

**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**

№ 2 (109)

Нижний Новгород 2015

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева / НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2015. № 2 (109). – 301 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. Groшев, 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. Алексева)

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,
Хамильтон, Онтарио, Канада

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

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 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 СМИ
в Роскомнадзоре ПИ № ФС 77-56417

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

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

№ 2 (109)

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), T.P. Novikova (Technical 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. Mikhalenko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

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

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

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

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

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

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

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

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

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

Grinberg Ruslan Semenovich

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

Babanov Nikolai Iurevich

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

Shiryaev

Mikhail Vissarionovich

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

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

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

Mitiakov Sergei Nikolaevich

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

Kurkin Andrey Aleksandrovich

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

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

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

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

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

Ryndyk Alexander Georgievich

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

Raevski Sergei Borisovich

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

Koshelev Oleg Sergeevich

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

Kulepov Viktor Fedorovich

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Зими́на С.В. Флуктуации весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму LMS с квадратичным ограничением.....	11
Иванов А.Е., Львов А.Е., Шишков Г.И. Оценка влияния параметров поглощающих пластин и разброса диаметров центральных волноводов на ослабление поляриационных аттенуаторов.....	18
Ивойлова М.М. Модель коаксиального керамического резонатора с учетом шероховатости токопроводящих поверхностей.....	29
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	40
Шамин Р.В., Юдин А.В., Тихонов Д.Е. О законе распределения времени ожидания волн-убийц.....	40
Козелков А.С., Куркин А.А., Шарипова И.Л., Курулин В.В., Пелиновский Е.Н., Тятюшкина Е.С., Мелешкина Д.П., Лашкин С.В., Тарасова Н.В. Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью.....	49
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	70
Поляков Д.В., Попов А.И. Генератор монотонных хеш-функций для ассоциативного массива.....	70
Логанов С.В. Решение проблемы записи составных объектов в БД.....	82
Лазарев В.А. Методика разработки средств интеллектуальной поддержки автоматизированной системы тестирования программных комплексов.....	89
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	98
Конищев К.Б., Конищев Б.П. Оценка сопротивляемости конструкционных и высоколегированных сталей образованию горячих трещин при сварке.....	98
Пахомов Д.С., Гребнева Т.Н. Особенности нормирования операций для станков с ЧПУ.....	104
Чуркин М.Г., Поздышев А.И., Мальцев И.В. Разработка управляющих программ в системе siemens nx для обработки сложных пространственных конструкций агрегатов летательных аппаратов.....	113
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	122
Бородина В.Е., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Полозкова Е.Н., Пронин А.Н., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д. Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР АЭС «темелин» с различными конструкциями ТВСА.....	122
Дмитриев С.М., Комаров А.В., Фарафонов В.А. Применение кольцевых теплообменников элементов в реакторах ВВЭР со сверхкритическими параметрами.....	129
Баринов А.А., Дмитриев С.М., Игнатов Е.Д., Табекин А.А., Хлюнев А.А., Хробостов А.Е. Исследование гидродинамических процессов при турбулентном те-	

чении среды с помощью метода матричной кондуктометрии.....	141
Заборонкова Т.М., Яшина Н.Ф. Рассеяние электромагнитных волн на анизотропных плоских структурах.....	149
Yashina N.F., Zaboronkova T.M. Nonlinear interaction of microwave electromagnetic waves guided by the anisotropic composite cylinder.....	155
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	162
Михеев А.В., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В. Кострова З.А. Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения.....	162
Зубов П.П., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Колотилин В.Е., Куркин А.А. Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров.....	170
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	177
Захаров Л.А., Тарасов А.Н., Захаров И.Л., Дегтярев А.В. Экспериментально-теоретические исследования технико-экономических показателей атмосферных поршневых двигателей внутреннего сгорания и анализ отечественного опыта.....	177
Лобастов В.П., Зеличенко Е.В., Скворцов А.В. Рекомендации по вопросам прочности судов «река-море» плавания по классификации резолюции №61 ЕЭК ООН....	189
Семашко П.В., Зеленов С.Н., Земсков И.В. Анализ технического состояния турбоагрегата ТЭЦ в межремонтный период.....	198
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	203
Серебряков А.В., Титов В.Г., Чернов Е.А., Шахов А.В. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей.....	203
Соснина Е.Н., Кралин А.А., Асабин А.А. Разработка имитационной модели параллельного трансформатора фазоповоротного устройства.....	210
Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Соколов В.В. Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения.....	217
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	226
Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Кузнецов С.В., Швецов В.Д., Белявский Г.И. Влияние модифицирующих добавок на образование графита в высокопрочном чугуна и усадочные дефекты в отливках.....	226
Слузов П.А., Седунов В.К. Об эффективности модифицирования и микролегирования чугуна.....	234
Тумакова Н.С., Тихонов В.П., Смирнов А.С., Самохвалов С.Г., Большаков А.А., Назаров В.Г., Леушин И.О. Исследование литейных свойств супердуплексной и серийной аустенитной стали, разработка технологии и изготовление опытных отливок корпусов арматуры.....	242
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	251

Козлов В.Я., Паутов А.Н., Толкачев И.Н. Исследование устойчивости упругой квадратной пластины с подкрепленным эллиптическим вырезом.....	251
Галкин В.М., Ерофеева Л.Н., Лещева С.В., Сухов В.И. Ортогональная система многочленов с весом $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$	256
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ	261
Дубик Е.А., Басова Л.Н. Инвестиционная деятельность в инновационной экономике России.....	261
Г.А. Морозова Роль государственного управления в активизации инновационной деятельности.....	268
Маркитанов М.Ю. Принятие оптимальных решений в условиях антагонизма интересов. практическая интерпретация.....	271
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ	283
Крылова А.В., Мишин В.В., Рыбкина О.С., Фоменков А.А., Яскевич В.М. Выборные кампании в Законодательное собрание Нижегородской области и Городскую думу города Нижнего Новгорода.....	283
Полусмак Т.Л., Симонов А.Л., Торопкин А.И., Шустова Ю.В. Политическая история Горьковской-Нижегородской области на рубеже 1980-х – 1990-х годов: проблемы источниковедения и историографии.....	288

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Zimina S.V. Weight vector jitter in the neural network with lms algorithm tuning with square constraint.....	11
Ivanov A.E., Lvov A.E., Shishkov G.I. Evaluation of the influence of parameters absorbing resistive plates and the diameters of the central waveguides on the polarization attenuators weakening.....	18
Ivoylova M.M. Ceramic coaxial resonator model taking into account conductive surfaces roughness.....	29
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	40
R.V. Shamin, A.V. Yudin, Tikhonov D.E. On the law of distribution of the rogue waves waiting time.....	40
Kozelkov A.S., Kurkin A. A., Sharipova I.L., Kurulin V.V., Pelinovsky E.N., Tyatyushkina E.S., Meleshkina D.P., Lashkin S.V., Tarasova N.V. Minimal basis tasks for validation of methods of calculation of flows with free surfaces.....	49
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	70
Polyakov D.V., Popov A.I. Generator of the monotone hash function for an associative array	70
Loganov S.V. Saving composit bussiness objects in relation database.....	82
Lazarev V.A. Tools design methodology for intellectual support of automated software testing system.....	89
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	98
Konishchev K.B., Konishchev B.P. Structural and high-alloy steel resistance evaluation for hot cracking during welding.....	98
Pahomov D.C., Grebneva T.N. Features of setting of norms of operations for machine-tools with numerical control.....	104
Tchourkin M.G., Pozdyshev A.I., Malcev I.V. Development of control programs in the siemens nx to processing difficult dimensional constructions aircraft components.....	113
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	122
Borodina V.E., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Polozkova E.N., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D. Researches of interassembly interaction of coolant in wwer reactor core of atomic power station “temelin” with various constructions TVSA.....	122
Dmitriev S. M., Komarov A. V., Farafonov V. A. The use of annular fuel elements in vver reactors with supercritical parameters.....	129
Barinov A.A., Dmitriev S.M., Ignatov E.D., Tabekin A.A., Hljunev A.A., Khrobostov A.E. Research of hydrodynamic processes in turbulent flow using the method of matrix conductometry.....	141
Zaboronkova T.M., Yashina N.F. Scattering of electromagnetic waves by anisotropic plane structures.....	149

Yashina N.F., Zaboronkova T.M. Nonlinear interaction of microwave electromagnetic waves guided by the anisotropic composite cylinder.....	155
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	162
Miheev A.V., Belyakov V.V., Zezyulin D.V., Makarov V.S., Kostrova Z. A. Estimating the strain of wheels fitted non-pneumatic tyre by computer simulation of vertical static loading.....	162
Zubov P.P., Makarov V.S., Zeziulin D.V., Belyakov V.V., Kolotilin V.E., Kurkin A.A. Overview of existing structures of articulated tracked vehicles and advice in choosing their parameters.....	170
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY	177
Zakharov L.A., Tarasov A.N., Zakharov I.L., Degtyarev A.V. Experimental and theoretical studies technical and economic indicators atmospheric internal combustion piston engine and analysis of domestic experience.....	177
Lobastov V., Zelichenko E., Skvortsov A. Recommendations concerning the strength of «river-sea» navigation ships on the resolution №61 unece classification.....	183
Semashko P.V., Zelenov S.N., Zemskov I.V. The analysis of the technical state of the turbine unit of tets (heat and power plant) in the time between overhauls.....	198
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	203
Serebryakov A.V., Titov V.G., Chernov E.A., Shahov A.V. Differentiation loads in power systems autonomous consumers.....	203
Sosnina E.N., Kralin A.A., Asabin A.A. Development of simulation model of phase shifting parallel transformer	210
Khvatov O.S., Daryenkov A.B., Samoyavchev I.S., Sokolov V.V. Electric power stations of autonomous objects based on a variable speed diesel generator sets.....	217
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	226
Zinoviev Yr.A., Kolpakov A.A., Kuznetsov S.V., Shvetsov V.D., Belyavsky G.I. Creating the base technology of producing same-heat low-sulfur and high-sulfur irons.....	226
Sluzov P.A., Sedunov V.K. About the effectiveness of modification and microalloying of iron.....	234
Tumakova N., Tikhonov V., Smirnov A., Samokhvalov S., Bolshakov A., Nazarov V., Leushin I. Research casting properties of super duplex and serial austenitic steel, technology development and manufacturing of castings, valve bodies.....	242
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	251
Kozlov V.J., Pautov A.N., Tolkachev I.N. The study of the stability of the elastic square plate with supported elliptic cutout.....	251
Anikovskiy V.V., Erofeeva L.N., Leshcheva S.V. The orthogonal polynomials system with the weight $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$	256

ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	261
Dubik E.A., Basova L.N. Investing activities of innovation Russia.....	261
Morozova G.A. Role of public administration in innovative activities.....	268
Markitanov M.Yu. Making optimal decisions in conditions of antagonism of interests. Practical interpretation.....	271
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	283
Krylova A.V., Mishin V.V., Rybkina O.S., Fomenkov A.A., Yaskevich V.M. The elections to the legislative assembly of nizhny novgorod region and city дума of Nizhny Novgorod.....	283
Polusmak T.L., Simonov A.L., Toropkin A.I., Shustova Yu.V. The political history of Gorky - Nizhny Novgorod region at the turn of 1980-1990: the problems istechology and historiography	288

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК: 621.396.6

С.В. Зимина

ФЛУКТУАЦИИ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, НАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ ПО АЛГОРИТМУ LMS С КВАДРАТИЧНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Приведены результаты статистического анализа с учетом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением на усиление полезного сигнала. Методами теории возмущений по коэффициенту адаптации алгоритма, который будем считать малым, в первом (так называемом «борновском») приближении найдено выражение корреляционной функции выходного сигнала. Показано, что учет флуктуаций весовых коэффициентов приводит к искажениям выходного сигнала искусственной нейронной сети. Полученные результаты позволяют выбирать величину коэффициента адаптации алгоритма настройки искусственной нейронной сети, приводящей к оптимальному соотношению между скоростью настройки сети и точностью настройки.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, флуктуации весовых коэффициентов, алгоритм минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением.

Введение

Флуктуации весовых коэффициентов в адаптивных системах определяют скорость и точность настройки таких систем. Одним из вариантов адаптивных систем являются искусственные нейронные сети (ИНС) [1-2]. Флуктуации настраиваемых весовых коэффициентов, возникающие вследствие статистической связи весовых коэффициентов и входного сигнала ИНС, искажают ее статистические характеристики и, в частности, выходной сигнал искусственной нейронной сети. В работах [3-6] был проведен статистический анализ функционирования ИНС, настраиваемых по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба, с учетом флуктуаций весовых коэффициентов. Было показано, что флуктуации приводят к искажениям выделяемого искусственной нейронной сетью полезного сигнала, причем в искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба, величина искажений увеличивается по мере увеличения числа слоев сети.

В последнее время внимание исследователей снова начинает привлекать классический алгоритм минимизации среднего квадрата ошибки (алгоритм МСКО или алгоритм LMS), который одним из первых был предложен еще Уидроу. Однако применение алгоритма LMS встретило трудности, выражающиеся в неконтролируемом подавлении полезного сигнала в случае, когда помеха коррелирована с сигналом. По этой причине в настоящее время интерес вызывают в первую очередь различные современные модификации LMS алгоритма, не содержащие этого недостатка, и в частности, алгоритм LMS с квадратичным ограничением на усиление полезного сигнала [7]. Представляет интерес исследование влияния флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети,

настраивающейся по этому алгоритму. В данной работе представлен статистический анализ корреляционной функции выходного сигнала произвольного слоя искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением, полученной с учётом флуктуаций весовых коэффициентов.

1. Постановка задачи

Рассмотрим работу искусственной нейронной сети, настраивающейся по LMS алгоритму с квадратичным ограничением. Настройка вектора весовых коэффициентов $\vec{W}_i^\alpha(k+1)$ i -ого искусственного нейрона слоя α такой ИНС в момент времени $k+1$ описывается уравнением следующего вида:

$$\vec{W}_i^\alpha(k+1) = \vec{W}_i^\alpha(k) - \mu \cdot [\vec{Z}^{\alpha-1}(k) \cdot F[(\vec{Z}^{\alpha-1}(k))^H \vec{W}_i^\alpha(k)] + \frac{|F[(\vec{Z}^{\alpha-1}(k))^H \vec{W}_i^\alpha(k)]|^2}{|F[\vec{S}^H \vec{W}_i^\alpha(k)]|^2} \vec{S} \cdot F[\vec{S}^H \vec{W}_i^\alpha(k)]] \quad (1)$$

Здесь $\vec{Z}^{\alpha-1}(k)$ - вектор выходного сигнала слоя $\alpha-1$ искусственной нейронной сети в момент времени k ; μ - коэффициент адаптации LMS алгоритма с квадратичным ограничением; $\vec{S} = [S_1, S_2, \dots, S_N]^T$ - вектор полезного сигнала, H - операция эрмитовского сопряжения.

