокеры», «стиляги» и др.), а в познании качественной составляющей культуры Запада, что нашло отражение в изучении иностранных европейских языков, которое приняло массовый характер. Как отмечали А.Д. Дикарев и А.В. Лукин, молодые китайцы, узнав, что авторы хорошо знают английский язык, с удовольствием практиковались с ними в разговорном английском [4, с. 65]. Эта тенденция имеет глубокие корни. Еще в начале XX в. немало молодежи из средних слоев общества и в их числе молодой Дэн Сяопин уезжало учиться в страны Западной Европы.

Особое место среди публикаций по новейшей истории Китая 1970–1980-х гг. занимали журнальные публикации. Советское руководство и советское общество традиционно уделяли большое внимание проблемам внешней политики. Столь глубокий интерес был обусловлен статусом СССР, как одной из мировых сверхдержав. Интерес советского общества к жизни зарубежных стран нашел отражение в наличии сильной школы журналистов-международников и в существовании множества журналов, в той или иной степени освещавших проблемы международных отношений. Со второй половины 1980-х гг. в разгар советской «перестройки» резко увеличилось количество журнальных публикаций по проблемам китайских реформ. Условно их можно разделить на два вида: 1) публикации, освещающие политическую систему КНР и политические события внутри страны; 2) публикации, освещающие опыт китайских реформ в контексте социально-экономического развития КНР.

Первый вид публикаций носил во многом официальный характер. В 1989 г. М.С. Горбачев посетил КНР с официальным визитом, был подписан ряд важных соглашений, в том числе о выводе советских войск из МНР и о регулировании советско-китайских торговых отношений, в том числе и в приграничной зоне. В этих условиях, советские лидеры и журналисты воздерживались от резких оценок китайской политической системы.

Однако после событий на площади Тяньаньмэнь тональность советских публикаций изменилась. Находясь в рамках политкорректности, советские журналисты все же попытались выяснить влияние этого важного события на политическую жизнь Китая. Многие из них отмечали ужесточение политического режима. Так, в журнале «Эхо планеты» была опубликована заметка о политической кампании, которую китайские официальные лица называли «прополкой сорняков». «С полок книжных магазинов изымается и сжигается политическая литература, попавшая в разряд «идеологически вредной», пропагандирующей бур-

жуазную либерализацию. «Очистительному огню» предаются издания легкого жанра: о приемах борьбы кунг-фу, гаданиях по руке, лицу и звездам и «половых актах со всеми подробностями» [5, с. 37]. Характерно, что еще год назад журнал отмечал иную тенденцию. «Через открытые двери в Китай прибывают кинофильмы, книги, журналы, телепрограммы, эстрада, моды, танцы. В кинотеатрах можно посмотреть и советские фильмы, но еще больше западных. В книжных магазинах можно приобрести американский журнал «Лайф», мемуары Генри Киссинджера, труды западных политологов о Китае, зарубежные детективы. Партийный работник из Сианя разъяснял: «Наш народ достаточно грамотный и умный, чтобы самостоятельно разобраться, – что хорошо, что плохо, где правда, а где ложь» [6, с. 30].

Парадоксальной особенностью политической жизни Китая после событий 1989 г. было возвращение к пропаганде наследия героев «культурной революции», в частности, жизни солдата Лэй Фэна, скромного в быту и беспредельно преданного идеям Мао Цзедуна. В то же время сама эпоха «культурной революции» подвергалась осуждению [7, с. 25]. Это свидетельствует о крайне прагматическом отношении руководства КНР к историческому наследию своей страны в отличие от советского руководства, подвергавшего огульному осуждению целые пласты советской истории.

Гораздо большее внимание советские журналисты-международники уделяли социально-экономическому развитию КНР во второй половине 1980-х гг. Они отмечали несомненный успех реформ Дэн Сяопина. Однако «путь от отсталости к прогрессу оказался значительно сложнее и болезненнее, чем представлялось десять лет назад у истоков реформы. Новые жилые кварталы и углые джонки вместо квартир у набережной Гуйлиня, суперсовременный завод-автомат в Шанхае и впрягшийся в повозку рабочий с бетонными лестничными пролетами на улице Сианя – это реальности Китая» [8, с. 27]. Китайские экономические реформы породили проблемы, с которыми в полной мере столкнулись уже независимые республики, входившие ранее в Советский Союз, но без китайских успехов. Экономические реформы в КНР породили рост социального расслоения в обществе. Традиционным стереотипом стала трактовка событий на площади Тяньаньмэнь как несостоявшейся «бархатной революции». Однако советские журналисты обратили внимание на то, что «когда сотни тысяч студентов и рабочих вышли на улицы, то большинство мелких торговцев поспешили закрыть лавочки и магазины на время «смуты», опасаясь, что гнев пекинцев может перекинуться и против них» [8, с. 30].

Таким образом, не только требования демократизации, но и возмущение людей дороговизной цен на товары повседневного спроса вывело их на улицы в 1989 г. Бытовые зарисовки советских журналистов достаточно красноречивы. «Помню, как в последний день перед отъездом из Чэнду в Пекин китайские коллеги решили показать нам город, а заодно и угостить. Пока официанты колдовали у нашего столика, я заглянул в распахнутое настежь окно и нос к носу столкнулся с мальчишкой лет десяти, одетым в какую-то рванину. С блаженной улыбкой на чумазом лице наслаждался диковинным для него зрелищем, вдыхая ароматы чужого застолья» [9, с. 28]. Экономические реформы сопровождались свертыванием системы социальных льгот, что ударило по наименее защищенным слоям населения. «В погоне за прибылями управляющие предприятиями в ряде случаев не предоставляют или сокращают молодым матерям декретные отпуска, которые по закону даются на полгода. С целью «экономии» на некоторых заводах были закрыты ясли и детские сады. Наиболее тяжелое положение у тех, кто нанят индивидуальными производителями или владельцами частных предприятий. Им приходится работать по 12-15 часов в сутки [10, с. 35]. Теневые стороны китайских реформ не укрылись от советских журналистов, работавших в Китае в 1980-е гг. «Для полноты впечатлений можно зайти в холлы суперсовременных отелей, десятками поднявшихся над старыми кварталами Пекина и других городов страны. Невольно возникает мысль: «Нам бы эдакое...». Но если попытаться в нескольких словах создать характерный образ увиденного нами Китая, то на память приходит довольно типичная картинка: до пояса обнаженный седой старик на улице Чэнду- административного центра провинции Сычуань-

впрягшийся в тяжелую деревянную телегу. А на телеге - десяток фирменных коробок с персональными компьютерами» [8, с. 30]. Серьезным предостережением советским руководителям периода «перестройки», сделавшим ставку на фермеризацию сельского хозяйства, были сообщения о проблемах сельского хозяйства КНР в условиях реформ. Как отмечал советский журналист П. Спирин, «размеры надела резко ограничивают возможности механизации и повышения производительности труда. До сих пор в китайской деревне используются буйвол и соха, а на строительстве ирригационных сооружений – кирка и лопата» [10, с. 22].

Реформы Дэн Сяопина способствовали росту социальной напряженности в обществе, что не укрылось от глаз советских журналистов. «В деревне приходилось видеть такую картину: крестьяне ждут раздачи удобрений у государственного склада, а в нескольких метрах предприимчивый делец продает удобрения с того же склада, только значительно дороже. Потом выручку поделят: часть денег получит кладовщик, подписавший накладную, остальное достанется спекулянту. И такое явление приняло повсеместный характер». Только за 1987 г. произошло свыше 100 тыс. инцидентов, когда возмущенные спекуляцией крестьяне захватывали грузовики с удобрениями, сбивали замки со складов» [11, с. 7]. Коммерциализация китайского общества породила коррупцию, которая остается острейшей проблемой в КНР и до сего дня. «Если взятка в размере 500 юаней в 50-е гг. причислялась к категории серьезных преступлений, то начиная с 1970-х гг. речь зачастую идет о сотнях тысяч юаней» [12, с. 21]. Seriously деформировался и менталитет китайского общества. Известный советский журналист В.В. Овчинников, бывавший в Китае в 1950-е гг. и в начале 1990-х гг., отмечает: «В 50-х гг. любого иностранца уважительно приветствовали словом «сулянь» (советский). Когда романтический дух солидарности и самопожертвования, присущей первой пятилетке, сменился меркантилизмом рыночных отношений, китайцы сильно изменились. Причем не всегда в лучшую сторону. Попав в Пекин в 90-х гг., я был поражен обилием металлических дверей и обилием решеток на окнах. В городе, который не знал замков, участились кражи. И даже уличные торговцы теперь норовят обмануть покупателя трижды: на цене, на весе и на сдаче» [1, с. 40].

Таким образом, в СССР периода «перестройки» тема китайских реформ 1970–1980-х гг. освещалась как историками, так и журналистами. Если первые написали интересные научно-популярные очерки о КНР и публикации исторических источников, то журналисты сконцентрировали свое внимание главным образом на анализе социальной повседневности Китая. Историки и журналисты сумели остаться в рамках академической трактовки китайской действительности и не опуститься до апологетики или шельмования китайского опыта в тот период, когда предельный субъективизм и тенденциозность считались эталоном прогрессивности. В целом, советским китаеведам уже тогда удалось достаточно объективно показать проблемы и противоречия китайских реформ. Тем самым советское общество и руководство СССР имело в своем распоряжении добротный аналитический материал, который мог бы послужить предостережением для чересчур радикальных реформаторов. Однако этот богатый материал не был должным образом использован. Главная причина этого – состояние общественного сознания советского общества тех лет. Основное внимание руководство страны и рядовые граждане уделяли странам Запада. Именно там они искали чудодейственных рецептов экономического процветания. «Мы избрали парадигму свободы», – вещал кумир советской интеллигенции Е.Т. Гайдар. Опыт Китая отвергался ими как «опыт тоталитарного государства». Наиболее радикальные из них предвкушали крушение коммунистического Китая. В итоге советское, а затем и российское общество столкнулось с теми проблемами, о которых писали китаеведы применительно к китайской действительности. После провала либеральных реформ российское общество обратилось к китайскому опыту реформирования, однако той страны, для которой он мог быть востребован, уже не было. Тем не менее, усилия советских китаеведов не пропали даром. Именно они заложили основу полноценного изучения опыта китайских реформ, который будет в той или иной мере востребован республиками бывшего Советского Союза.

Библиографический список

1. **Овчинников, В.В.** Калейдоскоп жизни: экзотические, драматические и комические эпизоды личной судьбы ветерана журналистики / В.В. Овчинников. – М.: АСТ: Восток-Запад, 2007.
2. **Сяопин, Д.** Основные вопросы современного Китая / Д. Сяопин. – М.: Политиздат, 1988.
3. Китайская Народная Республика: Законодательные акты. 1984-1988 / под ред. Л.М. Гудошников. – М.: Прогресс, 1989.
4. **Дикарев, А.Д.** Три путешествия по Китаю / А.Д. Дикарев, А.В. Лукин. – М.: Прогресс, 1989.
5. Эхо планеты. 1989. № 48.
6. **Бажанов, Е.** Окно в Великой стене // Эхо планеты. 1988. №15.
7. **Кириллов, А.** Второе пришествие героев. Эти всемогущие «измы» / А. Кириллов, В. Томилин // Эхо планеты. 1990. №18.
8. **Кривошеев, Г.** Время ожиданий / Г. Кривошеев, Ю. Певнев // Эхо планеты. 1990. № 2.
9. **Кириллов, А.** Добрые люди из Сычуани // Эхо планеты. 1988. № 23.
10. **Спирин, П.** Не стоять на коленях перед «бумажным мужем» // Эхо планеты. 1998. № 10.
11. **Арсланов, Г.** «Гайгэ» – значит реформа // Эхо планеты. 1988. 14-20 мая.
12. **Томилин, В.** «Телефон доверия» по-китайски // Эхо планеты. 1989. №1.