В выражении (1) $\vec{Z}^{\alpha-1}(k)$ - входной сигнал i -го нейрона слоя α , являющийся также вектором выходного сигнала слоя $\alpha-1$. Выходной сигнал i -го нейрона слоя α $Z_i^\alpha(k)$ может быть записан в виде:

$$Z_i^\alpha(k) = F \left[\sum_{q=1}^N Z_q^{\alpha-1}(k) W_{iq}^\alpha(k) \right] = F[y_{ai}(k)] = \sum_{l=1}^{N_l} a_l \cdot y_{ai}^l(k) = \vec{A}^T \vec{Y}_{ai}(k),$$

где $F[\]$ - нелинейная активационная функция рассматриваемого искусственного нейрона, a_l - коэффициенты разложения нелинейности F в ряд Вольтерра [8], $y_{ai}(k)$ - выходной сигнал линейной части i -го нейрона слоя α . $\vec{A} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{N_l}]^T$ - вектор коэффициентов разложения функции $F[\]$ в ряд Вольтерра, а j -й коэффициент разложения может быть представлен формулой $a_j = \frac{1}{j!} F^{(j)}[y=0]$. Таким образом, первый коэффициент разложения в ряд

Вольтерра пропорционален первой производной нелинейной активационной функции, находящейся на выходе рассматриваемого искусственного нейрона.

$\vec{Y}_{ai}(k) = [y_{ai}(k) \ y_{ai}^2(k) \ \dots \ y_{ai}^{N_l}(k)]^T$ - вектор степеней выходного сигнала линейной части искусственного нейрона i , принадлежащего слою α .

В статье предполагается, что все искусственные нейроны в описываемой искусственной нейронной сети имеют одну и ту же нелинейную функцию $F[\]$ на выходе. Поэтому при обобщении результатов от одного искусственного нейрона на слой, а потом и на произвольное число слоев коэффициенты разложения нелинейной функции в ряд Вольтерра будут одни и те же.

Алгоритм настройки (1) описывает в большей степени своего рода каскадное соединение искусственных нейронов, чем единую искусственную нейронную сеть, поскольку весовые коэффициенты каждого отдельного нейрона зависят только от собственных значений в предыдущий момент времени и не связаны непосредственными математическими отношениями с весовыми коэффициентами других искусственных нейронов. Тем не менее, косвенное

влияние весовых коэффициентов различных искусственных нейронов друг на друга существует и осуществляется через выходные сигналы данных элементов сети, что также видно из формулы (1).

Будем предполагать, что рассматриваемая искусственная нейронная сеть является узкополосной. Корреляционную матрицу входных сигналов узкополосной ИНС любого искусственного нейрона входного слоя данной сети можно представить в виде:

$$\mathbf{R}_{xx}(k, k+n) \equiv \langle \vec{X}^*(k) \vec{X}^T(k+n) \rangle = \mathbf{R}_{xx} r^{|n|}, \quad (2)$$

где $\vec{X}(k)$ - вектор полезного сигнала в момент времени k ; * и T - операции комплексного сопряжения и транспонирования; r - коэффициент корреляции между отсчётами входного сигнала; \mathbf{R}_{xx} - пространственная часть корреляционной матрицы входных сигналов.

Аналогичную форму в виде произведения пространственной и временной частей имеют также корреляционные матрицы входных сигналов искусственных нейронов любого слоя искусственной нейронной сети, различается только вид пространственной части \mathbf{R}_{xx} . Необходимо отметить, что данная корреляционная матрица имеет различный вид в зависимости от номера слоя искусственной нейронной сети. Так, для всех скрытых слоев в частном случае одинаковой помеховой обстановки, подаваемой на все нейроны входного слоя, который рассматривается в данной работе, корреляционная матрица будет иметь в качестве всех своих элементов единицы во всех скрытых слоях ИНС. Во входном слое эта матрица будет равна корреляционной матрице входных сигналов искусственной нейронной сети.

Будем ограничиваться для простоты и в силу существенно нелинейного вида представленного алгоритма (1) первым слагаемым при разложении нелинейных функций на выходе искусственных нейронов в ряд Вольтерра, т.е. только первой производной активационной функции. Добавление при разложении в ряд слагаемых более высокого порядка усложняет анализ, не внося новой информации в выводы.

Будем искать статистические характеристики описанной нейронной сети с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов в предположении, что между весовым вектором и вектором входных сигналов существует негауссовская статистическая зависимость. Это наиболее общий случай такой зависимости между данными векторами. С этой целью необходимо на первом этапе анализа найти статистические характеристики отдельного нейрона с учётом флуктуаций весового вектора, а затем обобщить полученные результаты на искусственную нейронную сеть и получить соответствующие рекуррентные формулы.

2. Корреляционная функция выходного сигнала искусственного нейрона, настраиваемого по алгоритму LMS с квадратичным ограничением

Методами теории возмущений по малому параметру μ в первом, так называемом «борновском» приближении, было получено выражение для корреляционной функции выходного сигнала искусственной нейронной сети, настраиваемой по LMS алгоритму с квадратичным ограничением, с учётом флуктуаций весовых коэффициентов:

$$K_Z(m, m+n) = A_1 + B_1 + C_1 + D_1. \quad (3)$$

Здесь коэффициенты корреляционной функции (3) могут быть представлены в виде:

$$A_1 = a_1^2 \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{xx} \vec{W}_{CT} \cdot r^{|n|}, \quad (4)$$

$$B_1 = \mu^2 a_1^4 \frac{M^{-1}}{1-r^2} r^{|n|} Sp(\mathbf{R}_{xx}) \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{SS}^H \mathbf{R}_{xx} \vec{W}_{CT} + \mu^2 a_1^4 \frac{M^{-1} r^2}{1-r^2} r^{|n|} Sp(\mathbf{R}_{xx}) \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{R}_{SS} \vec{W}_{CT}, \quad (5)$$

$$C_1 = \mu^2 a_1^4 r \frac{1+r-r^n}{(1-r)^2} r^{|n|} \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}^3 \vec{W}_{CT} + \mu^2 a_1^4 \frac{r}{(1-r)^2(1+r)} r^{|n|} Sp(\mathbf{R}_{XX}) \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}^2 \vec{W}_{CT} +$$

$$+ \mu^2 a_1^4 r^{|n|} \left\{ \frac{2}{(1-r^2)^2} + \frac{1-r^{2n+2}}{1-r^2} \right\} Sp(\mathbf{R}_{XX}^2) \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX} \vec{W}_{CT} \quad (6)$$

$$D_1 = \mu^2 a_1^4 \frac{r^{|n|+3}}{1-r^2} \left\{ \frac{1-r^n}{1-r^2} + \frac{1}{1-r} \right\} Sp(\mathbf{R}_{XX}^2) \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}^2 \vec{W}_{CT}. \quad (7)$$

\vec{W}_{CT} - постоянный стационарный весовой вектор произвольного искусственного нейрона первого слоя искусственной нейронной сети, a_1 - первый коэффициент разложения нелинейной функции $F[]$ в ряд Вольтерра, M^{-1} - постоянный коэффициент, возникающий при усреднении LMS алгоритма с квадратичным ограничением.

Из выражений (4)–(7) видно, что влияние флуктуаций весовых коэффициентов проявляется в появлении в выражении корреляционной функции слагаемых, пропорциональных коэффициенту адаптации μ алгоритма настройки ИНС, которые искажают вид полезного сигнала, выделяемого искусственной нейронной сетью. Можно также видеть, что величина влияния флуктуаций имеет второй порядок малости по коэффициенту адаптации μ , т.е. достаточно малая.

Из формул (4)–(7) также можно видеть, что представленные слагаемые корреляционной функции выходного сигнала зависят также от величины первого коэффициента разложения в ряд Вольтерра нелинейной функции, которая присутствует на выходе искусственного нейрона. В частном случае наиболее распространенного вида логистической нелинейной функции или сигмоида $f(x) = \frac{1}{1+e^{-px}}$ [9] первый коэффициент разложения равен $a_1 = p/4$, где величина p определяет крутизну сигмоида. При $p = 0$ сигмоид вырождается в горизонтальную линию на уровне 0.5, при увеличении p сигмоид приближается к виду функции единичного скачка [9]. Для практических задач вполне достаточно брать величину $p = 0.5 \div 1$, что приводит к тому, что $a_1^4 = 1/4^4 = 1/256 = 0.0039$. Иными словами, «флуктуационные» слагаемые будут малы не только в силу малости коэффициента адаптации, а также и по причине малости коэффициента a_1^4 .

3. Корреляционная функция выходного сигнала искусственного нейрона, принадлежащего произвольному слою ИНС

Обобщая данный результат последовательно на второй, третий и т.д. слои можно получить выражение для корреляционной функции выходного сигнала i -ого искусственного нейрона, принадлежащего слою α искусственной нейронной сети, настраиваемой по LMS алгоритму с квадратичным ограничением, с учётом флуктуаций весового вектора:

$$K_\alpha(m, m+n) = \sum_{i=1}^4 A_i K_{\alpha-1}^i(m, m+n) = \sum_{i=1}^4 A_{\alpha i} \left(\sum_{j=1}^4 A_{\alpha-1j} K_{\alpha-2}^j(m, m+n) \right)^i =$$

$$= \sum_{i=1}^4 A_{\alpha i} \left(\sum_{j=1}^4 A_{\alpha-1j} \left(\sum_{k=1}^4 A_{\alpha-2k} K_{\alpha-3}^k(m, m+n) \right)^j \right)^i = \quad (8)$$

$$= \sum_{i_1=1}^4 A_{\alpha i_1} \left(\sum_{i_2=1}^4 A_{\alpha-i_2} \left(\sum_{i_3=1}^4 A_{\alpha-2i_3} \cdots \left(\sum_{i_\alpha=1}^4 A_{1i_\alpha} K_1^{i_\alpha}(m, m+n) \right)^{i_{\alpha-1}} \cdots \right)^{i_2} \right)^{i_1}$$

Здесь коэффициенты $A_{\alpha i}$, возникшие вследствие учета флуктуаций весовых коэффициентов, имеют вид:

$$A_{\alpha 1} = a_1^2 (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{B} (\vec{W}_{CTi}^\alpha) r^{|n|}; \quad (9)$$

$$A_{\alpha 2} = \mu^2 a_1^4 Sp(\mathbf{B}) \frac{1}{1-r^2} \times \left\{ M^{-1} (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{R}_{SS}^H \mathbf{B} (\vec{W}_{CTi}^\alpha) + M^{-1} r^2 (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{B} \mathbf{R}_{SS} (\vec{W}_{CTi}^\alpha) + \frac{r}{1-r} (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{B} (\vec{W}_{CTi}^\alpha) \right\} r^{|n|}; \quad (10)$$

$$A_{\alpha 3} = \mu^2 a_1^4 \times \left\{ \frac{r(1+r-r^n)}{(1-r)^2} + \frac{2+(1-r^2)(1-r^{2n+2})}{(1-r^2)^2} Sp(\mathbf{B}^2) \right\} (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{B} (\vec{W}_{CTi}^\alpha) r^{|n|}; \quad (11)$$

$$A_{\alpha 4} = \mu^2 a_1^4 \frac{r^3(2+r-r^{|n|})}{(1-r^2)^2} Sp(\mathbf{B}^2) (\vec{W}_{CTi}^\alpha)^H \mathbf{B}^2 (\vec{W}_{CTi}^\alpha) r^{|n|}. \quad (12)$$

Здесь \vec{W}_{CTi}^α - постоянный стационарный весовой вектор искусственного нейрона i , принадлежащего слою α искусственной нейронной сети.

Матрица \mathbf{B} зависит от того, коэффициенты какого слоя вычисляются. Для входного слоя искусственной нейронной сети эта матрица равна корреляционной матрице входных сигналов, для последующих слоев, в силу постановки задачи, матрица \mathbf{B} имеет все элементы, равные единице.

Из выражений (8) – (12) следует, что влияние флуктуаций весовых коэффициентов проявляет себя в том, что корреляционная функция выходного сигнала предыдущего слоя входит в выражение для корреляционной функции последующего слоя как полином четвертой степени, коэффициентами в котором служат обусловленные флуктуациями слагаемые второго порядка малости по коэффициенту адаптации μ . От слоя к слою ИНС это явление повторяется, и результирующий вид корреляционной функции выходного сигнала произвольного слоя ИНС представляет из себя набор вложенных одна в другую функций, так что запись результата через все слои искусственной нейронной сети содержит наибольшее число вложенных друг в друга функций. Если говорить о максимальной степени, в которой войдет корреляционная функция выходного сигнала первого слоя ИНС в формулу корреляционной функции произвольного слоя сети, то она пропорциональна $4^{\alpha-1}$.

Иными словами, если учесть, что коэффициенты в каждом полиноме в корреляционной функции содержат коэффициент адаптации во второй степени, который полагается малым, то можно ожидать, что искажения выделяемого ИНС полезного сигнала вследствие флуктуаций, хоть и сложны по форме, но вклад их будет уменьшаться по мере увеличения числа слоев сети, т.к. степень при коэффициенте адаптации во «флуктуационных» слагаемых также будет расти.

Для сравнения приведем выражение для корреляционной функции выходного сигнала i -го нейрона, принадлежащего слою α искусственной нейронной сети, полученное без учета флуктуаций весовых коэффициентов:

$$\begin{aligned} K_\alpha(m, m+n) &= A_{\alpha 1} K_{\alpha-1}(m, m+n) = A_{\alpha 1} A_{\alpha-1} K_{\alpha-2}(m, m+n) = \\ &= A_{\alpha 1} A_{\alpha-1} A_{\alpha-2} K_{\alpha-3}(m, m+n) = A_{\alpha 1} A_{\alpha-1} A_{\alpha-2} \cdots A_{11} \cdot 1 = \\ &= \prod_{j=1}^{\alpha} A_{j1} = a_1^{2\alpha} r^{\alpha|n|} \prod_{j=1}^{\alpha} (\vec{W}_{CTi}^j)^H \mathbf{B}_j (\vec{W}_{CTi}^j) \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь

$$\mathbf{B}_j = \begin{cases} \mathbf{R}_{xx}, & j = 1 \\ \mathbf{E}, & j = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (14)$$

Верхние индексы в обозначениях весовых коэффициентов являются номером слоя, а не степенью.

Из сравнения выражений (8) и (13) видно, что формула выходной мощности, полученная без учета флуктуаций весовых коэффициентов, существенно упрощается и содержит произведение выходных мощностей искусственных нейронов всех слоев ИНС. Из формулы (13) также можно видеть, что без учета флуктуаций корреляционная функция выходного сигнала каждого последующего слоя ИНС перестает быть полиномом, составленным по степеням корреляционной функции выходного сигнала предыдущего слоя искусственной нейронной сети, и связана с ней линейной зависимостью. Кроме того, формула (14) не содержит «флуктуационных» слагаемых, пропорциональных коэффициенту адаптации, а зависит только от первого коэффициента разложения нелинейной функции F на выходе искусственного нейрона в ряд Вольтерра.

Заключение

Таким образом, статистический анализ работы искусственной нейронной сети, настраиваемой по LMS алгоритму с квадратичным ограничением на усиление полезного сигнала, с учетом флуктуаций весовых коэффициентов показал, что они приводят к искажению выделяемого искусственной нейронной сетью сигнала. По мере роста числа слоев искусственной нейронной сети происходит накопление искажений, вносимых флуктуациями в выделяемый сетью полезный сигнал, однако величина данных искажений сдерживается тем, что увеличивается также и степень коэффициента адаптации, которому пропорциональны «флуктуационные» слагаемые, а коэффициент адаптации обычно бывает значительно меньше единицы. При практическом использовании такой искусственной нейронной сети необходимо добиваться оптимального соотношения между скоростью настройки сети (скорость настройки увеличивается при увеличении коэффициента адаптации) и точностью настройки ИНС (минимальным уровнем искажений, вносимых флуктуациями весовых коэффициентов в выделяемый сетью сигнал, что достигается при уменьшении коэффициента адаптации). Выбор зависит от задач конкретного использования искусственной нейронной сети.

Библиографический список

1. Haykin S. Neural Networks: A comprehensive Foundation. - New York: Macmillan College Publishing Company, 1994.
2. **Галушкин, А.И.** Теория нейронных сетей / А.И. Галушкин. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.
3. **Зимина, С.В.** Статистические характеристики искусственной нейронной сети с дискретным градиентным алгоритмом настройки с учётом флуктуаций весовых коэффициентов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2006. № 10. С. 9–15.
4. **Зимина, С.В.** Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети с алгоритмом рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2007. № 5. С. 3–7.
5. **Литвинов, О.С.** Статистический анализ флуктуаций весовых коэффициентов искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба / О.С. Литвинов, С.В. Зимина // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2009. №3. С. 33–43.
6. **Зимина, С.В.** Флуктуации весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети с алгоритмом Хэбба // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2013. N4. С. 3–8.
7. **Орешкин, Б.Н.** Алгоритм LMS с квадратичным ограничением / Б.Н. Орешкин, П.А. Бакулев // Антенны, 2007. N9. С. 29–34.

8. **Пупков, К.А.** Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, Ющенко А.С. – М.: Наука, 1976.
9. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.

*Дата поступления
в редакцию 23.04.2015*

S.V. Zimina

WEIGHT VECTOR JITTER IN THE NEURAL NETWORK WITH LMS ALGORITHM TUNING WITH SQUARE CONSTRAINT

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The article presents the results of statistical analysis taking into account weight vector jitter of an neural network tuning the algorithm to minimize the average squared error with a quadratic constraint on the gain of the desired signal. Methods of perturbation theory in the first (so-called "born") at a rate adaptation algorithm, which we assume to be small, the approximation is found the expression of the correlation function of the output signal. It is shown that taking into account fluctuations of weight coefficients leads to distortions in the output signal of an neural network. The obtained results allow to choose the value of the coefficient adaptation algorithm configuration of an neural network, resulting in optimal ratio between the speed of the network configuration and tuning accuracy.

Key words: neural network, fluctuations of weight coefficients, the algorithm to minimize the average squared error with a quadratic constraint.

УДК 621.372.8

А.Е. Иванов¹, А.Е. Львов², Г.И. Шишков¹**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПЛАСТИН
И РАЗБРОСА ДИАМЕТРОВ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ
НА ОСЛАБЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ АТТЕНУАТОРОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный
институт «Кварц» им. А.П. Горшкова²

Описан метод оценки влияния допусков на характеристики поляризационного аттенюатора. Приведены графические характеристики и физическая трактовка результатов расчета.

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

Введение

Поляризационные аттенюаторы (ПА) относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в волноводных трактах. ПА используются как встраиваемые в различные приборы, так и в качестве образцовых мер ослабления, что приводит к необходимости рассмотрения влияния различных факторов на величину ослабления и определения погрешности ослабления.

В данной статье предлагается метод расчета, позволяющий оценить влияние ряда технологических параметров на ослабление поляризационного аттенюатора (ПА). В отличие от известных методик расчета [1], основанных на расчете отдельных элементов ПА, в данной работе предлагается сквозной расчет характеристик с использованием аналитического алгоритма расчета от входа до выхода аттенюатора. За базовую модель расчета взята модель расчета некоторых погрешностей ПА, изложенная в [2] и дополненная неоднородностями в виде "изломов" поглощающих пластин (резистивных пленок) в статорах аттенюатора; кроме того, методом теории возмущений учтена частотная зависимость ослабления ПА. (Термином "излом" будем сокращенно называть неплоскостность пластины, моделируемую в [2] в виде поворота одной пластины относительно другой вокруг продольной оси, проведенной вдоль ПА по центру пластины, на некоторый угол – угол "излома".)

Расчеты проведены в одномодовом приближении, когда основной волной в круглом волноводе является Н₁₁. Возможность этого теоретически обоснована в работе [3]. Экспериментальная проверка базовой и построенной на ее основе предлагаемой модели расчета содержится в [2, 3].

Расчетный алгоритм

На рис. 1 изображена упрощенная схема волноводного канала поляризационного аттенюатора. На практике, в случае работы с каналами прямоугольных сечений, где основной волной является Н₁₀, данная конструкция дополняется плавными переходами с прямоугольного на круглый волноводы, которые в настоящее время достаточно хорошо отработаны экспериментально и, как вспомогательно играющие роль, для нашей модели рассматриваться не будут. Напомним лишь условие одномодовости, связывающее размер широкой стенки прямоугольного волновода и радиуса R круглого волновода [1]:

$$R=0,5865a.$$

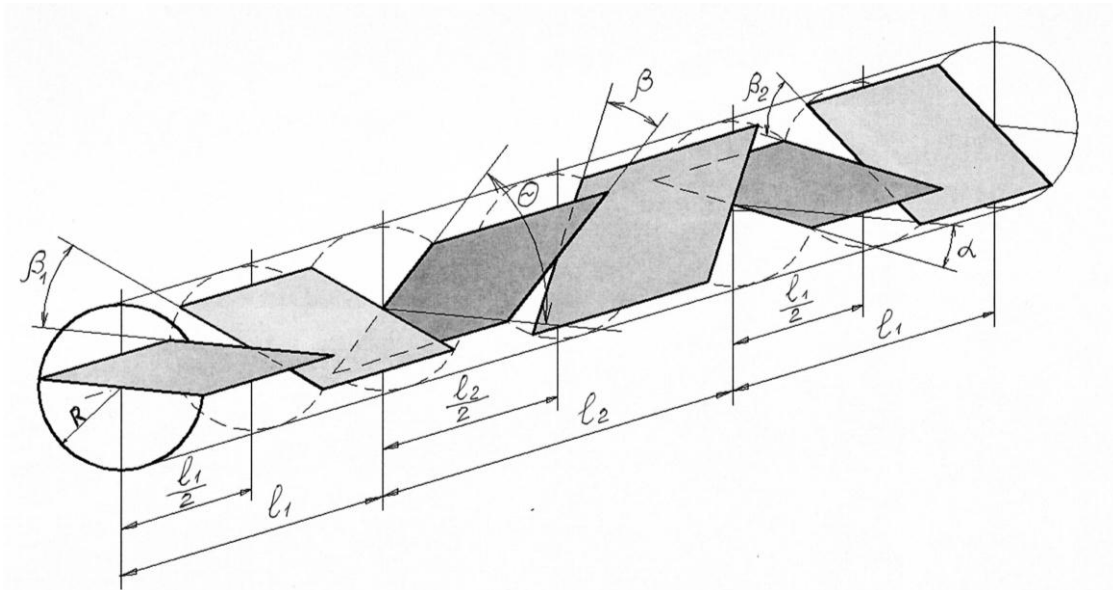


Рис. 1. Упрощенная структурная схема поляризационного аттенюатора:
 l_1 – длина входного или выходного статора; l_2 – длина ротора; $\beta_{1,2}$ – углы изломов входного и выходного статора; β – угол излома ротора; R – радиус круглого волновода; α – угол юстировки; θ – угол поворота ротора

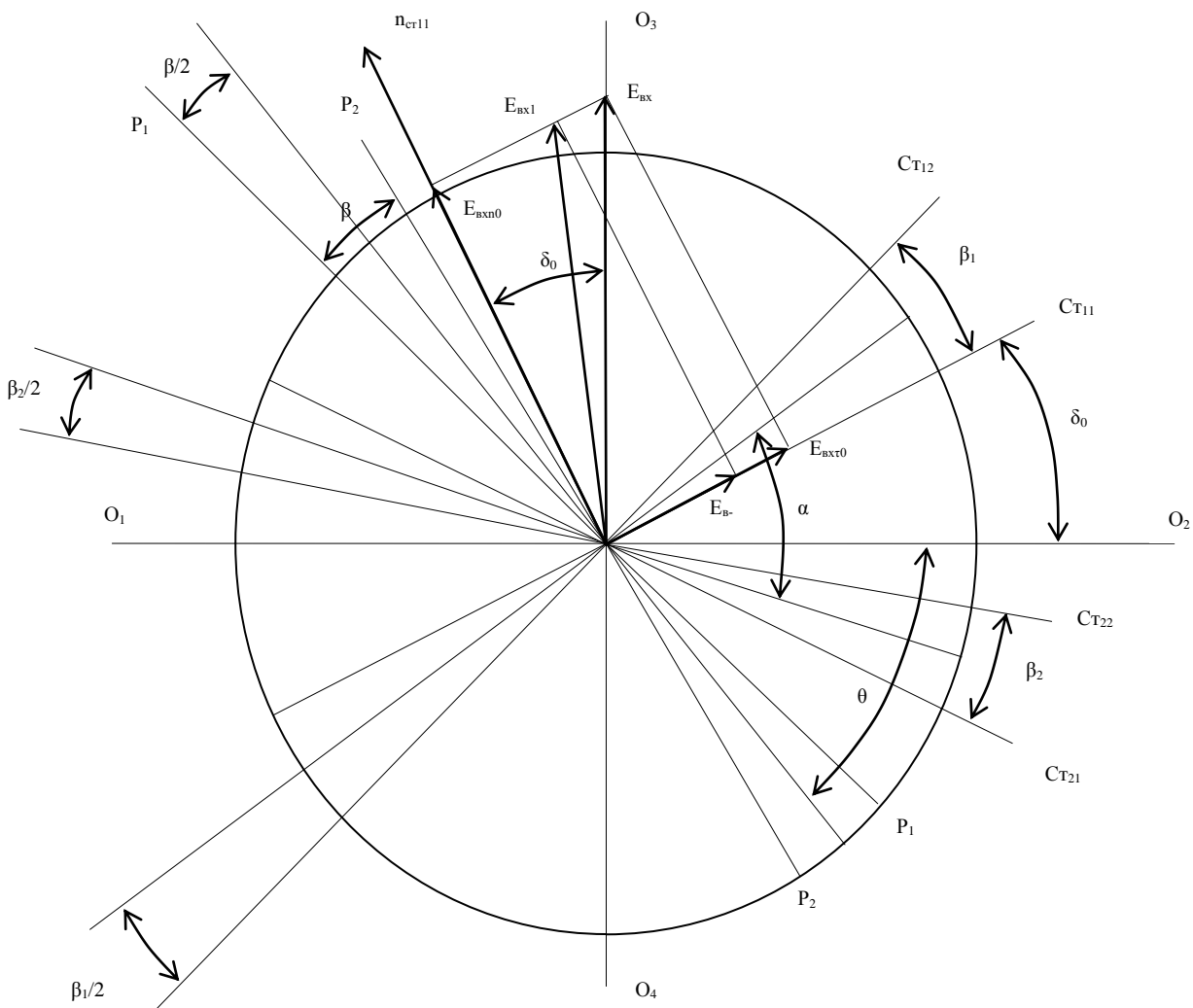


Рис. 2. Элементы поперечных сечений круглых волноводов ПА, совмещенные в одной плоскости

На рис. 2 условно изображены поперечные сечения круглых волноводов проходного канала ПА со всеми поглощающими вставками и координатами их геометрического положения, совмещенные, для упрощения анализа, в одной плоскости. На рис.2: СТ11, СТ12 – первая и вторая половины входного статора; СТ21, СТ22 – первая и вторая половины выходного статора; Р1, Р2 – первая и вторая половины ротора; δ_0 - возможная угловая техническая несоосность входного статора по отношению ко входному тракту внешнего источника сигнала; α – угол юстировки поляризационного аттенюатора. (Параметры $\beta_{1,2}$, β , θ , α – пояснены ранее на рис. 1).

Предполагая направление вектора напряженности электрического поля вдоль оси ОЗ-О4 $\vec{E}_{\text{вх}}$, определим проекции на нормаль nСТ11 и касательную к первой половине входного статора СТ11 в виде:

$$\begin{aligned} E_{\text{вх}n0} &= E_{\text{вх}} \cdot \cos \delta_0, \\ E_{\text{вх}\tau0} &= E_{\text{вх}} \cdot \sin \delta_0. \end{aligned}$$

На входе второй половины входного статора касательная компонента уменьшится вследствие поглощения в резистивной пленке до величины:

$$E_{\text{вх}\tau1} = E_{\text{вх}\tau0} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}},$$

где коэффициент α_3 учитывается по методу теории возмущений [4]:

$$\alpha_3 = \frac{193,483}{R \cdot R_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}},$$

где R_n – поверхностное сопротивление резистивной пленки (Ом/□); $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны Н11 в круглом волноводе.