*Дата поступления
в редакцию 04.06.2015*

A.E. Smirnitskiy

**DENG XIAOPING REFORMS IN NATIVE HISTORIOGRAPHY
OF RESTRUCTURING PERIOD: SOCIAL STEERING PROBLEMS**

Nizhniy Novgorod state pedagogical university n. a. K. Minin

The paper deals with analysis of scientific and publicist sources about China within the period of 1970-1980. Its influence on the Soviet public opinion is the main topic under consideration. This experience has not been still accepted, nevertheless, it can be used in the analysis of modern social development.

Key words: China, reforms, soviet people.

УДК 316.001

В.И. Казакова

АРТЕФАКТ КАК КОНЦЕПТ СОВРЕМЕННОЙ СОЦИАЛЬНОЙ НАУКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предметом статьи являются механизмы концептуализации в современной социальной науке понятия «артефакт», под которым понимается материальный объект, созданный человеком и предназначенный для определённой цели. Ключевой детерминантой концепции артефакта в семантическом пространстве социального знания является его пограничная природа, совмещающая в себе характеристики искусственного и естественного, социального и технического, культурного и антропологического. В качестве наиболее значимого аспекта раскрытия данного понятия выявлена его опосредованность вопросами об установлении границ и организованности пространства. Артефакт, будь то феномен техники или культуры, являясь результатом творческой преобразовательной деятельности человека, может быть представлен как конституирующий элемент, связующий в единое целое различные сферы социального пространства.

Ключевые слова: артефакт, граница, пограничное состояние, естественное и искусственное, концепт, концептуализация.

Объектом современной социальной мысли является несостоятельность. Тот или иной пристальный взгляд на изъян не имеет ничего общего с классической проблематизацией нового явления, не согласующегося с известной теорией, или новой идеей, не находящей опоры в известных фактах. Новизна современности скорее тяготит мысль, нежели побуждает её к действию. Вся исследовательская энергия оказывается, в конечном итоге, направленной на абстрактное, трансцендентное, метафизическое, на ту или иную форму отвлечения от реалий и фактов. Мир возможного привлекает внимание несравненно более чем мир действительного: несостоятельность хозяйственных решений объясняется «неэффективностью» культуры [1], тупики инноваций – границами политических идеологий [2], проблематичность развития – бременем зависимости от прошлого [3]. Платоновское переживание неподлинности вещей предстаёт здесь в обезличенной и вырождающейся форме – в мире идей ищется не опора, но оправдание, не основание для включённости человека в реальность, но способ ухода от неё. Несоразмерность объекта контексту мысли, свойственная неклассической социальной науке в целом, в современном российском пространстве отягощена отсутствием преемственности и утратой традиций, едва ли восполнимой на протяжении последних десятилетий [4-7]. Уникальность российской социальной транзиции, в сочетании с редкой несвободой мышления, задаёт преимущественную описательность и явный аксиологический уклон. Предметом рассмотрения через призму этих дескриптивных и ценностных ориентиров оказывается, как правило, невозможность разрешения какой-либо социальной проблемы, которая иногда дополняется невозможностью её сформулировать. Подобный тезис едва ли можно счесть критикой слабости мысли или дефицита познавательной активности: в обществе знания, напротив, открывается всё больше ресурсов и возможностей, но вместе с тем все они наталкиваются на исчерпание естественных путей развития. Знание о вещах становится столь же искусственным, как и сами вещи: область практического применения техники оказывается всё более расплывчатой, духовные устремления культуры вырождаются в цивилизационный регресс.

Мир искусственного во всех его проявлениях отражается столь же неестественными концептуальными построениями: как техника, так и культура оказываются вовлечёнными в круг сложных противоречивых дискурсов, в рамках которых они предстают то как залог прогрессивного развития, то как апокалиптическая тенденция. Творческий преобразовательный потенциал человека, превозносимый культом инноваций и неистовым поиском креативности, есть, по сути, то же созидательное начало, инициирующее техногенные катастрофы и информационные волны. С одной стороны, человек, поставленный перед перспективой пол-

ного отделения от природной среды, испытывает закономерную тревогу и осознание несостоятельности и дисбаланса, с другой – переживает острый дефицит новизны, нестандартности, свободы. Та или иная форма внеприродного, изначально заданный смысл которой – избавление человека от несамодостаточности и проблематичности окружающих обстоятельств [8], в процессе эволюции стремительно обращается в сферу не роста степеней свободы, но осложнения и ограничения путей развития. Определяемое этим обострение проблематизации человеческого существования может быть представлено как некоторый «предел невозможности», достигнутый в отношении со-бытия человека с миром артефактов – результатом своей преобразовательной деятельности [9]. Разочарование в технике, утрата культуры, очевидная неестественность самой цивилизации замыкают человеческую сущность в бесконечной цепи самопреодолений [10]. Понятие «артефакт», попадающее в центр рассмотрения подобных противоречивых дискурсов, в полной мере отражает данный дисбаланс, изначально будучи представлено чрезвычайно широким спектром определений, носящих, в том числе, и негативный характер. Иногда выделяют широкий (философский и культурологический) и узкий (естественнонаучный) уровни осмысления артефакта, замыкающиеся, в конечном итоге, на двойственность его природы, сочетающей овеществление идеи и меру эффективности социального действия [11]. Связующим звеном является раскрытие данного понятия как своего рода элементарной единицы, «атома» всего создаваемого человеком [11, 12].

В современных социальных теориях отсутствуют какие-либо предпосылки для создания единой теории искусственного. В то же время, наряду с обозначением этой концептуальной ограниченности, большинством исследователей единодушно признаётся ключевое значение проблематики искусственного для анализа наиболее существенных задач развития современного общества [9–20]. Проблематика артефакта является определяющей для раскрытия столь актуальной в настоящее время дихотомии простоты и сложности, дискурсивно заполняющей всё социальное пространство современности и выступающей конечным основанием многих аспектов социальной динамики: будучи комплексно встроены в сложные социальные связи, артефакты представляют подвижное, трудно уловимое и обычно скрытое в глубинах сознания как простое, устойчивое и доступное, открывая возможности синтеза «в единой интегрирующей онтологии» [17]. Основанием для её построения может служить искусственность самой социальной действительности [23], нечасто рассматриваемая в подобном ракурсе – цивилизация, по сути, является тем же артефактом, противостоящим природе столь же очевидно, как культура и техника. Выявление единицы, «атома» сферы искусственного открывает возможности интерпретации значимых социальных проблем в контексте пространственно-средового подхода, где предметное поле артефакта определяется, в первую очередь, его пограничной сущностью. Можно говорить о ярко выраженном интересе к артефакту как феномену предельного основания человеческого бытия [4, 9, 14, 15, 18, 20]. Стирание грани между искусственным и естественным, невозможность разглядеть в современном мире то, чего ещё не коснулась рука человека и является той несостоятельностью, которая попадает в центр рассмотрения социальной рефлексии. Концептуализация «артефакта» даёт возможность совместного комплексного раскрытия характеристик социального и антропологического, органического и неорганического, функционального и нефункционального.

Социально-онтологический ракурс анализа артефакта наглядно демонстрирует, с одной стороны, явный духовно-антропологический и описательный ориентир исследовательских предпочтений, с другой – констатацию необходимости внимания к материальному объекту, созданному человеком и предназначенному для определённой цели [4, 5, 9, 17, 18]. Подобное понимание, традиционно относимое к сфере практического реализма [22], представляется одним из наиболее актуальных ракурсов исследования перед лицом явного культуроцентристского крена современных социотехнических исследований. Признавая несомненную многоуровневость и сложность мира искусственного, представленного и как знание, и как деятельность, и как сфера духовного, нельзя не видеть, что именно к предметно-физическому уровню созданного человеком как нельзя более неприменим известный тезис

Дж. Вико о том, что подлинно мы знаем только то, что создали сами. «Онтологическое соучастие» материи и общества [24] с точки зрения анализа современных социальных реалий, на наш взгляд, более перспективно, нежели поиск духовных основ, сводящийся, в конечном итоге, к рефлексии негативного влияния развития технологий на традиции и культурную память. Интенциональная зависимость артефакта от человеческого сознания конгруэнтна детерминации социальных реалий сферой психического, ментального: она позволяет отразить проблематику общественного развития через поиск антропологических оснований. В их раскрытии в рамках отечественных исследований последних лет едва ли можно обозначить какую-либо системность, тем не менее, явно доминирующим фоном становится соотнесение артефакта с темпоральными аспектами социального бытия [4, 9, 12, 14, 25].

Артефакт как элемент культурной памяти может выступать в качестве основания дифференциации различных уровней социального пространства [14, 25]. Воссоздание системы временных отношений обретает особую важность в контексте кризиса цивилизационного развития, утраты преемственности и неопределённости соотношения нового и старого [25-27]. Связь вещи и времени, играющая ключевую роль для реконструкции идентичности, проявляется ярче и значимей, если речь идёт о вещи искусственной, определяющей процессы социализации личности [25, 27]. Соизмеряя время «развеществления» артефакта, утрачивающего своё функциональное назначение, с временем «проживания» человеком социальной реальности, можно идентифицировать те нормы и ценности, которые в современной социологии всё чаще обозначаются в качестве наиболее адекватного основания стратификации [28-30]. Соотнесение человека, утратившего свою идентичность, и артефакта, исчерпавшего потенциал функционального применения, даёт новый взгляд на классическую проблему социального неравенства и мобильности, выходя далеко за рамки традиционного имущественного расслоения [30]. Технический артефакт, в постиндустриальном обществе вытесняемый из социальной жизни информационными реалиями, зачастую выступает как элемент квазистратификации, средство имитации восходящей мобильности. В качестве объективной составляющей расслоения общества он функционирует как форма социального капитала, в качестве субъективной – как знаково-символическое восприятие идентичности [30].

Тематический план «материи и общества», проникновенно обозначенный Ф. Броделем как «непрозрачная зона цивилизации», наполняется сейчас новым содержанием в силу возрождающегося интереса к марксистским идеям; помимо этого, научное внимание к артефакту созвучно одному из наиболее важных дискурсов отечественной социальной науки – дискурсу российской модернизации. В контексте поиска путей обновления социальных стратегий технический артефакт раскрывается как основание дифференциации социокультурного кризиса России и Запада, оказавшихся «как бы с разных сторон у одного и того же рубежа – «конца истории» [31]. Максимальное воплощение функциональности искусственного, свойственное западному миру, и российское «недосвершившееся», нереализованное – два «исхода» социального, где техника начинает функционировать как подсистема культуры, а духовная практика – как фактор повышения хозяйственной эффективности [1, 31]. Модернизация как проект знаменует собой стадию вырождения искусственного, связанного с оборачиванием функций и превращением смысла. Этому соответствует формирование стойкой тенденции к неспособности человека создавать и удерживать смысловой фон жизненных реалий [32].

Антиномия артефакта и жизни составляет ещё одну значимую современную тенденцию осмысления проблематики искусственного [10, 19]. Включение артефактов в пространство жизнедеятельности человека интерпретирует искусственное как феномен границы между различными уровнями социального бытия [9, 31]. В значительной мере сама постановка проблемы жизненного пространства исходит из противопоставления искусственного и естественного, артефакт при этом выступает как конституирующий элемент, позволяющий связать воедино его различные уровни. Вместе с тем любой из перечисленных дискурсов артефакта отражает исчерпание его социальной значимости, представленное, в частности, его редукцией до уровня коммуникативного опыта [11, 20].