(В работах [5,6,7] обнаружена опечатка: у выражения α_3 в знаменателе под корнем вместо $0,086 (\lambda_{\text{ср}}/\lambda_{\text{кр}})^2$ следует читать $0,086 (\lambda_{\text{ср}}/R)^2$).

Тангенциальная и нормальная составляющие образуют на входе второй половины входного статора новое поле $E_{\text{вх}1}$. Осуществляя аналогичным образом дальнейшую трансформацию $E_{\text{вх}1}$ на вторую половину входного статора, на элементы ротора и выходного статора по рис. 2, получаем цепочку преобразований для вычисления ослабления поляризационного аттенюатора.

$$A = -20 \log_{10} F,$$

где

$$F = F1 \cdot F2 \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} + \delta_0 - \arctg \left\{ \text{ctg} \delta_{p5} \cdot e^{\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right\} \right];$$

$$F1 = \cos \alpha_{p1j} \cdot \sqrt{\text{tg}^2 \alpha_{p1j} + e^{-\alpha_3 \cdot l_2}}$$

$$F2 = \prod_{i=1}^5 \cos x_i \sqrt{1 + \text{tg}^2 x_i \cdot e^{-y_i \alpha_3}}$$

где величины x_i и y_i определяются таблицей:

i	x_i	y_i
1	δ_0	l_1
2	$\delta_1 + \beta_1$	l_1
3	$\delta_{p1} + \beta$	l_2
4	δ_{p3}	l_1
5	δ_{p5}	l_1

где

$$\delta_1 = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\delta_2 = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg}(\delta_1 + \beta_1) \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\alpha_{p,j} = \frac{\pi}{2} + \delta_2 + \frac{\beta}{2} - \theta - \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta_2}{2} \right);$$

$$\delta_{p1} = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{ctg} \alpha_{p1,j} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_2}{2}} \right];$$

$$\delta_{p2} = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg}(\delta_{p1} + \beta) \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_2}{2}} \right];$$

$$\delta_{p3} = \frac{\beta}{2} + \theta - \left(\frac{\alpha}{2} + \delta_0 \right) - \frac{\beta_2}{2} - \delta_{p2} ;$$

$$\delta_{p4} = \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg} \delta_{p3} \cdot e^{-\alpha_3 \frac{l_1}{2}} \right];$$

$$\delta_{p5} = \delta_{p4} + \beta_2.$$

Результаты расчета

На рис. 3–10 приведены зависимости, полученные при расчете по данному алгоритму для диапазона частот 53,57÷78,33 (ГГц) ПА (что в переводе на стандартное прямоугольное сечение волновода соответствует $3,6 \times 1,8$ мм²). Параметры структуры ПА: $l_1=15,75$ (мм), $l_2=31,3$ (мм), $R=d/2=1,836$ (мм) (за исключением рис. 9 и рис. 10, где d выступает в качестве параметра). На рис. 3–6 приведены результаты расчета погрешностей ослабления от "изломов" статора и ротора на частоте 78,33 (ГГц).

На рис. 3 представлены кривые погрешности ослабления, возникающие вследствие "излома" на угол β ротора ПА. По горизонтальной шкале вместо угла поворота ротора θ отложены значения ослабления, устанавливаемые на шкале барабана - отсчетного устройства ПА. Эти величины связаны с θ соотношением:

$$A_{\text{ид}} [\text{дБ}] = A_{\text{шк}} [\text{дБ}] = -40 \lg |\cos \theta|. \quad (1)$$

В таком виде график более удобен для практической оценки погрешности ослабления. По вертикальной шкале графика отложена величина

$$\Delta A_p = A_{p00} - A_{p\beta},$$

где A_{p00} – расчетное значение ослабление при отсутствии излома ротора, $A_{p\beta}$ – при наличии излома. A_{p00} учитывает без изломов лишь "пролезание" сигнала, которое начинает сказываться при ослаблениях порядка 70 дБ ("пролезание" порядка 0,53 дБ). "Пролезание" увеличивается с увеличением ослабления, так как возрастает касательная составляющая электрического поля на резистивной пленке (при ослаблении 80 дБ "пролезание" составляет уже 1,6 дБ при данных параметрах ПА, рис.3). Кривые погрешности ΔA_p имеют монотонно-нелинейный возрастающий характер, что объясняется также вышеописанной причиной. С увеличением излома β увеличивается чувствительность характеристик ПА к отклонению размеров и погрешность ΔA_p резко нарастает.

На рис. 4 приведены кривые $\Delta A = A_{00} - A_{\beta_1}$, причем A_{00} – ослабление при отсутствии излома, а A_{β_1} – при наличии излома входного статора $\pm\beta_1$. Знак погрешности объясняется следующим образом: если излом статора $+\beta_1 > 0$ (в сторону увеличения против часовой стрелки), то угол между нормальными ротора и статора уменьшается, что приводит к уменьшению ослабления проходящего сигнала, поэтому $A_{00} > A_{\beta_1}$ и $\Delta A > 0$. При $-\beta_1 < 0$ все рассуждения проводятся аналогично для противоположного направления.

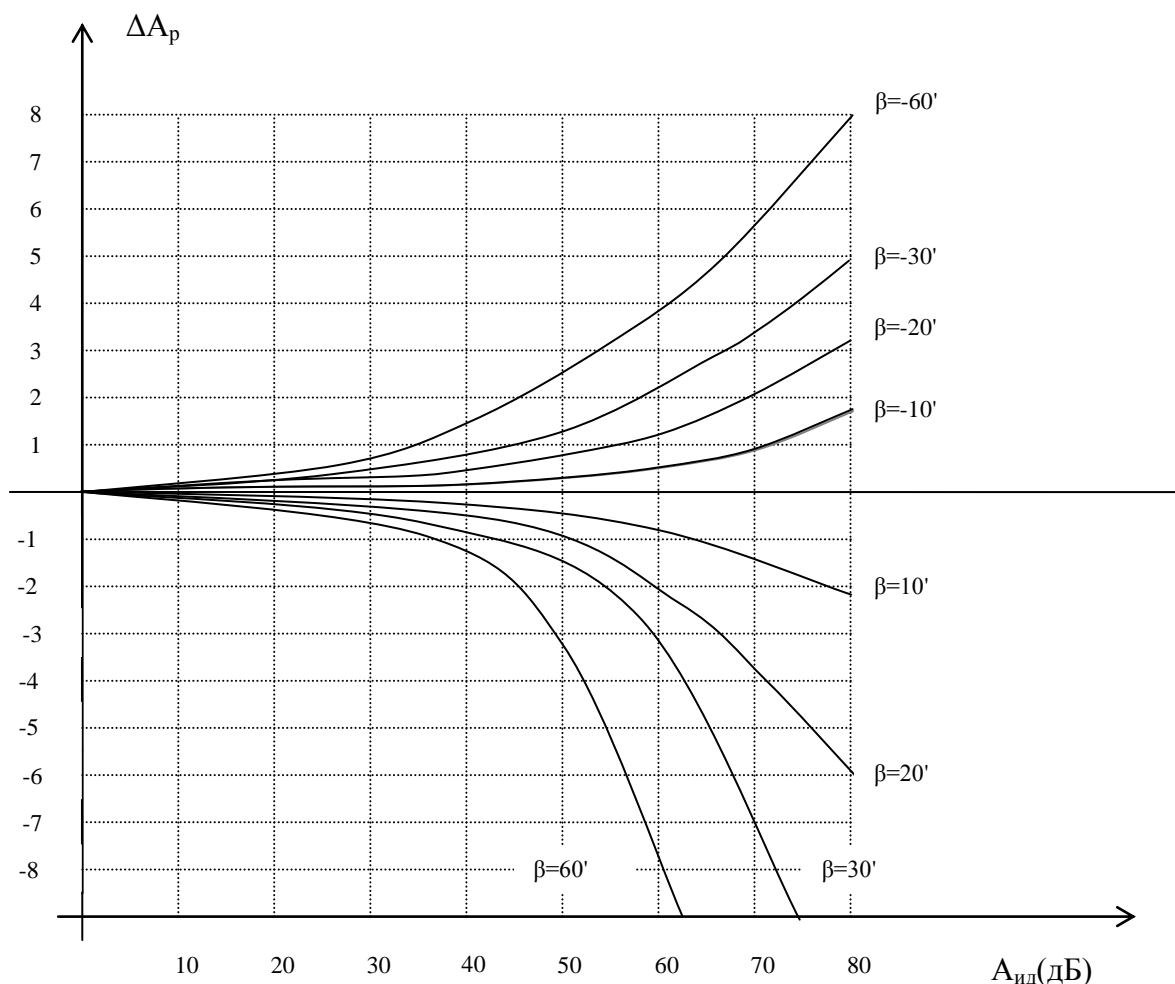


Рис. 3. Влияние излома ротора:
 $R_{\text{пов}} = 385 \text{ Ом/}\square$, $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$

Из сравнения рис. 3 и рис. 4 видно, что влияние излома ротора чуть больше, хотя и одного порядка с влиянием излома входного статора.

На рис. 5 показаны погрешности по ослаблению вследствие излома второй половины выходного статора. Ход кривых погрешности $\Delta A = A_{00} - A_{\beta_2}$ в зависимости от $A_{\text{ид}}$ (A шкалы) объясняется аналогично предыдущим графикам. Из рис. 5 видно, что все погрешности на порядок меньше, чем на рис. 3 и рис. 4. Это объясняется тем, что между ротором и изломом β_2 находится первая половина выходного статора, играющая роль аттенюатора развязки.

На рис. 6 представлены кривые погрешности $\Delta A = A_{00} - A_{\pm\beta_1 \pm \beta_2}$ совместного влияния изломов входного и выходного статоров. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что наряду с изломом β_1 входного статора, наличие излома β_2 выходного статора увеличивает первоначальную погрешность (за счет β_1 , рис. 4) на величину (за счет β_2) порядка значений, изображенных на рис. 5, при условии синхронного изменения β_1 и β_2 (оба по часовой или против

часовой стрелки). В случае разного знака углов наклона погрешность, вследствие компенсации, становится немного меньше.

Н рис. 7 и рис. 8 приведены частотные зависимости расчетного ослабления $A_{расч}$ в случае, когда параметром выступает поверхностное сопротивление пленки $R_{пов}$, которое варьируется в пределах: $\pm 1\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ относительно поверхностного сопротивления $R_{пов0}=385$ (Ом/ \square). Выбор 385 (Ом/ \square) для нашей экспериментальной модели сделан исходя из минимального затухания (что приводит к наибольшему $R_{пов}$ и минимальному КСВН) для обеспечения погрешности вследствие "пролезания" сигнала не более $\pm 1,4$ дБ на уровне 70 дБ, оцененной по приближенной формуле погрешностей вследствие неполного поглощения в пластинах аттенуатора [1]. Как видно из рисунков, с увеличением устанавливаемого по шкале ($A_{шк}$) ПА ослабления (рис. 7, 8 с 50 дБ до 70 дБ), резко увеличивается погрешность ослабления:

$$\Delta A = A_{p0} - A_p,$$

где A_{p0} – расчетное значение ослабления при $R_{пов0}=385$ (Ом/ \square), а A_p – расчетное значение ослабления при

$$R_{пов} = R_{пов0} \pm \frac{\Delta\%}{100\%} \cdot R_{пов0},$$

где $\Delta\%$ - процентное отклонение величины поверхностного сопротивления. Из рисунков видно, что погрешность может быть уменьшена при уменьшении $R_{пов}$, однако следует заметить, что при этом увеличивается КСВН устройства.

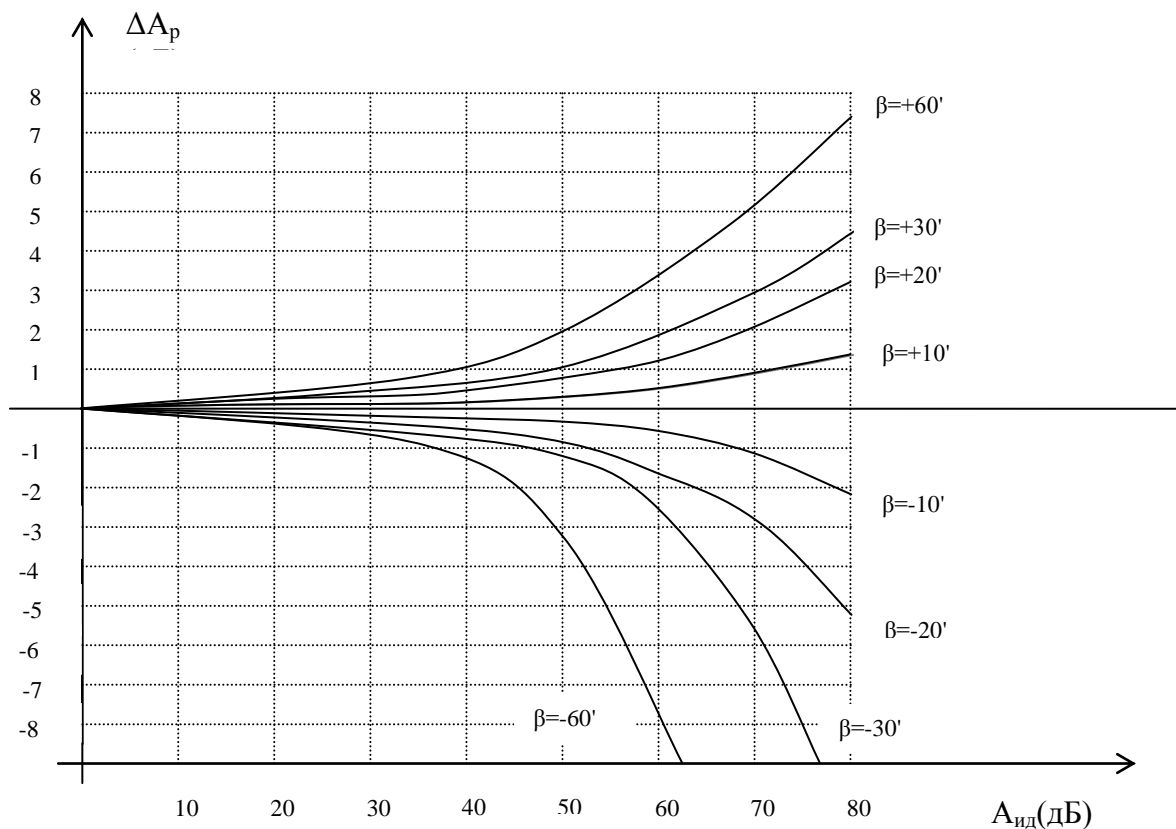


Рис. 4. Влияние излома входного статора:
 $R_{пов}=385$ Ом/ \square , $f=78,33$ (ГГц), $\beta_2=0$, $\beta=0$

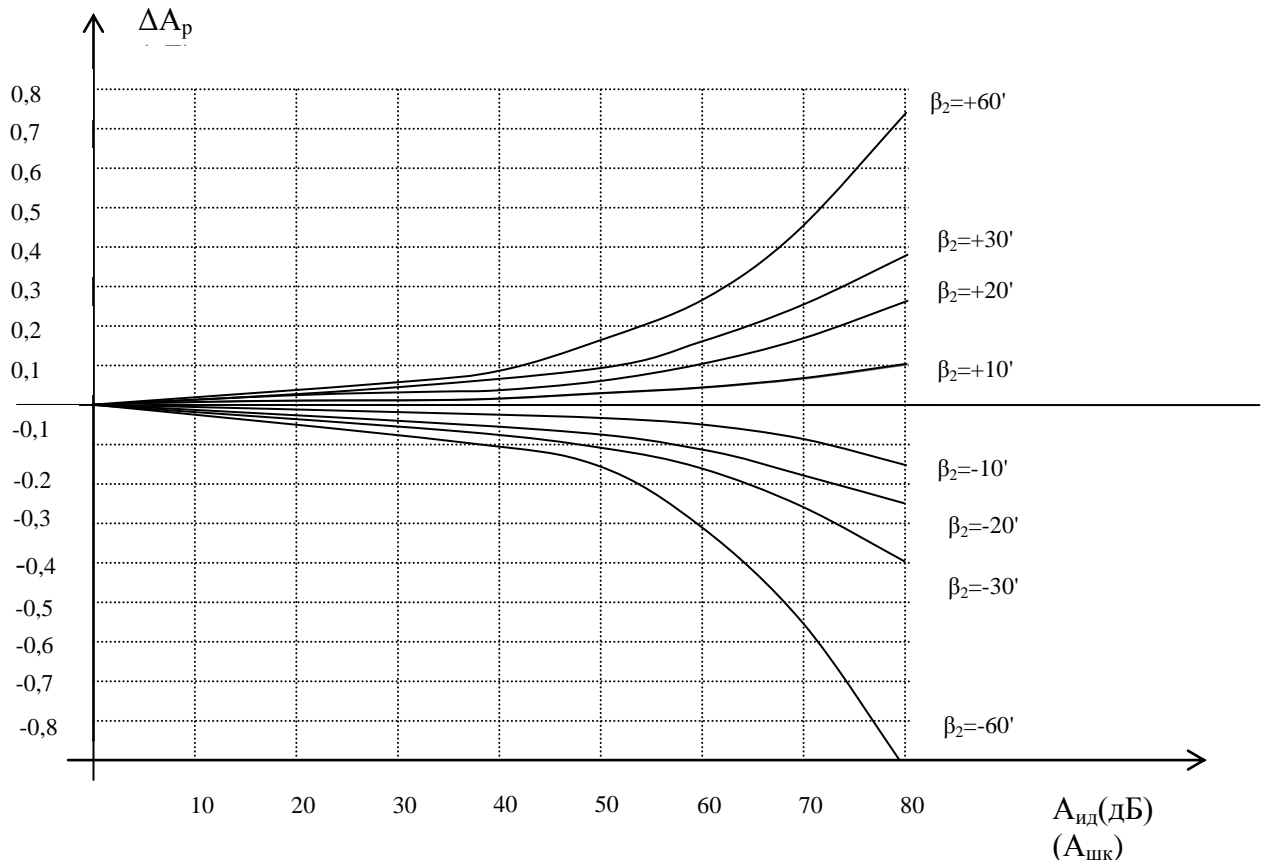


Рис. 5. Влияние излома выходного статора:
 $R_{пов} = 385 \text{ (Ом/□)}$, $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$, $\beta_1 = 0$, $\beta = 0$

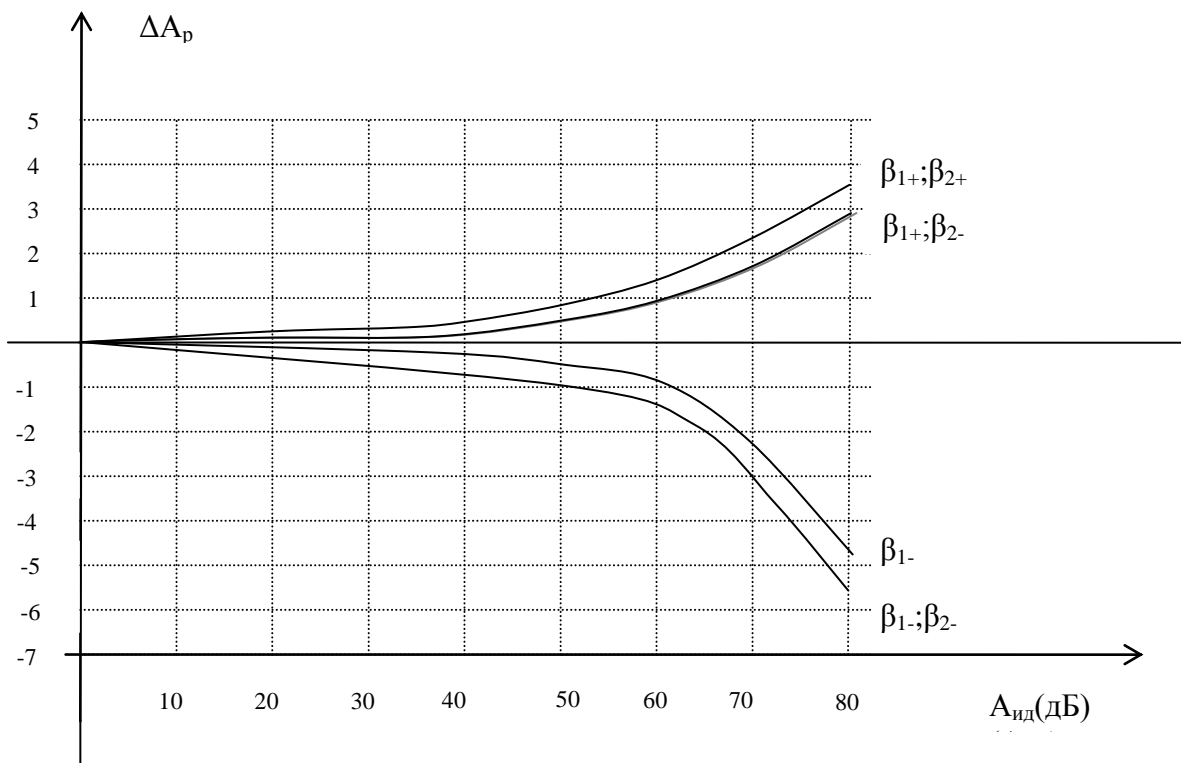


Рис. 6. Совместное влияние изломов входного и выходного статоров:
 $R_{пов} = 385 \text{ Ом/□}$, $f = 78,33 \text{ (ГГц)}$, $\beta = 0$, $\beta_{1+} = \pm 20'$, $\beta_{2+} = \pm 20'$

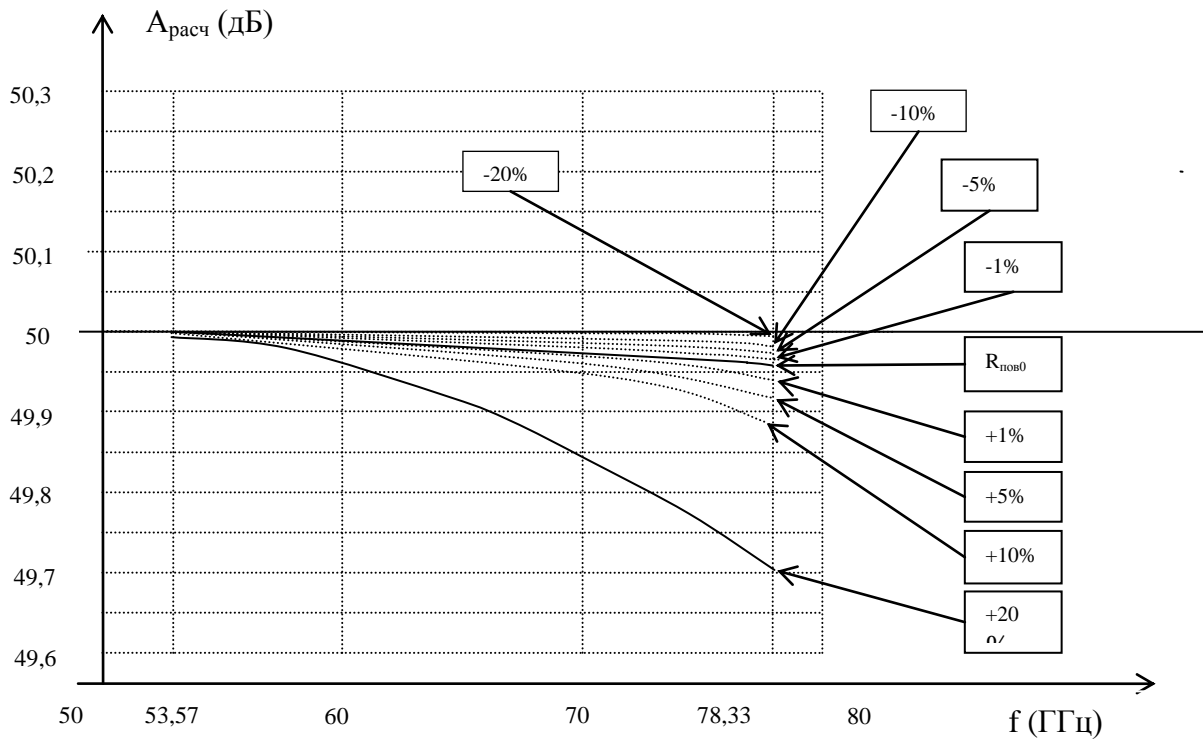


Рис. 7. Влияние разброса поверхностного сопротивления при $A_{шкк} = 50$ (дБ):
 $R_{пов0} = 385$ Ом/кв, $A_{шкк} = 50$ (дБ), $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$, $\beta = 0$

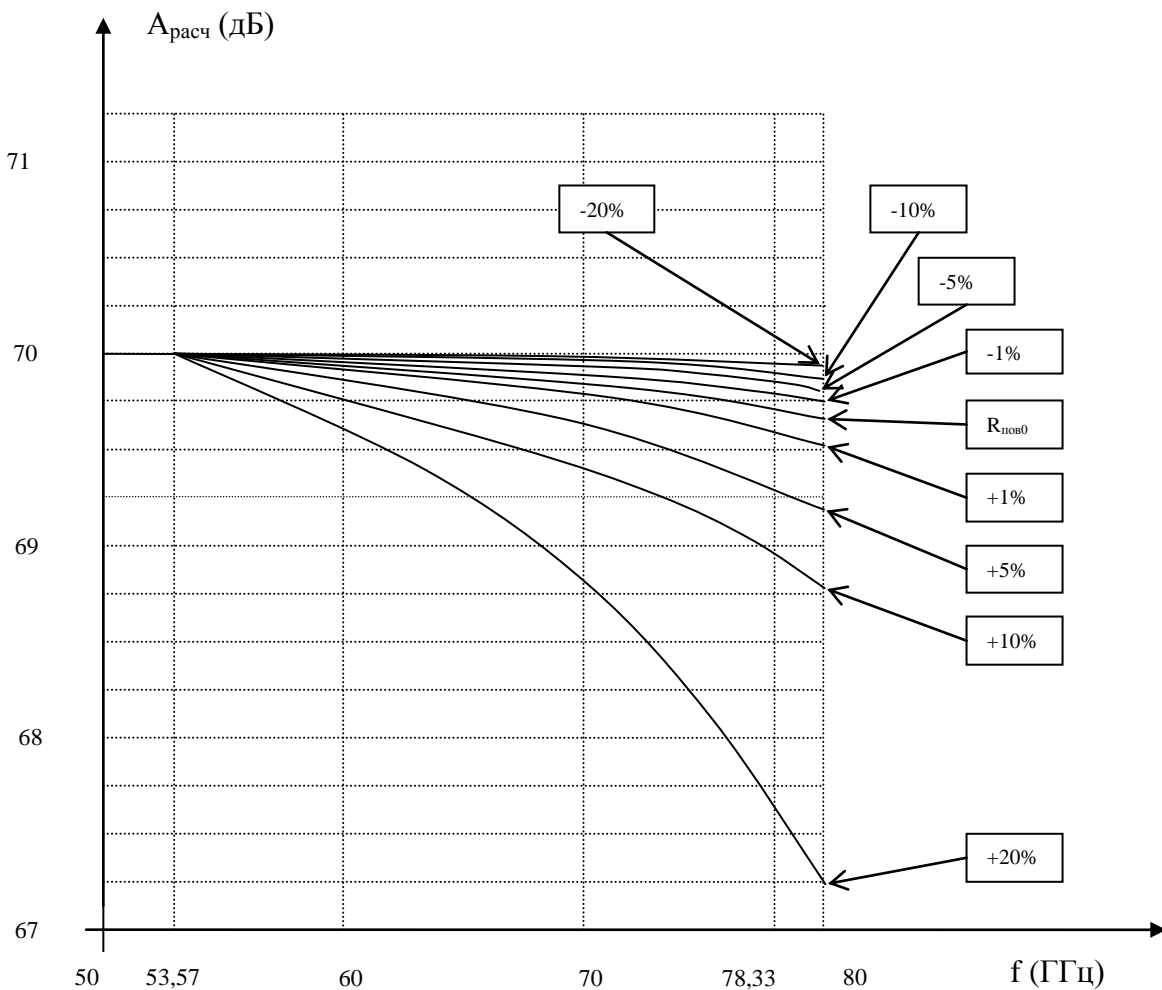


Рис. 8. Влияние разброса поверхностного сопротивления при $A_{шкк} = 70$ (дБ):
 $R_{пов0} = 385$ Ом/кв, $A_{шкк} = 70$ (дБ), $\beta = 0$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0$