Романтическое отторжение искусственного было в своё время связано с осознанием отчуждения объекта творчества от его субъекта, произведения от автора, артефакта от человека. Гофмановский ужас, испытываемый при виде технического изделия, исходил из неприятия того, что изобретение начинает обособляться от своего создателя, стремительно становясь чем-то чуждым и в значительной мере противостоящим творческому началу. Современная антропологическая рефлексия, перестрадавшая идеей сверхчеловека и пережившая опыт тоталитарных идеологий двадцатого столетия, тяготеет иной напряжённостью мысли, связанной отнюдь не с дефицитом, а скорее, с избытком «присутствия» человека в сфере искусственного. Конечность и ограниченность артефакта выступает здесь как воплощение конечности и ограниченности нас самих, и искусственное, в первую очередь – техника, задуманное как вспомогательное практическое устройство, становится востребованным, прежде всего – с точки зрения мышления и духа. Умение видеть присутствие человека становится главным ориентиром понимания артефакта. Традиционное неприятие овеществления духовного, вокруг которого столь долго был сосредоточен привычный дискурс, более неактуален. Понимая данное овеществление как процесс, можно сделать вывод, что он, по-видимому, завершён. В технофобской риторике современности сложно уловить тревогу, она скорее исполнена усталости. Преодолённая проблематичность искусственного мира – кладбище человеческих устремлений и намерений. Цель, с которой изначально был создан любой из артефактов, предстаёт как демонстрация человеческой несостоятельности: с точки зрения предметно-физической пространственности, подлинность естественного оказывается вытесненной овеществлением искусственного, с точки зрения познавательной активности – мир артефактов делает невозможным даже видимость простоты и порядка.

Библиографический список

1. **Коротаев, С.А.** Российская трудовая культура как фактор креативности отечественных профессионалов // Мир России. 2015. №2. С. 152–176.
2. **Сергеев, В.М.** Инновации как политическая проблема // Полития. 2008. №1. С. 114–125.
3. **Нуреев, Р.М.** Россия и Европа: эффект колеи (опыт институционального анализа истории экономического развития) / Р.М. Нуреев, Ю.В. Латов. – Калининград, 2009. – 294 с.
4. **Красноглазов, А.Б.** Функционирование артефакта в культурно-семантическом пространстве / дисс. ... д. филос. наук / Красноглазов А.Б. – М., 1995. – 290 с.
5. **Леонтьева, Э.О.** Философские основания концептуализации социальной реальности: дисс. ... канд. филос. наук / Леонтьева Э.О. – Томск, 2000. – 145 с.
6. **Ткачёва, Н.Г.** Проблема исследования социальной реальности: теоретико-методологический аспект: дисс. ... канд. филос. наук / Ткачёва Н.Г. – Иркутск, 2006. – 163 с.
7. **Цойлик, Н.В.** Цивилизационные основания социальной деструктивности: дисс. канд. филос. наук / Н.В. Цойлик. – Саратов, 2011. – 153 с.
8. **Ортега-и-Гассет, Х.** Размышления о технике / Х. Ортега-и-Гассет: избранные труды. – М., 1997. С. 164–232.
9. **Казакова, В.И.** Технический артефакт в горизонте жизненного пространства: дисс. ... канд. филос. наук / В.И. Казакова – Н. Новгород, 2007. – 151 с.
10. **Казакова, В.И.** Технический артефакт и социальное пространство / В.И. Казакова, В.В. Беляков // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2008. Т. 22. С. 204–211.
11. **Николаев, А.И.** Философский анализ роли артефакта в культуре // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. 2011. Т. 2. №3. С. 187–196.
12. **Белов, Е.А.** Артефакт как структурная единица культуры: автореферат дисс... канд. филос. наук / Белов Е.А. – Тюмень, 2014. – 21 с.
13. **Долгоруков, В.В.** Проблема артефактов как case-study для практического реализма // Эпистемология и философия науки. 2011. №2. Т. XXVIII. С. 76–79.
14. **Игнатьева, И.Ф.** Проблема артефакта: онтология, эпистемология, аксиология / И.Ф. Игнатьева. – Великий Новгород: НовГУ им. Я. Мудрого, 2002. – 86 с.
15. **Ляликов, А.П.** Техническое творчество и проблема артефакта: дисс. ... канд. филос. наук / Ляликов А.П. – СПб., 1991. – 197 с.
16. **Маркова, Л.А.** Артефакт – законы природы, артефакт – законы мышления // Эпистемология и философия науки. 2011. Т. XXVIII. №2. С. 70–71.

17. **Розов, Н.С.** Полипарадигмальная онтология и ритуально-конституциональная концепция бытования и исторического развития артефактов // Онтологии артефактов: взаимодействие естественных и искусственных компонентов «жизненного мира». – М.: Дело, 2012. С. 90–112.
18. **Саенко, Н.Р.** Концептуальные основания нигитологии культуры: дисс. ... д. филос. наук / Саенко Н.Р. – СПб., 2012. – 342 с.
19. **Сергиенко, А.С.** Психологические факторы становления личности в техногенном пространстве жизнедеятельности: дисс. канд. псих. наук / Сергиенко А.С. – Красноярск, 2006. – 178 с.
20. **Худякова, О.А.** Технический артефакт в зеркале современной онтологии коммуникаций // Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Сер. «Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии». С. 25–33.
21. **Шухов, А. З.** Сокулер и типология артефактов [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://pounivers.narod.ru/ofir/sokul.htm> (Дата обращения 01.07.2015).
22. **Baker, L.R.** The ontological significance of artefacts [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://phil.hse.ru/announcements/23849995.html> (Дата обращения 01.07.2015).
23. **Попкова, Н.В.** Техносферные начала в общественном развитии: анализ современных философских идей / Н.В. Попкова. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2002. – 179 с.
24. **Бурдые, П.** Мёртвый хватает живого. Об отношениях между историей овеществлённой и историей инкорпорированной / П. Бурдые. Социология социального пространства. – СПб.: Алетейя, 2007. С. 121–156.
25. **Калиткина, Г.В.** «Старые вещи» в диалектном дискурсе // Вестник Томского государственного университета. 2008. №1. С. 5–17.
26. **Казакова, В.И.** По ту сторону новизны: «старое» как объект феноменологического анализа / В.И. Казакова, О.А. Худякова // Актуальные проблемы социальной коммуникации: материалы третьей Всероссийской научно-практической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2012. С. 584–585.
27. **Тумпольская, А.В.** Ностальгия как показатель «проживания» социальной реальности: к вопросу о детских игрушках / А.В. Тумпольская, Н.М. Богданова // Вестник молодых учёных и специалистов Самарского государственного университета. 2014. №2. С. 80–86.
28. **Доведов, С.Н.** Владельцы мобильных телефонов: тезаурусный подход к их типологизации / С.Н. Доведов, В.А. Луков // Тезаурусный анализ мировой культуры. – М., 2007. С. 10–23.
29. **Пронина, Л.А.** Проблема стратификации в условиях информационного общества // Вестник Тамбовского университета. – Сер. «Гуманитарные науки». 2012. №11(115). С. 276–280.
30. **Худякова, О.А.** Техника и социальная стратификация современной России / О.А. Худякова, В.И. Казакова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Сер. «Социальные науки». 2008. №1(9). С. 137–144.
31. **Новиков, О.Е.** Модернизация и мегалотимия: постиндустриальные перспективы / О.Е. Новиков, В.И. Казакова // Актуальные проблемы социальной коммуникации: материалы первой международной научно-практической конференции. – Н. Новгород, 2010. С. 647–649.
32. **Ростова, Н.Н.** Мрак сознания, или Утерянный фон русской жизни // Философия хозяйства. 2009. №3. С. 279–282.

*Дата поступления
в редакцию 04.06.2015*

V.I. Kazakova

ARTIFACT AS CONTEMPORARY SOCIAL SCIENCE CONCEPT

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

The article reveals with artifact conceptualization mechanisms within contemporary social science. Artifact is material object, created and purposed by human being. The main semantic determinant of artifact correlates with his transitive nature: it unites natural and artificial, social and technical, cultural and anthropological. The most significant aspect of artifact is its connection with the problem of boundaries and space organization; it is actual because of modern lack of simplicity and order. Technical artifact as well as cultural is the result of creative human activity and constitutive element, connecting various spheres of social space.

Key words: artifact, boundary, transition, natural and artificial, concept, conceptualization.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 537.86

Е.М. Громов, В.В. Тютин

КВАЗИСОЛИТОНЫ В РАМКАХ УРАВНЕНИЙ КОРТЕВЕГА-ДЕ-ВРИЗА ПРИ УЧЕТЕ ПОТЕРЬ И НЕОДНОРОДНОСТИ

Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Цель работы: Исследовано уравнение Кортевега-де-Вриза с линейными потерями и неоднородной по поперечной координате нелинейностью, описывающее распространение нелинейных гравитационных волн в неоднородной по высоте атмосфере.

Результат: Найдено точное решение модельного уравнения в виде диссипативной нелинейной локализованной волны, распространяющейся с постоянной скоростью. Полученное решение описывает квазисолитон, распространяющийся под малым углом к горизонту. Определена величина этого угла. Дисперсионное расплывание диссипативного квазисолитона компенсируется движением квазисолитона в более плотные слои атмосферы, приводящим к увеличению коэффициента нелинейности. Полученные результаты достаточно хорошо описывают натурные наблюдения акустических импульсов в ионосфере.

Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически.

Новизна: Результаты исследования новые и могут иметь приложение для исследования и описания нелинейных волновых пакетов внутренних гравитационных волн в верхних слоях атмосферы.

Ключевые слова: уравнение Кортевега-де-Вриза, затухающий солитон, квазисолитон, неоднородность, аналитическое решение, численный эксперимент.

Введение

Интерес к динамике солитонов обусловлен их способностью распространяться на значительные расстояния, сохраняя свою форму, и переносить энергию и информацию с малыми потерями. Солитонные решения возникают в нелинейных моделях различных областей физики при анализе интенсивных волновых полей в диспергирующих средах: гравитационных волн в атмосфере и ионосфере, поверхностных волн на воде, оптических импульсов и пучков в волоконных линиях связи и пространственных волноводах, электромагнитных и ленгмюровских волн в плазме [1-7].

Динамика низкочастотных (НЧ) волновых пакетов в нелинейных диспергирующих средах описывается уравнением Кортевега-де-Вриза (КдВ). В пренебрежении потерь и при постоянных коэффициентах нелинейности и дисперсии данное уравнение имеет хорошо известное солитонное решение, существование которого обусловлено балансом нелинейности и дисперсии. Учет потерь приводит к затуханию солитонов, которое сопровождается дисперсионным расплыванием. Пространственная неоднородность коэффициента нелинейности приводит к изменению параметров солитона: с увеличением нелинейности протяженность солитона уменьшается. Баланс этих эффектов может привести к возникновению диссипативных солитонов.

В данной работе исследуется распространение интенсивных НЧ волновых пакетов в

рамках КдВ с линейными потерями и неоднородной по поперечной координате нелинейностью. Данное уравнение описывает в параксиальном приближении распространение гравитационных волн в неоднородной по вертикали атмосфере при малых углах вектора скорости относительно горизонта. Найдено солитонное решение в виде диссипативной нелинейной локализованной волны, распространяющейся с постоянной скоростью. Полученное решение описывает диссипативный квазисолитон, распространяющийся под малым углом к горизонту, величина которого пропорциональна коэффициенту линейных потерь, вертикальному масштабу неоднородности атмосферы и обратно пропорциональна скорости его движения. Дисперсионное расплывание диссипативного солитона компенсируется движением солитона в более плотные слои атмосферы, приводящим к увеличению коэффициента нелинейности.

1. Исходное уравнение. Интегральные соотношения

Рассмотрим динамику волнового поля $\psi = \psi(x, z, t)$ в нелинейной диспергирующей диссипативной среде с неоднородной по поперечной координате нелинейностью в рамках неконсервативного КдВ [4]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + V_0 \frac{\partial \psi}{\partial x} + 3p(z)\psi \frac{\partial \psi}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} + \nu \psi = 0, \quad (1)$$

где z - поперечная к x координата; $p(z)$ - коэффициент нелинейности среды; V_0 - скорость линейных волн; γ - коэффициент дисперсии; ν - коэффициент линейных потерь. Данное уравнение описывает в параксиальном приближении распространение нелинейных гравитационных волн при малых углах вектора скорости к горизонту в неоднородной по вертикали атмосфере с экспоненциальным профилем нелинейности

$$p(z) = \exp(-z/H), \quad (2)$$

где H - вертикальный масштаб неоднородности атмосферы. При отсутствии потерь и при постоянности коэффициента нелинейности, отвечающем горизонтальному распространению волновых пакетов, уравнение (1) имеет хорошо известное солитонное решение [1, 2]. В данной работе решение (1) будем искать в виде волны, распространяющейся со скоростью \bar{V} под малым углом α к оси x , приводящим к изменению в (2) высоты распространения солитона

$z(t) = z_0 + \sin \alpha \int_0^t |\bar{V}(t')| dt'$. Удерживая величины порядка $\alpha \ll 1$ (пренебрегая членами порядка $\alpha^2 \ll \alpha$), с использованием замены

$$\psi = \Psi \exp(-\nu t - z_0/H) \quad (3)$$

уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + V_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x} + 3\Psi \frac{\partial \Psi}{\partial x} \exp\left(-\frac{\alpha}{H} \bar{x}(t) - \nu t\right) + \gamma \frac{\partial^3 \Psi}{\partial x^3} = 0. \quad (4)$$

Здесь $\bar{x}(t) = \int_0^t V(t') dt'$, $V = |\bar{V}|$. Уравнение (4) имеет следующие соотношения для интегральных моментов волнового поля:

$$\frac{dN}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^2 dx = 0, \quad (5)$$

$$N \frac{d\bar{x}}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} x\Psi^2 dx = NV_0 + 2p(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^2 dx - 3\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial\Psi}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (6)$$

где $p(t) = \exp(-\alpha\bar{x}(t)/H - vt)$. Для анализа системы (5)-(6) решение будем искать в адиабатическом приближении, полагая динамику волнового пакета с сохранением sech-like формы

$$\Psi(\xi, t) = A(t)\text{sech}^2(x - \bar{x}(t)/\Delta(t)), \quad (7)$$

где $\Delta^2(t) = 4\gamma/(p(t)A(t))$, $A(t)^2\Delta(t) = \text{const}$. Подставляя (7) в (6) и учитывая (5), получим для скорости движения солитона

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = V_0 + A_0 \exp\left(-\frac{\alpha}{H}\bar{x}(t) - vt\right). \quad (8)$$

Решением (8) является

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = V_0 + \frac{A_0}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_*} \left[\exp\left(\frac{3}{2}vt\left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_*}\right)\right) - 1 \right]}, \quad (9)$$

где $\alpha_* = -vH/(V_0 + A_0)$.

2. Солитонное решение

При выполнении соотношения

$$\alpha = \alpha_* \equiv -vH/V \quad (10)$$

скорость солитона не меняется во времени $d\bar{x}/dt = V_0 + A_0 = \text{const}$. Так же постоянен и коэффициент нелинейности в (4): его уменьшение во времени, обусловленное потерями, компенсируется смещением солитона в области с большей нелинейностью. Уравнение (4) в этом случае принимает вид

$$\frac{\partial\Psi}{\partial t} + V_0 \frac{\partial\Psi}{\partial x} + 3\Psi \frac{\partial\Psi}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^3\Psi}{\partial x^3} = 0, \quad (11)$$

которое имеет точное решение в виде солитона:

$$\Psi(\xi, t) = A_0 \text{sech}^2[(x - Vt)/\Delta], \quad (12)$$

где A_0 - амплитуда солитона; $\Delta = 2\sqrt{\gamma/A_0}$ - его ширина; $V = V_0 + A_0$ - его скорость. Решение в исходных переменных уравнения (1) с учетом (3) следующее:

$$\psi = A_0 \text{sech}^2(x - Vt/\Delta) \exp(-vt + z_0/H).$$

Полученное решение описывает диссипативный квазисолитон, распространяющийся под малым отрицательным углом α_* относительно оси x с постоянной скоростью. Дисперсионное расплывание диссипативного солитона компенсируется его смещением в области с большей нелинейностью. Подобная динамика импульсов в ионосфере наблюдается регулярно [6]. Отметим, что в [7] были получены диссипативные высокочастотные солитоны в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера с псевдоиндуцированным рамановским рассеянием, линейными потерями и пространственно неоднородной дисперсией. При $\alpha \neq \alpha_*$ скорость солитона и его амплитуда меняются во времени. На рис. 1 приведены ре-

зультаты численного счета динамики начального волнового пакета $\Psi = \text{sech}^2(x/2)$ в рамках (4) в системе отсчета, движущейся со скоростью начального волнового пакета $\xi = x - V_0 t$, при значениях параметров $\gamma = 1$, $\nu = 1/10$, $V_0 = 1$ и при различных значениях α/α_* .

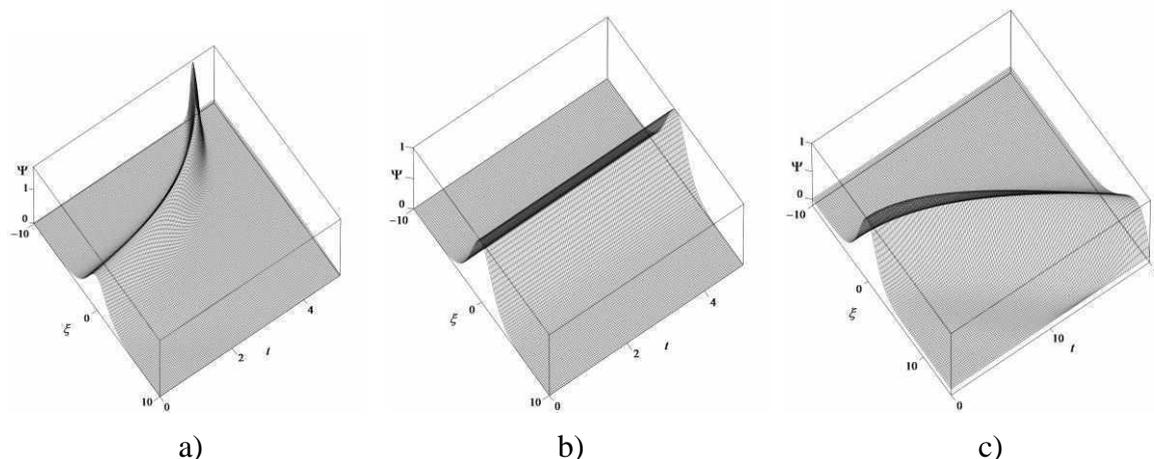


Рис. 1. Результаты численного счета (4) в системе, движущейся со скоростью начального солитона $\xi = x - (V_0 + A_0)t$ при $\nu = 1/10$ и различных значениях α/α_* .

[(a): $\alpha/\alpha_* = 2$; (b): $\alpha/\alpha_* = 1$; (c): $\alpha/\alpha_* = 1/2$]

Заключение

В работе исследована динамика интенсивных НЧ волновых пакетов в рамках уравнения КдВ с линейными потерями и неоднородной по поперечной координате нелинейностью. Данное уравнение в парааксиальном приближении описывает распространение гравитационных волн в неоднородной по вертикали атмосфере при малых углах вектора скорости к горизонту.

Найдено решение этого уравнения в виде диссипативной нелинейной локализованной волны. Полученное решение описывает диссипативный квазисолитон, распространяющийся под малым углом вектора скорости к горизонту. Величина угла пропорциональна коэффициенту линейных потерь, вертикальному масштабу неоднородности атмосферы и обратно пропорциональна скорости движения квазисолитона. Дисперсионное расплывание диссипативного квазисолитона компенсируется движением солитона в более плотные слои атмосферы, приводящим к увеличению коэффициента нелинейности.

Данная работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект РФФИ № 14–05–00565-а).

Библиографический список

1. **Кадомцев, Б.Б.** Коллективные явления в плазме / Б.Б. Кадомцев. – М.: Наука, 1988.
2. **Карпман, В.И.** Нелинейные волны в диспергирующих средах / В.И. Карпман. – М.: Наука, 1973.
3. **Савина, О.Н.** О возможности существования уединенной внутренней гравитационной волны в безграничной изотермической атмосфере / О.Н. Савина, Л.М. Ерухимов // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981. Т. 21 (4). С. 679–682.
4. **Деминова, Г.Ф.** Об уединенной внутренней гравитационной волне в области F атмосферы / Г.Ф. Деминова [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. 1982. Т. 22 (2). С. 211–215.
5. **Tajima, K.** Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss // Opt.Lett. 1987. V.12. P. 54.

6. **Astafyeva, E.** Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances / E. Astafyeva [et al.]// Journal of Geophysical Research. 2009. V. 114. A10307. doi:10.1029/2008JA013853.
7. **Gromov, E.M.** Damped solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial stimulated Raman scattering and decreasing dispersion / E.M. Gromov, B.A. Malomed // Optics Communications. 2014. V. 320. P. 88–93.

*Дата поступления
в редакцию 11.06.2015*

E.M. Gromov, V.V. Tyutin

QUASI SOLITONS IN THE KORTEVEG-DE-VRISE EQUATION FRAME WITH TAKING INTO ACCOUNT THE LOSS AND HETEROGENEITY

National Investigate University Higher School of Economics

Purpose: The Kortevæg-de-Vriese (KdV) equation with linear loss and non-uniform in the transverse coordinate nonlinearity was investigated. This equation describes the propagation of nonlinear gravitational waves in an height – inhomogeneous atmosphere.

Approach: The investigation was considered as analytically as numerically.

Findings: An exact solution of the model equation in the form of a dissipative nonlinear localized wave traveling with constant speed was obtained. The resulting solution describes quasisoliton propagating at a small angle to horizon. The angle's volume is determined. The dispersion decay of dissipative quasisoliton is compensated by its motion in to denser layers of the atmosphere, leading to nonlinearity coefficient increasing. The obtained results are in a good agreement with natural acoustic pulse observations in the ionosphere.

Key words: Kortevæg-de-Vriese Equation, Dissipative Soliton, Quasisoliton, Heterogeneity, Analytical Solutions, Numerical Simulation.

УДК 513.015.2

Е.Д. Галкина², С.В. Лещева¹, Н.С. Лукичев¹, В.Е. Рыков¹

НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОШИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
ООО «Телека»²

Для двухпараметрического вероятностного распределения Коши получены три типа оценок параметров. Один из них использует понятие медианы, а другие – сведение к подходящим функциям от исходной случайной величины. В частности, применяются комплекснозначные функции.

Ключевые слова: оценка параметра, вероятностное распределение, медиана, среднеквадратическое отклонение.

Распределение Коши – это вероятностное распределение с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{b}{(x-a)^2 + b^2}, \quad x \in (-\infty, +\infty), \quad (1)$$

где a и b ($b > 0$) – параметры. Его обычно относят к числу классических (наряду с нормальным, пуассоновским и др.) распределений. Ввиду его так называемой безграничной делимости [1]:

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_n, \quad (2)$$

где X – распределение по Коши с параметрами a и b , а независимые случайные величины в правой части распределены также по Коши, но с параметрами $\frac{a}{n}$ и $\frac{b}{n}$. В частности, среднее

$\frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$ имеет те же параметры, что и каждое из X_i .

Имеются связи распределения Коши с другими известными распределениями. Так нетрудно показать, что $Y = \arctg \frac{x-a}{b}$ распределено равномерно на $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$. Отношение

$Z = \frac{X_1}{X_2}$ независимых нормально распределенных величин распределено по Коши с параметрами 0 и $\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, если $M(X_1) = M(X_2) = 0$, $D(X_i) = \sigma_i^2$. Это свойство, как отмечено в [2], используется в экономических моделях биржевой практики.