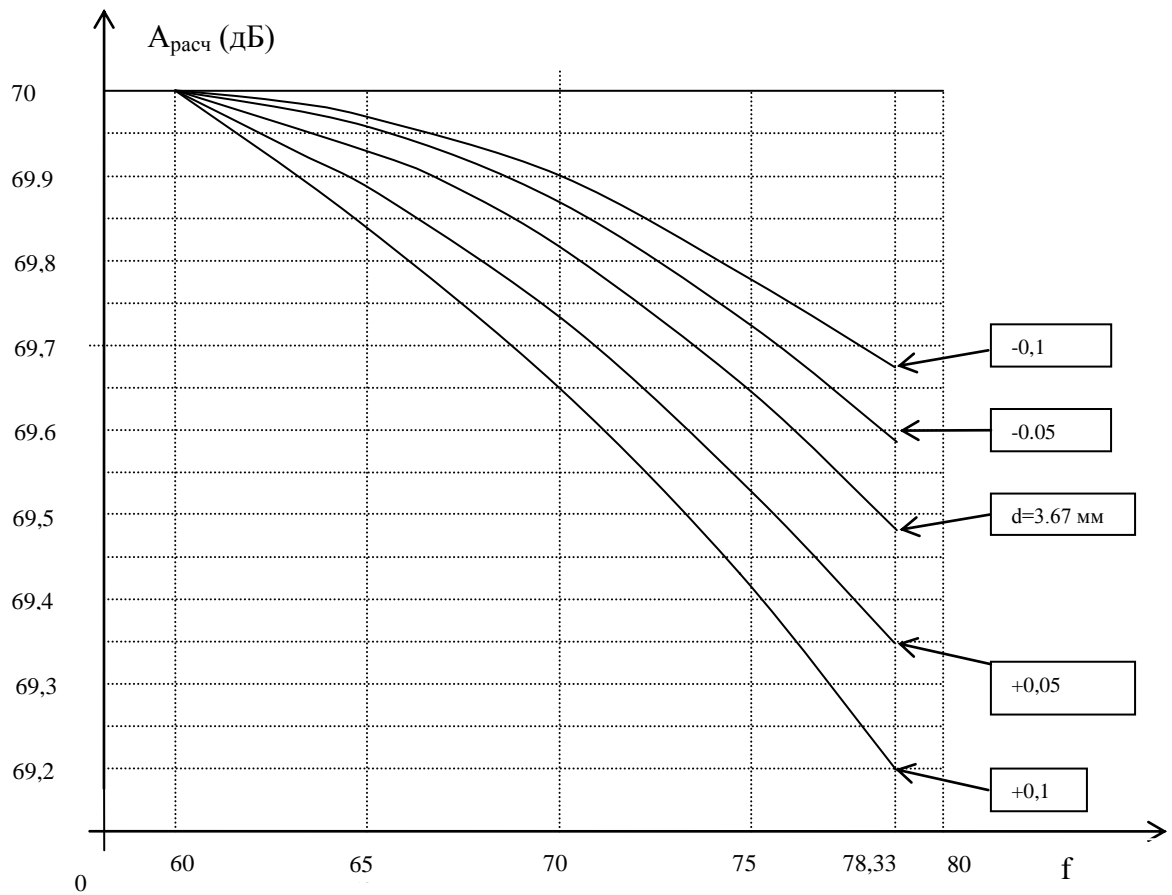


Рис. 9. Влияние диаметра $\varnothing d$ круглого волновода на характеристики ослабления ПА:
 $R_{пов}=385$ Ом/□, $A_{шк}=70$ (дБ)

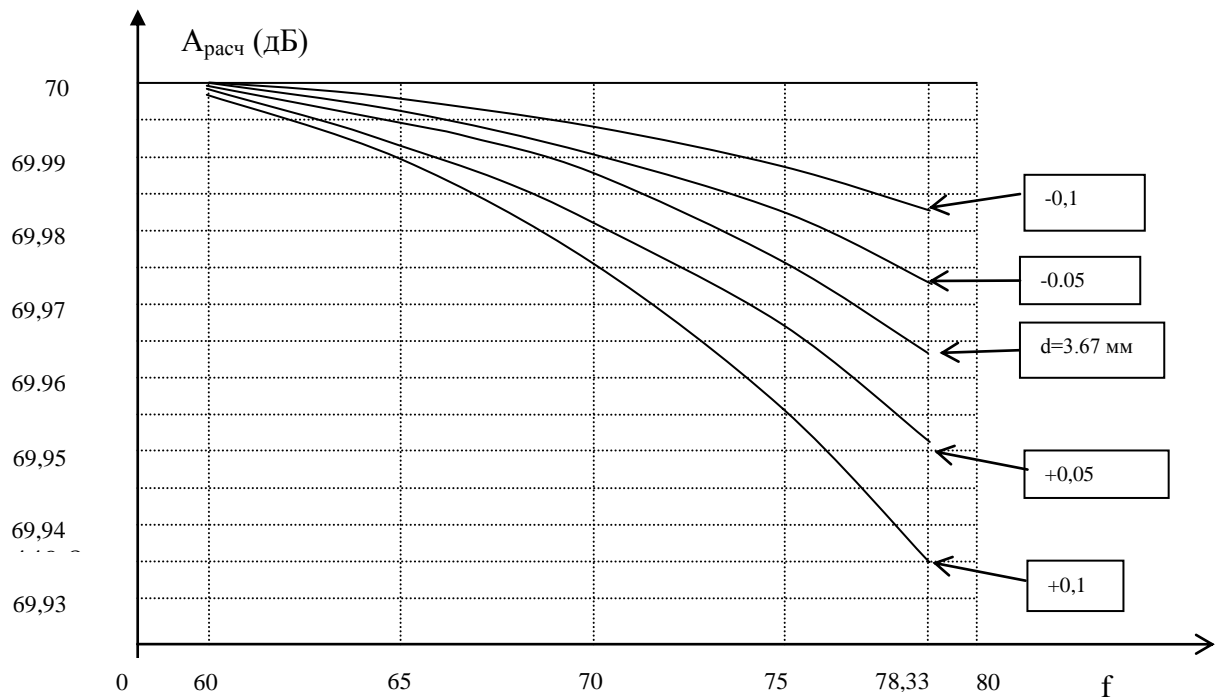


Рис. 10. Влияние диаметра $\varnothing d$ круглого волновода на характеристики ослабления ПА:
 $R_{пов}=308$ Ом/□, $A_{шк}=70$ (дБ)

На рис. 9 и рис. 10 показано влияние разброса диаметра круглого волновода на характеристики ослабления ПА. Как видно из рисунков, изменение диаметра в пределах от $-0,1$ (мм) до $+0,1$ (мм) относительно $d=3,67$ (мм) начинает сказываться заметно на частотах $f \geq 60$ (ГГц) (эта область и показана на рисунках) и оказывает наиболее сильное влияние при установке шкалы ПА на верхнее пограничное значение $A_{\text{шк}}=70$ (дБ). Из рисунков видно, что с уменьшением диаметра круглого волновода уменьшается неравномерность ослабления ПА. Однако даже при допуске $\Delta d \pm 0,1$ (мм) погрешность из-за изменения диаметра получается $2 \div 2,5$ раза меньше погрешности из-за «пролезания» сигнала. Уменьшение $R_{\text{пов}}$ на 20% приводит к уменьшению неравномерности ослабления примерно на порядок как от «пролезания» сигнала, так и от разброса по диаметру, но пропорция соотношений между ними остается прежней.

Заключение

Приведенный алгоритм расчета ПА и иллюстрируемые на его основе характеристики можно отнести к задаче анализа для учета влияния погрешностей на работу устройства. В отличие от известных численных методов конечных элементов, требующих значительных затрат машинного времени и объема памяти, данный алгоритм позволяет получить результаты расчетов практически мгновенно после запуска программы расчета. Приведенная методика позволяет значительно объективнее оценить погрешность ослабления ПА, чем приводимые в литературе оценки, вследствие учета аналитической зависимости параметров ПА. По этой же причине она позволяет определить их взаимное влияние.

Библиографический список

1. **Калашников, В.С.** Расчет и конструирование аттенуаторов СВЧ / В.С.Калашников, А.В.Негурей. – М.: Связь, 1980. – 89 с.
2. **Томашевский, А.К.** К вопросу использования поляризационных аттенуаторов в качестве эталона ослабления Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1966. Вып. 1. С. 35–42.
3. **Иванов, А.Е.** Об учете частотной зависимости ослабления при расчете характеристик поляризационных аттенуаторов / А.Е. Иванов, О.Е. Лебедева, Г.И. Шишков // Труды докладов XVII международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии". ИСТ-2011. Н. Новгород, НГТУ. 2011.
4. **Семенов, Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А.Семенов. – М.: Связь, 1973. – 321 с.
5. **Иванов, А.Е.** Поляризационные аттенуаторы / А.Е. Иванов, А.Е. Львов, Г.И. Шишков// Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. №4 (91). С. 11–19.
6. Устройства СВЧ и КВЧ: учебн. пособие. Ч. 1 / В.В. Бирюков [и др.]; под ред. Г.И. Шишкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2012. – 220 с.
7. Сверхвысокочастотные устройства. Ч. 1 / В.В. Бирюков [и др.]; под ред. Г.И. Шишкова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. –182 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

A.E. Ivanov¹, A.E. Lvov², G.I. Shishkov¹

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS ABSORBING RESISTIVE PLATES AND THE DIAMETERS OF THE CENTRAL WAVEGUIDES ON THE POLARIZATION ATTENUATORS WEAKING

Nizhny novgorod state technical univercity n.a. R.E. Alexeev¹,
Nizhny Novgorod research instrument-making Institute "Quartz" n.a. A.P. Gorshkov²

Purpose: To describe the method of evaluating the tolerances effect on the attenuation characteristics of the polarization attenuator.

Design/methodology/approach: The attenuation coefficient of the waveguide paths is determined in the single – wave approximation H11. Frequency dependence is taken into account by the perturbation theory method.

Findings: Polarization attenuators are used in generators, spectrum analyzers, integrated measurement systems of electronic equipment. They are used also independently as a precise attenuation measures.

Research/limitations/implications: The given calculation can be attributed to the task of analyzing the tolerances impact on the work of the polarization attenuator. It can be used as the starting point in the problem of parametric and structural synthesis of polarization attenuators on the basis of predetermined characteristics.

Originality/value: Programs based on the finite element method require a lot of computer time. In contrast, this algorithm allows to obtain results almost instantly after starting the calculation program. This technique allows to evaluate more objectively the effect of tolerances on the attenuation due to analytical connection parameters and to determine their mutual influence.

Key words: polarization attenuato.

УДК 621.372

М.М. Ивойлова

**МОДЕЛЬ КОАКСИАЛЬНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА
С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Цель: Оценка влияния шероховатости токопроводящих поверхностей коаксиального керамического резонатора (ККР), изготовленного методом механической обработки керамической заготовки, на его основные параметры. **Метод:** Основными этапами технологии изготовления керамических втулок являются операции: для формирования внешней поверхности – шлифование абразивными кругами (периферией), для изготовления отверстия – сверление алмазным сверлом. В настоящей работе на основе математических моделей внешней и внутренней поверхностей ККР, изготовленных методами механической обработки, разработаны его электродинамическая и математическая модели.

Выводы: Показано, что на величину добротности резонатора большее влияние оказывает шероховатость его внутренней поверхности. Используя полученные результаты можно сформулировать оптимальные требования к шероховатости керамических втулок ККР, исходя из заданных параметров полосно-пропускающих фильтров и автогенераторов.

Ограничения: Задача рассматривается в приближении T -волны – основного типа волны для коаксиальных резонаторов.

Ценность: Полученные математические модели ККР позволяют по заданным электрическим параметрам резонаторов (собственная частота, добротность) разрабатывать оптимальный технологический маршрут их изготовления. При этом в ряде случаев могут быть исключены его самые трудоёмкие этапы – тонкая алмазная шлифовка и шлифование, осуществляемое ультразвуковым способом.

Ключевые слова: коаксиальный керамический резонатор, математическая модель резонатора, математические модели шероховатости поверхности

Введение

В современной технике СВЧ широко используется микроволновая керамика, обладающая высокой добротностью и термостабильностью [1]. Одной из наиболее важных областей её практического применения является изготовление коаксиальных керамических резонаторов (ККР). Конструктивно ККР представляет собой закороченный с одного конца четвертьволновый отрезок коаксиальной линии (круглого или квадратного сечения) с керамическим заполнением. На основе данных ККР разрабатываются малогабаритные полосно-пропускающие фильтры и стабилизирующие резонаторы твёрдотельных автогенераторов дециметрового диапазона длин волн [2, 3].

Основным способом серийного изготовления керамических заготовок, составляющих основу ККР, является полусухое прессование в пресс-форме с последующим обжигом. Данная технология обеспечивает приемлемое качество поверхности и не требует её дополнительной механической доработки.

Для производства ограниченного количества ККР, необходимого при проведении НИОКР, используется технология изготовления керамических заготовок резонаторов, основанная на методах механической обработки керамических брусков [4], при которой для формирования внешней поверхности применяется шлифование абразивными кругами, для изготовления отверстия – сверление алмазными свёрлами. Математическое моделирование этапов шлифования и сверления керамических заготовок было рассмотрено в статье [5]. Наличие шероховатости поверхностей керамических заготовок ККР, образующейся в результате их механической обработки, после металлизации приводит к дополнительным потерям в стенках резонатора, снижающим его собственную добротность. Для получения образ-

цов ККР с предельно достижимым значением собственной добротности предусмотрены этапы тонкой обработки поверхностей заготовки, включающие в себя для внешней поверхности – шлифование алмазными кругами, для внутренней поверхности – обработку ультразвуковым способом. Однако стоимость работ на этих этапах в несколько раз превышает стоимость работ на этапах грубой обработки керамических заготовок (шлифование абразивными кругами и сверление алмазными свёрлами). Вместе с тем, в ряде случаев, при разработке СВЧ-устройств требования к собственной добротности резонаторов могут быть снижены и, следовательно, этапы тонкой обработки керамических заготовок из техпроцесса исключены. Таким образом, учёт шероховатости поверхностей керамических заготовок ККР позволит оптимизировать техпроцесс изготовления экспериментальных образцов ККР, исключив из него самые трудоёмкие и затратные этапы.