Нахождение оценок параметров a и b в (1), исходя из множества независимых измерений случайной величины X ,

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (3)$$

представляет некоторые трудности. Это объясняется тем, что стандартные методы получения оценок – метод максимального правдоподобия и метод моментов почти не работают.

Первый приводит к не решаемому в явной форме алгебраическому уравнению, а второй без модификации неприменим из-за несуществования моментов целого порядка.

Поучительно рассмотреть оценку момента $M_1(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx$. Интеграл расходится, но существует в смысле главного значения. Если оценку a взять в виде $a \cong a^* = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$, то можно обнаружить, что a^* имеет то же самое распределение,

что и X . Таким образом, количество измерений n в данном случае не влияет на точность оценки.

В свое время А.Н. Колмогоров [3] обратил внимание на полезность использования в статистике такой характеристики случайной величины, как медиана. По определению медиана $m(X)$ случайной величины X есть такое число m , что

$$p(X < m) = p(X \geq m) = \frac{1}{2}. \tag{4}$$

Предложение 1. Пусть X распределено по Коши с параметрами a и b , $Y = |X - a|$. Тогда $m(X) = a$, $m(Y) = b$.

Проверка здесь тривиальна. Надо лишь заметить, что Y имеет плотность $f_Y(x)$, равную $\frac{2}{\pi} \cdot \frac{b}{x^2 + b^2}$ при $x > 0$ и 0 при $x \leq 0$.

В [2] для оценки параметра a предложено использовать медиану, но подробности не приведены. Далее приводятся соответствующие результаты.

Если экспериментальные данные значений какой-либо случайной величины упорядочить по возрастанию: $x_1 < x_2 < \dots < x_i < x_{i+1} < \dots < x_k$, то выборочная медиана m^* принимается равной x_k при $n = 2k - 1$ и $\frac{1}{2}(x_k + x_{k+1})$ при $n = 2k$. При нечетном n закон распределения выборочной медианы легко описать.

Предложение 2. Для случайной величины X с плотностью распределения $f(x)$ выборочная медиана $m^* = m(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет плотность $n C_{n-1}^{k-1} F^{k-1}(x) (1 - F(x))^{k-1} f(x)$. Здесь $n = 2k - 1$, а $F(x)$ – функция распределения X .

Доказательство можно найти в книге Ван-дер Вардена [1], где рассматривается случайная величина с произвольным законом распределения. Там же устанавливается асимптотическая нормальность распределения выборочной медианы при $k \rightarrow \infty$. Если соответствующие формулы использовать для распределения Коши (1), то получим:

Предложение 3. При $n \rightarrow \infty$ выборочная медиана распределения Коши распределена асимптотически нормально с математическим ожиданием a и среднеквадратическим отклонением $\sigma = \frac{\pi b}{2\sqrt{n}}$.

Интуитивно ясно, что при $n = 2k$ четном ситуация аналогична, хотя в предложении 2 формулы значительно усложняются.

По существу, тот же результат получается и для величины $Y = |X - a|$ из предложения 1, а именно выборочная медиана здесь распределена асимптотически нормально с математическим ожиданием b и среднеквадратическим отклонением $\sigma = \frac{\pi b}{2\sqrt{n}}$.

Конечно, здесь предполагается, что параметры a и b известны. Можно ожидать, что замена их на значения выборочных медиан вносит незначительные изменения.

Итак, предлагаются следующие оценки параметров a и b в (1) по экспериментальным данным (3):

$$a \cong a^* = \text{median}(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$b \cong b^* = \text{median}(|x_1 - a^*|, |x_2 - a^*|, \dots, |x_n - a^*|).$$

Дисперсии оценок при больших n приблизительно равны $\frac{\pi b^*}{2\sqrt{n}}$.

Другой тип оценок может быть получен методом, который назовем *методом сжатия*

экспериментальных данных. Он заключается в переходе от случайной величины X к случайной величине $Y = g(X)$, имеющей моменты нужных порядков. По существу, этот метод использовался в [2 и 4].

В качестве примера возьмем $Y = e^{i\lambda X}$, где $i = \sqrt{-1}$, λ – действительный коэффициент. Математическое ожидание Y есть не что иное, как характеристическая функция X . Она легко подсчитывается с помощью вычетов и результат таков:

$$M(e^{i\lambda X}) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda x} \frac{b}{(x-a)^2 + b^2} dx = e^{(ia-b)\lambda}. \quad (5)$$

Аппроксимируя левую часть в (5) средним арифметическим $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{i\lambda x_k}$, получаем следующие оценки:

$$\begin{aligned} a &\cong \frac{1}{\lambda} \arg \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{i\lambda x_k} \right), \\ b &\cong -\frac{1}{2} \ln \left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{i\lambda x_k} \right|. \end{aligned} \quad (6)$$

Еще примеры доставляют функции $Z = \frac{1}{(X-a_1)^2 + b_1^2}$ и $Z_1 = \frac{X-a_1}{(X-a_1)^2 + b_1^2}$, где a_1 и b_1 заданы. Математические ожидания здесь равны:

$$\begin{aligned} M(Z) &= \frac{b_1 + b}{b_1} \cdot \frac{1}{(a-a_1)^2 + (b_1 + b)^2}, \\ M(Z_1) &= \frac{a-a_1}{b_1} \cdot \frac{1}{(a-a_1)^2 + (b_1 + b)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вновь аппроксимации левых частей в (7) средними арифметическими позволяют выразить a и b через экспериментальные данные. Мы не приводим выражение для дисперсий (или среднеквадратических отклонений для оценок из (6) и (7)). Отметим только, что их порядки по n равны $\frac{1}{\sqrt{n}}$.

В заключение приведем данные по численным экспериментам.

Таблица 1

a_1^*	2,220	2,642	2,159	1,225	1,946
	2,297	2,410	1,991	4,064	3,029
	2,970	0,619	1,921	2,744	2,127
	1,676	2,832	3,565	1,726	1,275
a_2^*	1,112	2,714	3,047	0,898	1,735
	2,210	2,715	1,579	4,326	3,254
	2,139	1,454	1,829	2,455	2,296
	1,024	2,168	2,706	2,413	1,259
a_3^*	2,089	2,2462	1,971	1,338	1,770
	2,728	2,472	1,895	3,884	3,318
	2,496	0,982	2,028	2,685	2,145
	1,664	2,185	2,835	2,149	1,439

Моделировалось распределение Коши с параметрами $a=2$, $b=5$. Число n бралось равным 100, 200 и 500. Для каждого из этих n значений брались по 20 реализаций модельного процесса. В прилагаемых табл. 1 и 2 данные соответствуют $n=100$. В табл. 1 помещены

значения оценок параметра a , а в табл. 2 – параметра b . При этом a_1^* , b_1^* – оценки, полученные с использованием медианы, a_2^* , b_2^* – оценки из (6), а a_3^* , b_3^* – оценки из (7). В расчетах по формулам (6) значение $\lambda = 0,1$. В расчетах по формулам (7) надо было сначала задать значения a_1 и b_1 . В качестве таковых были взяты a_1^* и b_1^* .

Таблица 2

b_1^*	4,928	5,525	5,171	5,473	4,506
	4,162	4,163	4,130	3,856	4,599
	6,382	5,800	5,057	3,739	4,717
	3,896	5,417	4,700	4,775	4,926
b_2^*	5,148	5,656	5,394	5,034	5,166
	5,256	4,567	5,548	4,251	4,286
	5,023	5,566	6,827	3,168	5,477
	4,632	6,068	5,107	4,541	4,448
b_3^*	5,067	5,478	5,272	5,351	4,463
	4,325	4,159	4,131	3,980	4,699
	6,253	5,811	5,119	3,834	4,825
	3,940	5,428	4,649	4,735	4,847

Библиографический список

1. Ван дер Варден. Математическая статистика / Ван дер Варден. – М., 1960.
2. Шинкеев, М.Л. Оценка параметров распределения Коши / М.Л. Шинкеев // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск.
3. Колмогоров, А.Н. Метод медианы в теории ошибок // Теория вероятностей и математическая статистика. С. 11–112.
4. Галкин, В.М. Оценки параметров распределения Коши / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лешева // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. №2. С. 314–319.

Дата поступления
в редакцию 18.06.2015

E. D. Galkina², S.V. Leshcheva¹, N.S. Lukichev¹, V.E Rykov¹

SOME ESTIMATES OF CAUCHY DISTRIBUTION PARAMETERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Symphony «Teleca»²

Purpose: New estimates of Cauchy distribution parameters are to build.

Design/methodology/approach: The median and random variable transformation are used for the estimate construction.

Findings: Three new types of estimates are found.

Research limitation/ implications: There methods can be used for the other non standard distribution.

Originality/value: The results of this paper are new.

Key words: parameter estimate, probability distribution, median, standard deviation.

УДК 519.25:616-006-03

А.Н. Мошкова¹, А.С. Корягин², Е.И. Ерлыкина³, Н.В. Мохнина¹, Я.Ю. Козлова¹,
Ю.И. Царапкина¹, Ю.Д. Ерёмина², В.Н. Дыдыкина²

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОТНОШЕНИЙ ГЛЮКОЗЫ И ЛАКТАТА В КРОВИ ЖИВОТНЫХ-ОПУХОЛЕНОСИТЕЛЕЙ ПРИ ТЕРАПИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПРЕПАРАТАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²,
Нижегородская государственная медицинская академия Министерства России³

Цель работы: Оценка противоопухолевой эффективности наноструктурированных препаратов на лабораторных животных с перевитым альвеолярным раком печени. Разработка метода лечения злокачественных новообразований на примере анализа зависимых отношений между концентрациями глюкозы и лактата в крови больных животных. Выявление закономерностей в характере изменения этих показателей методом статистического анализа для прогнозирования развития опухолевого процесса.

Методология: В работе использован статистический анализ экспериментальных показателей глюкозы и лактата в крови крыс при различных стадиях опухолевого процесса до и после лечения нанопрепаратами. Проведена оценка и прогнозирование противоопухолевой активности хитозан-наночастиц золота, хитозан-наночастиц золота-пчелиного яда, и сравнение результатов с интактными животными и с группой животных-опухоленосителей без лечения.

Результаты и область применения: Выявлена корреляция изменения концентраций глюкозы и лактата с периодом лечения и видом вводимого препарата. На основе математического анализа экспериментальных показателей высказано предположение об эффективности лечения злокачественных новообразований определенными нанопрепаратами и указан предполагаемый срок лечения.

Вывод: Математический анализ количественной зависимости между экспериментальными данными содержания глюкозы и лактата в крови животных при ингибировании нанопрепаратами роста злокачественных новообразований установил определенную направленность в их изменении, что может быть учтено при разработке оптимального метода лечения опухолевого процесса.

Ключевые слова: опухолевый процесс, глюкоза, лактат, хитозан-наночастицы золота, хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд, статистический анализ.

Введение

Установлено, что при патологических состояниях организма, в частности, при злокачественных образованиях, изменяется метаболизм глюкозы, что приводит к нарушению биологических функций клетки. Злокачественные опухоли часто демонстрируют увеличение анаэробного гликолиза – процесса, в результате которого глюкоза используется в качестве топлива для раковых клеток, которые выделяют молочную кислоту в качестве побочного продукта. Большое количество молочной кислоты из раковых клеток затем транспортируется в печень. Это преобразование глюкозы в лактат генерирует более кислый рН в раковых тканях и крови, что приводит к общей физической усталости от накопления молочной кислоты [9].

Опухоль обуславливает мощное поступление глюкозы, утилизируемой для её собственных нужд и теряемой вследствие этого организмом. Действие опухоли как фактора, создающего постоянную тенденцию к гипогликемии, приводит к напряжению компенсаторных систем, поддерживающих углеводный гомеостаз. Разработка эффективных способов терапии и профилактики опухолевых заболеваний является актуальной задачей фундаментальных медицинских исследований и привлекает специалистов различных профилей. Использование методов математического моделирования в исследованиях противоопухолевой активности препаратов позволяет прогнозировать развитие роста злокачественных новообразований при различных стадиях опухолевого процесса.

В данной работе изучали влияние злокачественных новообразований на развитие процесса гликолиза жизнедеятельности организма на примере зависимых отношений между показателями цикла Кребса глюкозы и лактата. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных этих показателей в крови интактных животных, животных-опухоленосителей и в группе животных после терапии нанопрепаратами. Представлен анализ изменения содержания глюкозы и лактата при развитии опухолевого процесса, а также оценка противоопухолевой активности наноструктурированных препаратов.

Задачей данного исследования является определение вида количественной зависимости между уровнем глюкозы и лактата в крови экспериментальных животных, установление тесноты связи между ними, влияние роста злокачественных новообразований на её коррекцию и построение математических моделей, позволяющих расчетным способом прогнозировать развитие опухолевого процесса.

Результаты

Работа проведена на белых нелинейных крысах самцах трехмесячного возраста массой 150-200 г на кафедре «Биохимия и физиология человека и животных» ННГУ. Все процедуры на лабораторных животных осуществлялись в соответствии с требованиями выполнения постановлений о защите животных [3, 5, 11, 12].

В работе использовались водные растворы дисперсии наночастиц золота, стабилизированные пчелиным ядом и хитозаном с молекулярной массой $1,3 \times 10^5$ и степенью деацетилирования 0,80 – 0,82. Наночастицы золота получали в растворе хитозана при УФ-индуцированном восстановлении золото-хлористоводородной кислоты (HA и Cl_4) [15, 16]. Пчелиный яд был получен на пасеках Борского района Нижегородской области методом электростимуляции. DL_{50} яда составила 8 – 10 мг/кг. Хитозан был поставлен ЗАО «БИО-ПРОГРЕСС» ВНИТИБП (Московская область, Щелковский район). Перевивку опухоли (0,5 мл 30% взвеси опухолевых клеток в растворе Хенкса) осуществляли подкожно в паховую область справа [1]. Штамм альвеолярного рака печени РС-1 был получен из банка опухолевых штампов ГУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН.

Животные были разделены на четыре группы по пять в каждой:

- 1) интактные (относительная норма);
- 2) контроль 1 (животные-опухоленосители без лечения);
- 3) контроль 2 – животные-опухоленосители, которым вводили препарат хитозан-наночастицы золота (доза ХТЗ 100мг/кг; золото – 0,25 мг/кг);
- 4) опытная группа – животные-опухоленосители, которым вводили препарат хитозан-пчелиный яд-наночастицы золота (доза ХТЗ 100 мг/кг; пчелиный яд – 0,5 мг/кг).

Введение препаратов проводилось спустя две недели, путем её обкалывания пятикратно, через день в объеме 0,25 мл на животное. Забор крови производился из подъязычной вены на 1, 14 и 28 сутки после окончания курсового введения препаратов. После забора крови её центрифугировали 15 мин при 3000 оборотах, затем отбирали плазму. В плазме крови производили определение глюкозы и лактата при помощи автоматического биохимического анализатора *Konelab 20/20i*.

Полученный массив экспериментальных показателей глюкозы $\{x_i\}$ и лактата $\{y_i\}$ считали массивом прямых равноточных измерений. Проводилась обработка экспериментальных данных [2, 6, 14]. Рассчитывались:

- 1) средние арифметические значения $\bar{x}, \bar{y}, \bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{\bar{y}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$;

- 2) средние квадратические отклонения среднего арифметического $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \sigma_{\bar{y}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}};$$

3) дополнительный интервал Δ по числу измерений n и \bar{x}, \bar{y} , дополнительной вероятности $p = 0,95$ для найденного критерия Стьюдента t_p с помощью таблиц $\Delta = t_p \sigma_{\bar{x}}$, $\Delta = t_p \sigma_{\bar{y}}$.

4) показатель точности определения средней $C_s = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100\%$, $C_s = \frac{\sigma_{\bar{y}}}{\bar{y}} \cdot 100\%$.

В табл. 1 указаны результаты обработки экспериментальных показателей глюкозы и лактата в разных условиях эксперимента после лечения.

Таблица 1

Экспериментальные показатели глюкозы и лактата в крови лабораторных животных

Группы животных	Экспозиция контроля показателей	Глюкоза	Cs %	Лактат	Cs %
Интактные	Среднее 1, 14, 28 суток	4,72±0,69	6,63	4,54±0,6	5,96
Животные-опухоленосители без лечения	1 сутки	3,26±0,75	5,39	7,2±2,28	7,35
	14 суток	3,7±1,55	9,74	5,667±1,99	8,2
	28 суток	2,98±0,81	9,8	4,74±1,42	10,76
Терапия хитозан-наночастицами золота	1 сутки	4,3±1,4	10,5	5,95±1,36	7,21
	14 суток	3,27±0,59	5,68	3,87±0,46	3,76
	28 суток	3,94±0,58	5,36	4,92±1,11	8,1
Терапия хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд	1 сутки	4,26±0,78	5,73	5,86±0,96	5,17
	14 суток	2,28±0,66	9,14	6,22±0,49	2,5
	28 суток	2,83±0,91	10,05	2,43±0,87	11,0

Показатель точности определения средней C_s , не превышающий 11%, свидетельствует о достаточно точной коррекции экспериментальных данных.

Проведена оценка противоопухолевой активности используемых в терапии нанопрепаратов: хитозан-наночастицы золота, хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд. С этой целью анализировали характер изменения содержания глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей (контроль опухоли) и животных-опухоленосителей, которым вводили перечисленные препараты, с интактными животными и друг с другом. Вычислялась величина коэффициентов $k_1 = \frac{[ГЛ]_{\text{Э}}}{[ГЛ]_N}$, $k_2 = \frac{[ЛК]_{\text{Э}}}{[ЛК]_N}$, $k'_1 = \frac{[ГЛ]_{\text{Э}}}{[ГЛ]_K}$, $k'_2 = \frac{[ЛК]_{\text{Э}}}{[ЛК]_K}$, представляющих отношение содержания глюкозы $[ГЛ]_{\text{Э}}$ и лактата $[ЛК]_{\text{Э}}$ в крови экспериментальных животных, интактных животных $[ГЛ]_N$, $[ЛК]_N$, и животных-опухоленосителей $[ГЛ]_K$, $[ЛК]_K$. Значения k_1 , k_2 , k'_1 , k'_2 больше, меньше 1 характеризовали направленность изменения (возрастание \uparrow , убывание \downarrow) экспериментальных показателей относительно нормы и контроля опухоли. Анализ такого исследования представлен в табл. 2, 3.

Таблица 2

Изменение концентраций глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей после терапии нанопрепаратами в сравнении с интактными животными

Группы животных	Экспозиция контроля показателей	Глюкоза [ГЛ]	$k_1 = \frac{[ГЛ]_{\text{Э}}}{[ГЛ]_N}$	Лактат [ЛК]	$k_2 = \frac{[ЛК]_{\text{Э}}}{[ЛК]_N}$
1	2	3	4	5	6
Интактные	Среднее 1, 14, 28 суток	4,72±0,69	—	4,54±0,60	—
Животные-опухоленосители без лечения	1 сутки	3,26±0,75	$\downarrow 0,69$	7,2±2,28	$\uparrow 1,58$
	14 суток	3,70±1,54	$\downarrow 0,78$	5,66±1,99	$\uparrow 1,25$
	28 суток	2,98±0,81	$\downarrow 0,63$	4,74±1,41	$\uparrow 1,04$

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Терапия хитозан-наночастицами золота	1 сутки	4,30±1,40	↓0,91	5,95±1,36	↑1,31
	14 сутки	3,26±0,59	↓0,69	3,86±0,46	↓0,85
	28 сутки	3,94± 0,58	↓0,83	4,92±1,11	↑1,08
Терапия хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд	1 сутки	4,26±0,77	↓0,9	5,86±0,96	↑1,29
	14 сутки	2,28±0,66	↓0,48	6,22±0,49	↑1,37
	28 сутки	2,83±0,91	↓0,59	2,43±0,86	↓0,53

Таблица 3

Изменение концентраций глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей после терапии нанопрепаратами в сравнении с животными без лечения

Группы животных	Экспозиция контроля показателей	Глюкоза [ГЛ]	$k_1 = \frac{[ГЛ]_{\text{Э}}}{[ГЛ]_{\text{К}}}$	Лактат [ЛК]	$k_2 = \frac{[ЛК]_{\text{Э}}}{[ЛК]_{\text{К}}}$
Животные-опухоленосители без лечения	1 сутки	3,26±0,75	—	7,2±2,27	—
	14 сутки	3,70±1,54	—	5,66±1,99	—
	28 сутки	2,98±0,81	—	4,74±1,42	—
Терапия хитозан-наночастицами золота	1 сутки	4,3±1,78	↑1,31	5,95±1,16	↓0,82
	14 сутки	3,26±0,59	↓0,88	3,86±0,46	↓0,68
	28 сутки	3,94± 0,58	↑1,32	4,92±1,11	↑1,03
Терапия хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд	1 сутки	4,26±0,77	↑1,3	5,86±0,96	↓0,81
	14 сутки	2,28±0,66	↓0,61	6,22±0,49	↑1,09
	28 сутки	2,83±0,91	↓0,94	2,43±0,86	↓0,51

Уменьшение содержания глюкозы и увеличение лактата в крови животных-опухоленосителей по отношению к норме (табл. 2) свидетельствуют об интенсивном развитии опухолевого процесса, опасного для жизнедеятельности организма.

Терапия злокачественных новообразований показывает следующий результат противоопухолевой активности используемых в экспериментах нанопрепаратов:

1) спустя одни сутки после лечения хитозан-наночастицами золота и хитозан-наночастицами золота-пчелиный яд, содержание глюкозы в крови животных увеличивается в 1,3 раза ($k_1 \approx 1,3$) по сравнению с контролем-опухоли, приближаясь к норме ($k_1 \approx 0,9$). Содержание лактата уменьшается по отношению к контролю опухоли ($k_2 \approx 0,8$), приближаясь к интактным животным ($k_2 \approx 1,3$) (табл. 2, 3).

2) с увеличением времени (14, 28 сутки) после терапии хитозан-наночастицами золота концентрация глюкозы в крови животных увеличивается в 1,3 раза ($k_1 \approx 1,32$) по сравнению с животными-опухоленосителями без лечения, приближаясь к уровню интактных животных $k_1 \rightarrow 1$ ($k_1 \approx 0,83$).

Терапия хитозан-наночастицами золота-пчелиный яд резко уменьшает показатели глюкозы и лактата по отношению к норме и не улучшает состояния больных животных спустя месяц после лечения (табл. 2, 3).

Таким образом, анализ направленности изменения глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей после терапии представленными нанопрепаратами в наших исследованиях дает возможность предположить, что препарат хитозан-наночастицы золота обладает большей противоопухолевой активностью по сравнению с препаратом хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд, так как быстрее восстанавливает содержание глюкозы и лактата в крови больных животных в течение месяца.

Проведена попытка аппроксимировать зависимость между выбранными показателями процесса гликолиза жизнедеятельности организма животных, определить тесноту связи между содержанием глюкозы и лактата в крови интактных животных и животных-опухоленосителей без лечения и после терапии нанопрепаратами. Провести анализ изменения зависимых отношений этих показателей под влиянием развития опухолевого процесса.

С этой целью решалась задача подбора кривой, имеющая следующую формулировку:

Дано:

- 1) $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n$ – наблюдаемые значения независимой переменной x и зависимой переменной y ;
- 2) семейство некоторых функций.