Автором настоящей статьи предложена математическая модель ККР круглого сечения, изготовленного методами механической обработки керамической заготовки [5], на основе которой сделаны оценки ожидаемого значения собственной добротности ККР при различных параметрах шероховатости керамической втулки.

Математическая модель внешней поверхности ККР

Внешняя поверхность ККР, образуемая в результате механической обработки керамической заготовки, копирует размещение режущих кромок зёрен на периферии абразивного круга, с учетом траектории движения инструмента. Наличие люфтов в механизмах обрабатывающего оборудования, а также деформации и микроскалывание материала приводит к расширению канавок на поверхности обрабатываемой заготовки. Это делает возможным использование полученных в статье [5] результатов при разработке математической модели внешней поверхности ККР.

Вид внешней поверхности керамических заготовок ККР, изготовленных методами полусухого прессования и методом механической обработки представлен на рис. 1.

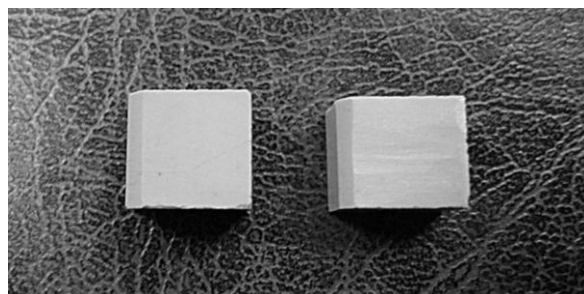


Рис. 1. Внешняя поверхность керамических заготовок ККР, выполненных методом полусухого прессования (слева) и методом механической обработки (справа)

Модель абразивного круга построена на основе функциональной зависимости положения режущих кромок зёрен на его поверхности. В модель закладывались параметры зёрен абразивного материала, форма которых аппроксимирована эллипсом. Размещение зёрен на поверхности абразивного круга схематично показано на рис. 2.

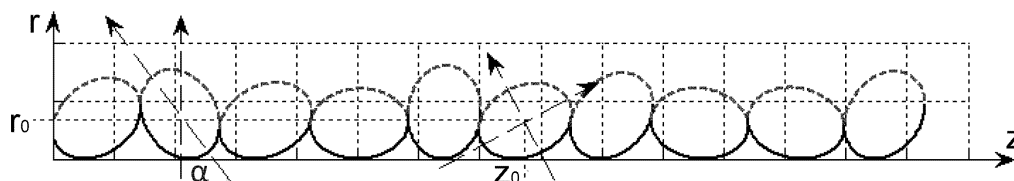


Рис. 2. Размещение зёрен на поверхности абразивного круга

Уравнение профиля шероховатой поверхности керамической заготовки, полученное в [5], имеет вид

$$Z = \begin{cases} \frac{F_z - \sqrt{G_z}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n} & \text{при } \begin{cases} (n=1) & 0 \leq r < r_{01} + r_{\min Z21} \\ (n>1) & 0 \leq r < r_{(n-1)n}, \quad n=1,2,\dots,N \end{cases} \\ \frac{F_z + \sqrt{G_z}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n} + z_n & \text{при } 0 \leq r < r_n, \quad n=1,2,\dots,N \\ z_{\min R2n} + z_{0n} \leq z < z_{\min R2n} + z_{0n} + z_n, \quad n=1,2,\dots,N & \text{при } r=0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $F_z = -B(\alpha_n) \cdot (r - r_{0n})$, $G_z = B^2(\alpha_n) \cdot (r - r_{0n})^2 - 4C(\alpha_n) \cdot [A(\alpha_n) \cdot (r - r_{0n})^2 - D]$,
 $A(\alpha_n) = a^2 \cos^2(\alpha_n) + b^2 \sin^2(\alpha_n)$, $B(\alpha_n) = 2(b^2 - a^2) \cdot \sin(\alpha_n) \cdot \cos(\alpha_n)$,
 $C(\alpha_n) = b^2 \cos^2(\alpha_n) + a^2 \sin^2(\alpha_n)$, $D = a^2 b^2$; α_n – случайное число в интервале $0 \leq \alpha_n \leq \pi$, с
 равномерным распределением вероятности, определяющее ориентацию режущих кромок зёрен
 на поверхности абразивного круга; a и b – параметры, определяющие среднюю величину
 зерен абразивного круга; N – среднее количество зерен, укладываемое на длине резонатора;
 z_n – осевой люфт; $r_{0n} = -\sqrt{C(\alpha_n)}$ – сдвиг по оси $O\Gamma$ n -го эллипса; $z_{01} = -\sqrt{A(\alpha_1)}$ – сдвиг
 по оси OZ 1-го эллипса; z_{0n} (для $n>1$) – сдвиг по оси OZ n -ого эллипса, определяется из
 условия существования одного действительного корня r_{n-1} уравнения $Z_1^{n-1} = Z_2^n$,
 $z_{n-1} = Z_1^{n-1}(r_{n-1})$, (z_{n-1}, r_{n-1}) – координаты точки касания двух соседних
 $(n-1)$ -го и n -го эллипсов, $Z_{1,2}^0 = Z_{1,2}^0(r - r_{0n}) + z_{0n}$,
 $Z_{1,2}^0 = \frac{-B(\alpha_n)r \pm \sqrt{B(\alpha_n)^2 r^2 - 4C(\alpha_n)(A(\alpha_n)r^2 - D)}}{2C(\alpha_n)}$; r_{\min} – меньший корень уравнения

$$Z_1^n + z_n = Z_2^{n+1}.$$

При необходимости снижения шероховатости поверхности после этапа шлифования
 абразивным кругом в технологический маршрут включается этап тонкого шлифования ал-
 мазным кругом. Уравнение поверхности после тонкого шлифования имеет вид [5]

$$Z = \begin{cases} \frac{F_z - \sqrt{G_z}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n} & \text{при } 0 < r \leq H, \quad n \in \mathbb{N} \\ \frac{F_z + \sqrt{G_z}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n} + z_n & \text{при } 0 \leq r < H, \quad n \in \mathbb{N} \\ z < z_{12}, z_{n1} \leq z < z_{(n+1)2}, \quad n \in \mathbb{N} & \text{при } r = H \\ z_{\min R2n} + z_{0n} \leq z < z_{\min R2n} + z_{0n} + z_n, \quad n \in \mathbb{N} & \text{при } r = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

или

$$R_D = \begin{cases} \frac{F_r - \sqrt{G_r}}{2A(\alpha_n)} + r_{0n} & \text{при } z_{n2} \leq z < z_{\min R2n} + z_{0n}, \quad n \in \mathbb{N} \\ \frac{F_{rn} - \sqrt{G_{rn}}}{2A(\alpha_n)} + r_{0n} & \text{при } z_{\min R2n} + z_{0n} + z_n \leq z < z_{n1}, \quad n \in \mathbb{N} \\ H & \text{при } (n=1) \quad z < z_{12} \quad \text{и} \quad (n>1) \quad z_{(n-1)1} \leq z < z_{n2}, \quad n \in \mathbb{N} \\ 0 & \text{при } z_{\min R2n} + z_{0n} \leq z < z_{\min R2n} + z_{0n} + z_n, \quad n \in \mathbb{N} \end{cases}, \quad (3)$$

где $F_r = -B(\alpha_n) \cdot (z - z_{0n})$, $G_r = B^2(\alpha_n) \cdot (z - z_{0n})^2 - 4A(\alpha_n) \cdot [C(\alpha_n) \cdot (z - z_{0n})^2 - D]$,
 $F_{rn} = -B(\alpha_n)(z - z_{0n} - z_n)$, $G_{rn} = B^2(\alpha_n)(z - z_{0n} - z_n)^2 - 4A(\alpha_n)[C(\alpha_n)(z - z_{0n} - z_n)^2 - D]$,
 H – глубина канавок, после тонкого шлифования;

$$z_{n1} = \frac{F_{zu} + \sqrt{G_{zu}}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n} + z_n, \quad z_{n2} = \frac{F_{zu} - \sqrt{G_{zu}}}{2C(\alpha_n)} + z_{0n},$$

$$F_{z_{ш}} = -B(\alpha_n) \cdot (H - r_{0n}), \quad G_{z_{ш}} = B^2(\alpha_n) \cdot (H - r_{0n})^2 - 4C(\alpha_n) \cdot [A(\alpha_n) \cdot (H - r_{0n})^2 - D].$$

Вид профиля внешней поверхности резонатора показан на рис. 3.

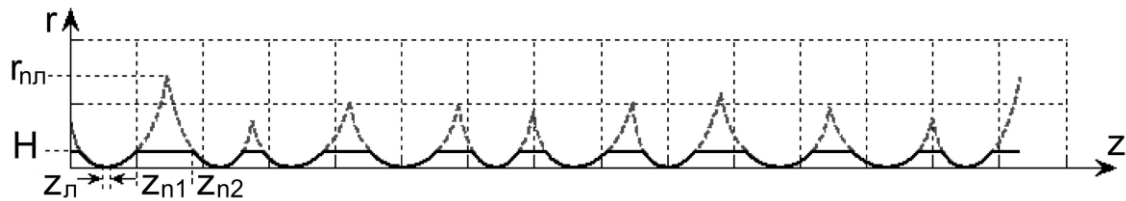


Рис. 3. Вид профиля внешней поверхности: после тонкого шлифования – сплошная линия, после шлифования абразивным кругом с учетом люфта – штриховая линия

В предложенной математической модели не учитывается шероховатость плоских участков поверхности между канавками, образуемая при тонком шлифовании алмазным диском.

Математическая модель внутренней поверхности ККР

Внутренняя поверхность керамической заготовки ККР представляет собой шероховатую поверхность с большим числом равномерно распределенных по длине отверстия рисков, нанесённых алмазными зёрнами свёрел.

Вид поверхности отверстий керамических заготовок ККР, изготовленных методом полусухого прессования и методом механической обработки (сверления), представлен на рис. 4.

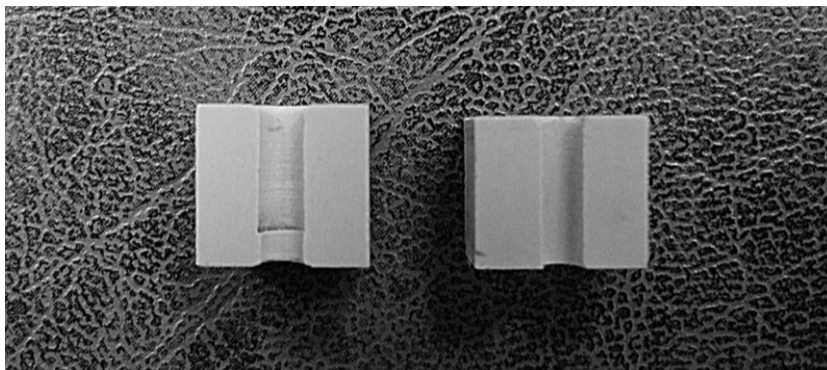


Рис. 4. Поверхность отверстий керамических заготовок ККР, выполненных методом полусухого прессования (справа) и методом механической обработки (слева)

Уравнение профиля шероховатой поверхности, образуемого алмазным сверлом, имеет вид [5]

$$R_d = f(z) = -a \cdot \sin\left(\frac{z2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}\right) - a + \frac{d}{2}, \quad (4)$$

где R_d – уравнение поверхности отверстия, $2a$ – глубина рисков до шлифования, t – период следования рисков, d – диаметр отверстия, z – продольная координата.

При необходимости снижения шероховатости поверхности отверстия после сверления алмазным сверлом в технологический маршрут включается этап тонкого шлифования, осуществляемого ультразвуковым способом. Уравнение поверхности после тонкого шлифования имеет вид [5]

$$R_d = f(z) = \begin{cases} -a \cdot \sin\left(\frac{z2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}\right) - a + \frac{d}{2} & \text{при } \begin{cases} z < z_{0d} + nt \\ z > t - z_{0d} + (n-1)t \end{cases} \\ -h + \frac{d}{2} & \text{при } \begin{cases} z > z_{0d} + nt \\ z < t - z_{0d} + nt \end{cases}, \end{cases} \quad \text{где } \begin{cases} n \in N \\ n \in [0, L/t] \end{cases}, \quad (5)$$

где h – глубина рисок после шлифования, L – длина отверстия, $z_{0d} = \frac{t}{2\pi} \left[\arcsin\left(\frac{h-a}{a}\right) + \frac{\pi}{2} \right]$ – половина ширины риски после шлифования.

Вид профиля поверхности отверстия после сверления алмазным сверлом и тонкого шлифования ультразвуковым способом схематически показан на рис. 5.

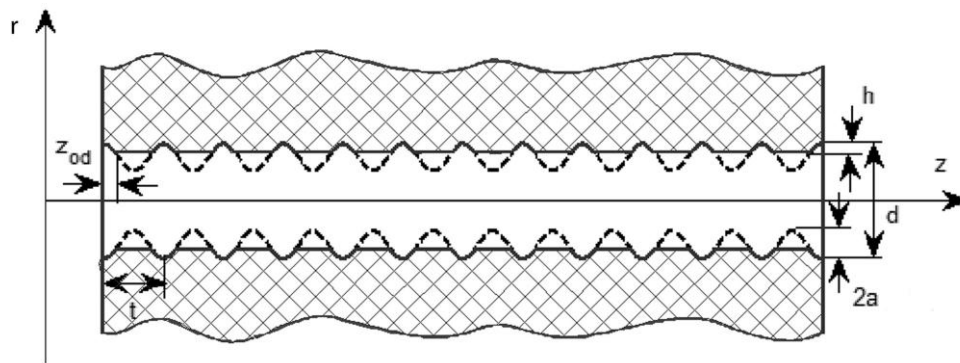


Рис. 5. Вид профиля поверхности отверстия:
после тонкого шлифования – сплошная линия,
после сверления алмазным сверлом – штриховая линия

В предложенной математической модели не учитывается профиль шероховатости поверхности отверстия, образуемой при ультразвуковой обработке.

Математическая модель коаксиального керамического резонатора

Техпроцесс изготовления образцов ККР завершается после металлизации поверхностей керамической втулки (кроме одного торца), при этом профиль шероховатости керамической втулки переносится на токопроводящие поверхности внешнего и внутреннего проводников резонатора.

Собственные колебания в объемных резонаторах, одним из видов которых является ККР, описываются однородными уравнениями Максвелла.