Требуется подобрать из этого семейства функцию $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_m)$ независимой переменной x и параметров a_0, a_1, \dots, a_m , и определить a_0, a_1, \dots, a_m так, чтобы выбранная функция хорошо аппроксимировала экспериментальную зависимость между x и y , т.е. имея достаточно большое количество экспериментальных точек $\{x_i, y_i\}$ $i = 1, 2, \dots, n$, построить функциональную зависимость заданной структуры наилучшую, в некотором смысле.

В качестве критерия близости искомой функции к экспериментальным значениям может быть использован минимум суммы квадрата отклонений теоретической кривой от всех экспериментальных точек

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m))^2 = \min,$$

где n – число экспериментальных точек, $f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)$ – функция заданной структуры, (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ – экспериментальные характеристики процесса гликолиза: x_i – показатели глюкозы, y_i – содержания лактата. Определению подлежат неизвестные параметры a_0, a_1, \dots, a_m , выбор конкретных значений которых определяет число $J = \min$.

Так как критерий близости функции к экспериментальным точкам y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) зависит от a_0, a_1, \dots, a_m , т.е. $J = J(a_0, a_1, \dots, a_m)$, то для её минимизации следует воспользоваться необходимым условием существования экстремума функции $m + 1$ переменных, т.е.

$$\frac{\partial J}{\partial a_j} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)) = 0,$$

$$\frac{\partial f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)}{\partial a_j} = 0, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

В результате получаем систему из m уравнений относительно неизвестных параметров a_0, a_1, \dots, a_m искомой функции, в которые будут входить все экспериментальные значения y_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

При выборе аппроксимирующей функции придерживались следующих требований:

- 1) функция $y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_m)$ должна принадлежать классу гладких функций;
- 2) должна строиться из элементарных функций, по возможности алгебраических.

В работе использовались:

- полиномиальная $y = a_0 x^m + a_1 x^{m-1} + \dots + a_m$, $m = 1, 2, 3$;
- дробно-линейная $y = \frac{x}{a_0 x + a_1}$;
- степенная $y = a_0 x^{a_1}$;
- логарифмическая $y = a_0 \ln(x) + a_1$;
- экспоненциальная $y = a_0 e^{a_1 x}$.

По программе MS Excel подбирались корреляционные тренды для каждого массива экспериментальных данных $x_i \rightarrow y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Коэффициенты функций регрессии в каждом рассматриваемом опыте находились методом наименьших квадратов. Мерой приближения регрессионной модели к экспериментальным показателям служил коэффициент детерминации R^2 . После математической обработки результатов исследования из всех рассматриваемых функций (полиномиальная, степенная, экспоненциальная, логарифмическая) была выбрана полиномиальная

$$y = a_0 x^m + a_1 x^{m-1} + \dots + a_m, \quad m = 1, 2, 3.$$

Согласно статистическим исследованиям значимости (t – критерий Стьюдента, F – критерия Фишера-Снедекора, равенства квадрата коэффициента корреляции и коэффициента детерминации $r^2 = R^2$), установлено, что линейная $y = a_0 x + a_1$ аппроксимация хорошо объединяет экспериментальные показатели $[ГЛ](x) \rightarrow [ЛК](y)$ в крови интактных животных, животных-опухоленосителей и животных после терапии нанопрепаратами.

В табл. 4 представлены расчетные значения коэффициентов a_0, a_1 , коэффициентов r_{xy}, R^2 .

Таблица 4

Значение коэффициентов линейной аппроксимации $y = a_0x + a_1$, коэффициентов корреляции r_{xy} и детерминации R^2 зависимости глюкозы(x) и лактата(y) в крови лабораторных животных

Условия эксперимента	a_0	a_1	r_{xy}	R^2	r_{xy}^2
Интактные	0,7708	1,0231	0,9687	0,9386	0,9386
Контрольная группа (1 сутки)	2,7857	-1,9	0,9286	0,8622	0,8622
Контрольная группа (14 сутки)	1,2051	1,2077	0,9383	0,8804	0,8804
Контрольная группа (28 сутки)	1,5422	0,1444	0,8828	0,7794	0,7794
Хитозан-наночастицы золота (1 сутки)	0,7459	2,7426	0,7837	0,6143	0,6143
Хитозан-наночастицы золота (14 сутки)	0,7581	1,3903	0,9683	0,9376	0,9376
Хитозан-наночастицы золота (28 сутки)	1,3296	-0,3186	0,7055	0,4978	0,4978
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (1 сутки)	0,9916	1,6357	0,7999	0,6398	0,6398
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (14 сутки)	0,7281	4,5599	0,9711	0,943	0,9430
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (28 сутки)	0,7123	0,4151	0,7435	0,5529	0,5529

Согласно представленным данным, близкое к 1.0 значение коэффициентов корреляции r_{xy} и равенство $r_{xy}^2 = R^2$ отражает высокую либо очень тесную форму линейной связи зависимых показателей, которая не меняется от развития опухолевого процесса, однако параметры a_0 , a_1 являются зависимыми величинами от сроков контроля глюкозы и лактата в разных группах лабораторных животных (1-е, 14-е, 28 сутки). Соответствие линейной функции поставленной задаче (подбору кривой) подтверждено расчетом значений лактата (\bar{y}_p) по экспериментально установленному содержанию глюкозы (\bar{x}), и сравнением аналитически полученных \bar{y}_p с экспериментально полученными \bar{y} . Низкое значение относительной ошибки расчета ($\max \Delta_{\text{отн}} = 2,5\%$) свидетельствует, что функциональная зависимость линейной структуры $y = a_0x + a_1$ наилучшим образом объединяет большое количество экспериментальных точек $\{x_i, y_i\}$ в разных условиях эксперимента. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5

Экспериментальные и расчетные содержания лактата в крови лабораторных животных до и после лечения опухолевого процесса нанопрепаратами

Условия эксперимента	Лактат $\bar{y} \pm \Delta y$	Глюкоза $\bar{x} \pm \Delta x$	Лактат \bar{y}	Относительная ошибка $\Delta_{\text{отн}} \%$
Интактные	4,54±0,6	4,72±0,69	4,65	2,5
Контрольная группа (1 сутки)	7,2±2,28	3,28±0,76	7,2	0
Контрольная группа (14 сутки)	5,67±1,99	3,7±1,55	5,67	0,007
Контрольная группа (28 сутки)	4,74±1,42	2,98±0,81	4,7	0,003
Хитозан-наночастицы золота (1 сутки)	5,95±1,36	4,3±1,44	5,94	0,0005
Хитозан-наночастицы золота (14 сутки)	3,87±0,46	3,27±0,59	3,866	0
Хитозан-наночастицы золота (28 сутки)	4,92±1,11	3,94±0,59	4,92	0
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (1 сутки)	5,86±0,96	4,26±0,78	5,85	0,001
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (14 сутки)	6,22±0,5	2,28±0,66	6,22	0
Хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд (28 сутки)	2,43±0,87	2,83±0,91	2,433	0

Таким образом, статистическая обработка и анализ экспериментальных показателей глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей до и после лечения хитозан-наночастицами золота и хитозан-наночастицами золота-пчелиный яд показали:

1) между глюкозой и лактатом существует очень тесная корреляционная зависимость, которая не слабеет при развитии опухолевого процесса;

2) форма количественной зависимости лактата (y) от глюкозы (x) хорошо аппроксимируется линейной функцией $y = a_0x + a_1$, объединяющей большое количество точек $\{x_i, y_i\}$ в разных экспериментальных условиях;

3) из представленных нанопрепаратов хитозан-наночастицы золота обладает более сильной противоопухолевой активностью в сравнении с хитозан-наночастицы золота-пчелиный яд, так как в течение месяца быстрее восстанавливает содержание показателей гликолиза жизнедеятельности организма.

Дальнейшее применение методов математического анализа в исследовании количественных отношений глюкозы и лактата в крови животных-опухоленосителей при терапии наноструктурированными препаратами предусматривает построение моделей множественной регрессии, позволяющих расчетным способом прогнозировать развитие опухолевого процесса в зависимости от длительности лечения.

Список сокращений

- [ГЛ]_N – концентрация глюкозы в крови интактных животных
 [ГЛ]_Э – концентрация глюкозы в крови животных-опухоленосителей после лечения хитозан-наночастицами золота или хитозан-наночастицами золота-пчелиный яд
 [ГЛ]_К – концентрация глюкозы в крови животных-опухоленосителей без лечения
 [ЛК]_N – концентрация лактата в крови интактных животных
 [ЛК]_Э – концентрация лактата в крови животных-опухоленосителей после лечения хитозан-наночастицами золота или хитозан-наночастицами золота-пчелиный яд
 [ЛК]_К – концентрация лактата в крови животных-опухоленосителей без лечения

Библиографический список

1. **Алясова, А.В.** Влияние низких терапевтических концентраций озонированного физиологического раствора на терапевтический патоморфоз опухоли в эксперименте / А.В. Алясова [и др.] // Современные технологии в медицине. 2011. №3. С. 5–7.
2. **Гланц, С.** Медико-биологическая статистика / С. Гланц. – М.: Практика, 1999. – 459 с.
3. Европейская конвенция о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях. – Страсбург, 18 марта, 1986.
4. **Колобов, А.В.** Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и пролиферации / А.В. Колобов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1. № 4. С. 415–422.
5. Международные рекомендации по проведению медико-биологических исследований с использованием животных. – М., 1993.
6. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели: учеб. пособие / В.Д. Мятлев [и др.]. – М.: Академия. 2009. – 320 с.
7. **Молчанов, А.М.** Математическое моделирование в биологии / А.М. Молчанов, А.А. Ляпунов, Г.П. Багриновская // Материалы I школы по математическому моделированию сложных биологических систем. – М.: Книга по Требованию. 2013. – 138 с.
8. **Мюррей, Дж.Д.** Математическая биология. Том II. Пространственные модели и их приложения в биомедицине / Дж.Д. Мюррей. – М., – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований. 2011. – 1104 с.
9. Патологическая физиология и биохимия. – М.: Экзамен. 2005. – 480 с.
10. Математические модели в биологии: учеб. пособие / Т.Ю. Плюснина [и др.]. – 2-е изд. доп. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2014. – 136 с.

11. Правила лабораторной практики в Российской Федерации. Приказ МЗ РФ № 267 от 19.06.2003. – М., 2003.
12. Правила проведения работ с использованием экспериментальных животных. Приказ МЗ № 755 от 12.03.1977). – М., 1977.
13. **Ризниченко, Г.Ю.** Лекции по математическим моделям в биологии / Г.Ю. Ризниченко. – М., – Ижевск: Изд. РХД, 2011. – 560 с.
14. **Сидняев, Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие / Н.И. Сидняев. – М.: Юрайт. 2011. С. 7–148.
15. **Хлебцов, Б.Н.** Плазмонно-резонансные наночастицы для биомедицинских приложений: автореф дисс. ... д-ра физ.-мат. наук / Б.Н. Хлебцов. – Саратов. 2010. – 48 с.
16. **Якимович, Н.О.** Синтез и свойства полимерных нанокompозитов на основе метакрилатов и хитозана, содержащих наночастицы золота, и органонеорганических композитов на основе поли(титаноксида): автореф. дисс. канд. хим. наук / Якимович Н.О. – Н.Новгород. 2008. – 28 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

**A.N. Moshkova¹, A.S. Koryagin², E.I. Erlykina³, N.V. Mohnina¹, YA.U. Kozlova¹,
U.I. Tsarapkina¹, U.D. Eremina², V.N. Dydyikina²**

STATISTICAL ANALYSIS OF QUANTITATIVE RELATIONS OF BLOOD GLUCOSE AND LACTATE IN TUMOR-BEARING ANIMALS WITH THE TERAPIA OF NANOSTRUCTURED PREPARATIONS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Nizhny Novgorod state university n.a. N.I. Lobashevsky²,
Nizhny Novgorod state medical academy³

The aim of the study: To evaluate antitumor efficacy of nanostructured drugs in laboratory animals with inoculated alveolar liver cancer. To develop a method of treatment of malignant tumors on the example of the dependent relationships between the concentrations of glucose and lactate in the blood of diseased animals. To identify regularities of changes in the nature of these parameters by means of statistical analysis to predict the development of cancer.

Methodology: We used a statistical analysis of the experimental parameters of glucose and lactate in the blood of rats at different stages of tumor before and after treatment by nanopreparations. The estimation and prediction of antitumor activity of chitosan-gold nanoparticles and chitosan-gold nanoparticles-bee venom, and comparison of the results with intact animals and a group of tumor-bearing animals without treatment were conducted.

Results and field of application: The correlation of glucose and lactate concentration changes with a period of treatment and the kind of injected drug has been revealed. On the basis of mathematical analysis of experimental parameters the effectiveness of the treatment of malignancies by certain nanopreparations was suggested and expected period of treatment was set.

Conclusion: Mathematical analysis of the quantitative relationship between the experimental data of blood glucose and lactate level in animals at inhibition of malignant tumors growth by nanopreparations established a certain direction in their change, which can be taken into account in the development of the optimal method of treatment of cancer.

Key words: tumor process, glucose, lactate, chitosan-gold nanoparticles, chitosan-gold nanoparticles-bee venom, statistical analysis.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Абубакиров Булат Абдрахманович – ведущий инженер отд.3.2 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова»; 8-831-469-20-25

Когтева Людмила Владимировна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8-831-436-03-81

Панков Сергей Васильевич – начальник сектора 3.2.4 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова»; 8-831-469-20-25

Садков Виктор Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р. Е. Алексеева; olga-sadkova@yandex.ru

Лопаткин Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р. Е. Алексеева; lopatkin@nstuedu.com

Львов Анатолий Егорович – канд. техн. наук, старш. науч. сотрудник, нач. отдела 3.2 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А.П.Горшкова»; 8-831-469-20-25

Шишков Глеб Иванович – канд. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8-831-436-82-33

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМ

Мазова Раиса Хаимовна – д-р физ.-мат. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; raissamazova@yandex.ru,

Овчинникова Екатерина Александровна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева eovchinnikova1993@gmail.com,

Ремизов Илья Вячеславович – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева; i.v.remizov@yandex.ru

Колчина Елена Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kolchinaelena@ya.ru,

Куркин Андрей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработ, зав. ка-

федрой «Прикладная математика», науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е.Алексеева; aarurkin@gmail.com

Козелков Андрей Сергеевич – канд. физ.-мат.наук, начальник научно-исследовательской лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», докторант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; A.S.Kozelkov@vniief.ru

Пелиновский Ефим Наумович – д-р физ.-мат.наук, профессор, ведущ. науч. сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, главн. науч. сотрудник отдела нелинейных процессов в геофизике Института прикладной физики РАН; pelinovsky@gmail.com

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Безыкорнов Денис Сергеевич – магистрант, студент НГТУ им. Р. Е. Алексеева; d.bezykornov@gmail.com

Гай Василий Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; iamuser@inbox.ru

Дербасов Максим Олегович – магистр в группе по разработке программного обеспечения, ЗАО Интел\АО; ntfs.hard@gmail.com

Лаптев Алексей Сергеевич – студент Нижегородского радиотехнического колледжа; wolfkonig97@gmail.com

Корелин Олег Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; o_korelin@mail.ru

Сорокоумова Дарья Андреевна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; d.sorokoumova@gmail.com

Сорокоумов Андрей Викторович – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; a40umv@gmail.com

Степаненко Мария Анатольевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р. Е. Алексеева; stepanenkoma@mail.ru

Соколова Элеонора Станиславовна – зав. кафедрой, д-р. техн. наук, профессор НГТУ им. Р. Е. Алексеева; essokolowa@gmail.com

Тюрин Артем Игоревич – магистрант, студент НГТУ им. Р. Е. Алексеева; elizaliym@gmail.com

Шагалова Полина Анатольевна – магистр, инженер НГТУ им. Р.Е.Алексеева; polli-shagalova@yandex.ru

Филяков Андрей Андреевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; andreyfilyakov@gmail.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Баевский Анатолий Аркадьевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; baevsky1990@gmail.com

Желонкин Максим Викторович – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева; poreas@mail.ru

Головин Антон Алексеевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; toshec@mail.ru

Москвичев Александр Алексеевич - доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; paumov@nntu.nnov.ru

Кварталов Александр Рафаилович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; paumov@nntu.nnov.ru

Кочин Анатолий Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 9023088730

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Бородин Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, зам. директора ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; borodinss@mail.ru

Варенцов Андрей Владиславович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vav88@mail.ru

Доронков Денис Владимирович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nevid000@mail.ru

Зинин Александр Владимирович – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; alvzin@outlook.com

Илютина Евгения Михайловна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; berceau@mail.ru

Каратушина Ирина Викторовна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; bvbik@mail.ru

Комаров Алексей Владимирович - магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева; komarovalexej@yandex.ru

Легчанов Максим Александрович – канд. техн. наук, доцент, зам. директора ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

Солдаткин Олег Борисович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; gdanovec@yandex.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlad.sorokin1987@mail.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlad.sorokin1987@mail.ru

Семёнова Елена Игоревна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Elena_toys@mail.ru

Назаров Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник ФГУП федерального научно-производственного центра «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»; nazarov52@mail.ru.

Полозкова Екатерина Николаевна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; polozkova-ekaterina@yandex.ru

Попов Евгений Александрович - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.nnov.ru.

Рожкова Мария Сергеевна – инженер ФГУП федерального научно-производственного центра «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»; trankvilizzator@mail.ru.

Фарафонов Владимир Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; +7 (831) 436-80-23

Хробостов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; khrobostov@nntu.nnov.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Беляков Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор, начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е.Алексеева; nauka@nntu.nnov.ru

Береснев Павел Олегович – лаборант НГТУ им. Р.Е.Алексеева; Nord13@mail.ru

Беляев Александр Михайлович – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е.Алексеева; инженер ООО «Автол» (Н. Новгород); myhome2010@mail.ru

Зезюлин Денис Владимирович – канд. техн. наук, ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е.Алексеева; balakhnaman@gmail.com

Колотилин Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.nnov.ru

Куркин Андрей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработ, зав. кафедрой «Прикладная математика», науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е.Алексеева; aarurkin@gmail.com

Михеев Артур Владимирович – магистрант НГТУ им. Р.Е.Алексеева; micheev-av@mail.ru

Макаров Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; makvl2010@gmail.com

Папунин Алексей Валерьевич – ассистент НГТУ им. Р.Е.Алексеева; вед. специалист управления делами ООО «Управляющая компания «Группа ГАЗ» (Н. Новгород); lexalenia@rambler.ru

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Болотин Александр Алексеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им.Р.Е. Алексеева; alexanderbolotin@mail.ru.

Конурин Денис Владимирович – инженер-испытатель 2 категории ОКБМ им. И.И. Африкантова; d.v.konurin@okbm.nnov.ru

Пичков Сергей Николаевич – д-р техн. наук, профессор, начальник лаборатории прочности и систем диагностики ОКБМ им. И.И. Африкантова; 88312469593

Шишулин Денис Николаевич – канд. техн. наук, начальник бюро лаборатории прочности и систем диагностики ОКБМ им. И.И. Африкантова; 9200093108

Уваров Андрей Иванович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; smk@nntu.nnov.ru,

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Бадугин Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; era131@nntu.nnov.ru

Бычков Евгений Викторович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; era131@nntu.nnov.ru

Ваняев Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vanyaev.w@mail.ru

Дарьенков Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент, директор ИНЭЛ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae@nntu.nnov.ru

Иванычев Кирилл Николаевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kivanych@gmail.ru

Кралин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; toe@nntu.nnov.ru

Карпов Ярослав Анатольевич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; yaroslav_karpov@mail.ru

Коротков Сергей Александрович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; sergey.2korotkov.1990@mail.ru

Комраков Дмитрий Алексеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae@nntu.nnov.ru

Мельников Владимир Леонидович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; era131@nntu.nnov.ru

Смирнов Евгений Олегович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; era131@nntu.nnov.ru

Соколов Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; era131@nntu.nnov.ru

Тюриков Михаил Павлович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
toe@nntu.nnov.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Балан Светлана Андреевна – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
mto@nntu.nnov.ru

Жеребцов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»; (3812) 76-07-42

Лобов Евгений Васильевич – зам. генерального директора ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ОНИИТМ), инженер; 8-962-052-87-83

Мальцев Илья Михайлович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
Maltcev@nntu.nnov.ru

Чернышов Евгений Александрович – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
mto@nntu.nnov.ru

Ульянов Владимир Андреевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; mto@nntu.nnov.ru

Шигин Вячеслав Евгеньевич – ст. преподаватель, ведущ. программист НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
mto@nntu.nnov.ru

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Ганкевич Ксения Анатольевна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Иванов Алексей Андреевич – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Крюкова Тамара Михайловна – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kryukova-tamara@rambler.ru

Колесов Кирилл Игоревич – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Каракушьян Наталья Александровна – директор ООО «РИСК»

Егорова Наталья Ивановна - ст. преподаватель Национального исследователь-

ского университета «Высшая Школа Экономики – Нижний Новгород»;
negorova@hse.ru

Плеханова Анна Феликсовна – д-р экон. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева
Митякова Ольга Игоревна – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
ued@nntu.nnov.ru

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

Казакова Валерия Игоревна – канд. филол. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; landmesser@list.ru

Смирницкий Александр Евгеньевич – канд. ист. наук, доцент Нижегородского государственного университета им. К. Минина (г. Н. Новгород);
ya.alex-smir1974@yandex.ru

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Долгов Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева);
mirevm@mail.ru

Волков Валерий Леонидович – канд. техн. наук, доцент Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева);
vv1_arzamas@mail.ru

Денисов Роман Андреевич – начальник отдела новых разработок ООО "Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро";
romildo@yandex.ru

Жидкова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доцент Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева);
natazh80@yandex.ru

Миркин Борис Абрамович – канд. техн. наук, доцент Арзамасского политехнического института (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева);
mirkin.boris2012@yandex.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ
И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ**

Громов Евгений Михайлович – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;
egromov@hse.ru

Галкина Екатерина Дмитриевна – инженер-программист ООО «Телека»;
ekaterinagalka@gmail.com

Дыдыкина Вера Николаевна – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
vm@nntu.nnov.ru

Тютин Виктор Владимирович – Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, канд. физ.-мат. наук, доцент, зам. зав. кафедрой математики;
vtutin@hse.ru

Мошкова Альбина Николаевна – д-р биол. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексева; vm@nntu.nnov.ru

Мохнина Наталья Вячеславовна - канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексева; vm@nntu.nnov.ru

Ерлыкина Елена Ивановна – д-р биол. наук, профессор Нижегородской государственной медицинской академии Министрства России; vm@nntu.nnov.ru

Ерёмина Юлия Дмитриевна – аспирант Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;
vm@nntu.nnov.ru

Корягин Александр Сергеевич – д-р биол. наук, профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского; vm@nntu.nnov.ru

Козлова Яна Юрьевна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексева; vm@nntu.nnov.ru

Лещева Светлана Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» НГТУ им. Р.Е. Алексева, 257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

Лукичев Никита Сергеевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексева; vm@nntu.nnov.ru

Рыков Виталий Евгеньевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексева;
rikov_vitalic@gmail.ru

Царапкина Юлия Игоревна – студент НГТУ им. Р.Е. Алексева;
vm@nntu.nnov.ru

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.

**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(920)00-37-877
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.

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

№ 3 (110)

Редакторы: Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова
Технический редактор Т.П. Новикова

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@ntu.nnov.ru

Подписано в печать 20.09.2015. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 42,75. Тираж 300 экз. Заказ 622.

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