Решая эти уравнения с учетом граничных условий для идеально проводящих поверхностей можно видеть, что основным типом волны для коаксиальных резонаторов является T -волна [6]. Условием отсутствия высших типов волн в них является неравенство

$$\lambda > 1 / \sqrt{\frac{4}{\pi^2(D+d)^2} + \frac{1}{16L^2}}. \quad (6)$$

Собственная добротность резонатора Q , являющаяся одной из основных его характеристик, определяется как

$$Q = \frac{\omega_0 W}{P}, \quad (7)$$

где $P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \oint (\vec{E} \times \vec{H}^*) \vec{n} dS$ – мощность потерь, $W = \int \frac{\mu}{2} |\vec{H}|^2 dV = \int \frac{\varepsilon}{2} |\vec{E}|^2 dV$ – запасенная резонатором энергия, $P_r = \omega_0 W$ – реактивная мощность, ω_0 – резонансная частота.

При диэлектрической проницаемости керамического материала $\varepsilon \gg 1$ излучением открытого конца резонатора можно пренебречь. Тогда Q можно выразить через частичные добротности Q_C и Q_D как [6]

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_C} + \frac{1}{Q_D}, \quad (8)$$

где Q_C – частичная добротность, связанная с потерями в стенках резонатора, Q_D – частичная добротность, связанная с потерями в диэлектрике.

Частичная добротность Q_C определяется как [6]

$$Q_C = \frac{\omega_0 W}{P_C} = \frac{\frac{\omega_0 \mu}{2} \int |\vec{H}|^2 dV}{\frac{1}{2} \operatorname{Re} \oint (\vec{E} \times \vec{H}^*) \vec{n} dS} = \sqrt{2\omega_0 \mu_0 \sigma} \frac{\int |\vec{H}|^2 dV}{\int |\vec{H}|^2 dS}, \quad (9)$$

где P_C – мощность потерь в стенках резонатора, σ – проводимость стенок резонатора, $\mu = \mu_m = 1$ – относительные магнитные проницаемости диэлектрика и металла.

Частичная добротность Q_D равна [6]

$$Q_D = \frac{\omega_0 W}{P_D} = \frac{\frac{\omega_0 \varepsilon}{2} \int |\vec{E}|^2 dV}{\frac{\sigma_D}{2} \int |\vec{E}|^2 dV} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}, \quad (10)$$

где P_D – мощность потерь в диэлектрике, σ_D – проводимость диэлектрика, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике.

Отсюда собственная добротность Q будет равна

$$Q = \frac{Q_C \cdot Q_D}{Q_C + Q_D} = \frac{\omega_0 W}{\operatorname{tg} \delta \cdot \omega_0 W + P_C}. \quad (11)$$

Компоненты TEM -поля коаксиального резонатора имеют вид [6]

$$E = \frac{E_0}{r} \sin\left(\frac{z\pi}{2L}\right), \quad H = \frac{iE_0}{Z_{\perp} r} \cos\left(\frac{z\pi}{2L}\right), \quad (12)$$

где E_0 – амплитудный коэффициент, $Z_{\perp} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ – волновое сопротивление среды.

Структура поля в резонаторе мало меняется при наличии шероховатости и, следовательно, запасенная в нём энергия W будет равна

$$W = \int \frac{\mu}{2} |\vec{H}|^2 dV = \frac{\varepsilon E_0^2}{2} \int \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right)}{r^2} dV = \frac{\varepsilon E_0^2}{2} \pi L \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right), \quad (13)$$

мощность потерь в стенках резонатора P_C

$$P_C = \frac{1}{2\sigma\delta} \int |\vec{H}|^2 dV = \frac{\varepsilon E_0^2}{2\sigma\delta\mu_0} \left[2\pi \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \int \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right)}{R_D^2} dS_D + \int \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right)}{R_d^2} dS_d \right]. \quad (14)$$

Интеграл по поверхности внутреннего проводника в выражении (14) вычисляется с помощью замены переменных

$$I_d = \int \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right)}{R_d^2} dS_d = 2L \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{z_0 d 2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}} \frac{\cos^2\left(\frac{t(z'_d + \pi/2)}{4L}\right) \cdot R'_d(a, z'_d)}{-a \cdot \sin(z'_d) - a + \frac{d}{2}} dz'_d + \right]$$

$$+ \frac{4L}{(-2h+d)t} \cdot \cos\left(\frac{(t+2z_{0d})\pi}{4L}\right) \cdot \sin\left(\frac{(t-2z_{0d})\pi}{4L}\right) + \frac{(t-2z_{0d})\pi}{(-2h+d)t} \Big], \quad (15)$$

где dS_d – площадь элементарной области поверхности внутреннего проводника, $z'_d = \frac{z2\pi}{t} - \frac{\pi}{2}$

– замена переменной, $R'_d(a, z'_d) = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi a}{t}\right)^2 \cos^2(z'_d)}$.

Для интегрирования по поверхности внешнего проводника найдем среднее значение $\overline{R_D}$, пользуясь уравнением (3), которое описывает эту поверхность в зависимости от случайного параметра α . Плотность вероятности случайной величины α , распределенной по равномерному закону, равна

$$P(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha < 0 \text{ и } \alpha > \pi \\ \frac{1}{\pi} & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \pi \end{cases}. \quad (16)$$

Тогда плотность вероятности функции R_D от случайной величины α можно найти по формуле [7]

$$P_{R_D}(R_D) = P_\alpha(\alpha) \cdot \left| \frac{d\alpha}{dR_D} \right|. \quad (17)$$

Отсюда среднее значение функции $\overline{R_D}$ будет равно

$$\overline{R_D} = \int_{-\infty}^{\infty} R_D \cdot P_{R_D}(R_D) dR_D = \int_0^\pi R_D \cdot P_\alpha(\alpha) d\alpha. \quad (18)$$

Подставляя в (18) выражения (3) и (16), получим

$$\overline{R_D} = \begin{cases} K + r_0^0 + \frac{D}{2} & \text{при } z_{n2}^0 \leq z < z_{0n}^0, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ K_n + r_0^0 + \frac{D}{2} & \text{при } z_{0n}^0 + z_n \leq X < z_{n1}^0, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ H + \frac{D}{2} & \text{при } (n=1) \quad z < z_{12}^0 \text{ и } (n>1) \quad z_{(n-1)1}^0 \leq z < z_{n2}^0, \quad n = 1, 2, \dots, N \\ \frac{D}{2} & \text{при } z_{0n}^0 \leq X < z_{0n}^0 + z_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \end{cases}, \quad (19)$$

где $K = \frac{2a}{\pi\sqrt{b^2 - (z - z_{0n}^0)^2}} \left[\frac{(z - z_{0n}^0)^2}{b} \Pi(L, 1, M) - b \cdot F(1, M) \right]$,

$$K_n = \frac{2a}{\pi\sqrt{b^2 - (z - z_{0n}^0 - z_n)^2}} \left[\frac{(z - z_{0n}^0 - z_n)^2}{b} \Pi(L, 1, M_n) - b \cdot F(1, M_n) \right],$$

$F(1, M)$ и $F(1, M_n)$ – полные нормальные эллиптические интегралы 1-го рода,
 $\Pi(L, 1, M)$ и $\Pi(L, 1, M_n)$ – полные нормальные эллиптические интегралы 3-го рода,

$$L = \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1, \quad M = \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{b^2 - (z - z_{0n}^0)^2}}, \quad M_n = \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{b^2 - (z - z_{0n}^0 - z_n)^2}};$$

$$r_0^0 = \overline{R_1^0(0)} = \frac{2a}{\pi} F\left(1, \sqrt{-L}\right) - \text{сдвиг по оси } O\Gamma;$$

$$z_{0n}^0 = (2n-1)b, \quad n = 1, 2, \dots, N - \text{сдвиг по оси } OZ;$$

$$z_{n1}^0 = z_{h1}^0 + z_{0n}^0, \quad z_{n2}^0 = z_{h2}^0 + z_{0n}^0, \quad z_{h1}^0 - \text{положительный корень уравнения } H - r_0^0 = \overline{R_2^0(z - z_n)},$$

$$z_{h2}^0 - \text{отрицательный корень уравнения } H - r_0^0 = \overline{R_2^0(z)},$$

$$\overline{R_{1,2}^0(z)} = \frac{2a}{\pi\sqrt{b^2 - z^2}} \left[\pm b \cdot F\left(1, \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{b^2 - z^2}}\right) \mp \frac{z^2}{b} \Pi\left(\frac{a^2 - b^2}{b^2}, 1, \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{b^2 - z^2}}\right) \right],$$

D – диаметр внешнего проводника.

Тогда интеграл по поверхности внешнего проводника

$$I_D = \int \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right)}{R_D^2} dS_D = 2\pi N \left[\int_{z_{12}^0}^b \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right) \cdot R_D'}{K + r_0^0 + \frac{D}{2}} dz + \int_b^{z_{11}^0} \frac{\cos^2\left(\frac{z\pi}{2L}\right) \cdot R_{Dn}'}{K_n + r_0^0 + \frac{D}{2}} dz + \right. \\ \left. + \frac{1}{2H + D} \cdot \cos\left(\frac{(z_{22}^0 + z_{11}^0)\pi}{2L}\right) \cdot \sin\left(\frac{(z_{22}^0 - z_{11}^0)\pi}{2L}\right) + \frac{(z_{22}^0 - z_{11}^0)\pi}{2L(2H + D)} + \right. \\ \left. + \frac{1}{D} \cdot \cos\left(\frac{(2z_{0n}^0 + z_n)\pi}{2L}\right) \cdot \sin\left(\frac{z_n\pi}{2L}\right) + \frac{z_n\pi}{2LD} \right], \quad (20)$$

где dS_D – площадь элементарной области поверхности внешнего проводника,

$$R_D'(a, z_d') = \sqrt{1 + \frac{4a^2(z - z_{0n}^0)^2}{\pi^2 b^2 (b^2 - (z - z_{0n}^0)^2)} \Pi(L, 1, M)^2},$$

$$R_{Dn}'(a, z_d') = \sqrt{1 + \frac{4a^2(z - z_{0n}^0 - z_n)^2}{\pi^2 b^2 (b^2 - (z - z_{0n}^0 - z_n)^2)} \Pi(L, 1, M_n)^2}.$$

Резонансную частоту ω_0 ККР с учетом емкости открытого конца резонатора C можно найти, решая трансцендентное уравнение условия резонанса

$$\text{Im}\left(\frac{1}{i\omega C} + iZ_\epsilon \text{tg}(kL)\right) = 0, \quad (21)$$

где $Z_\epsilon = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$ – волновое сопротивление коаксиальной линии [6],

$C = \frac{d\epsilon}{2} \ln\left(\frac{2\sqrt{\pi L d}}{D - d}\right)$ – краевая емкость открытого конца резонатора [8], $k = k_0 \left(1 - i \frac{1}{2Q}\right)$ – соб-

ственные значения с учетом потерь [9], $k_0 = \omega_0 \sqrt{\epsilon\mu}$ – собственные значения для резонатора без потерь.

Подставляя выражения (13) и (14), а также найденную резонансную частоту ККР ω_0 в (11) можно определить собственную добротность резонатора Q как

$$Q = \frac{\omega_0 \pi L \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\text{tg}\delta \cdot \omega_0 \pi L \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \sqrt{\frac{\omega_0}{2\sigma\mu_0}} \left(2\pi \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + I_d + I_D\right)}. \quad (22)$$

Импеданс резонатора Z определяется как

$$Z = iZ_0 \operatorname{tg}(kL) = Z_0 \frac{\operatorname{th}\left(\frac{\omega\pi}{4Q\omega_0}\right) \cdot \left[1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\pi}{2\omega_0}\right)\right] + i \operatorname{tg}\left(\frac{\omega\pi}{2\omega_0}\right) \cdot \left[1 - \operatorname{th}^2\left(\frac{\omega\pi}{4Q\omega_0}\right)\right]}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\pi}{2\omega_0}\right) \cdot \operatorname{th}^2\left(\frac{\omega\pi}{4Q\omega_0}\right)}. \quad (23)$$

Формула (23) справедлива при условии отсутствия в ККР высших типов волн (6).

Зная импеданс Z можно построить АЧХ ККР. Графики АЧХ ККР с использованием втулки из керамики В100 ($\epsilon = 100$) с тонким шлифованием и без него приведены на рис. 6.

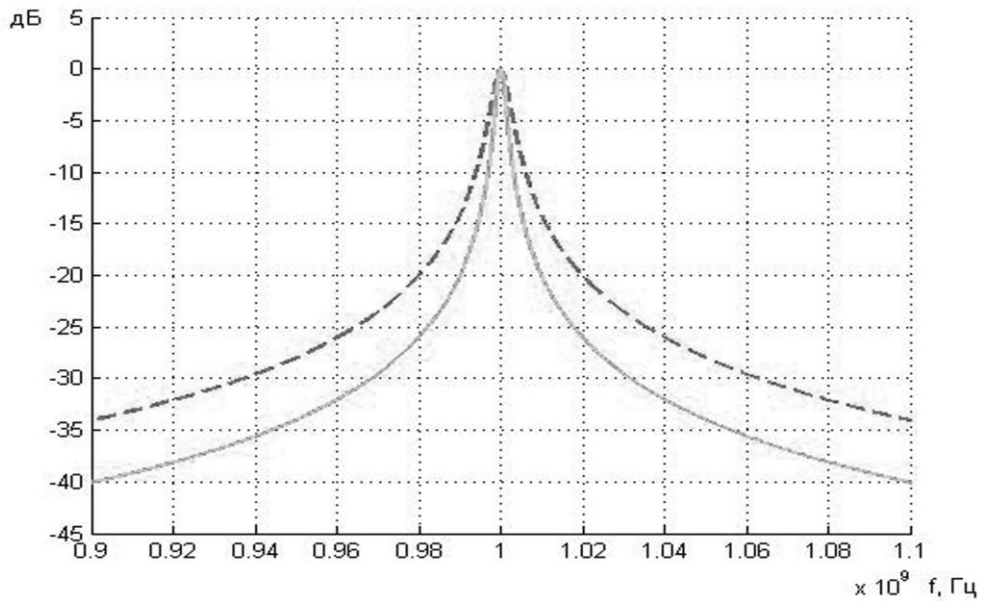


Рис. 6. Графики АЧХ резонатора из керамики В100 до (штриховая линия) и после тонкого шлифования (сплошная линия)

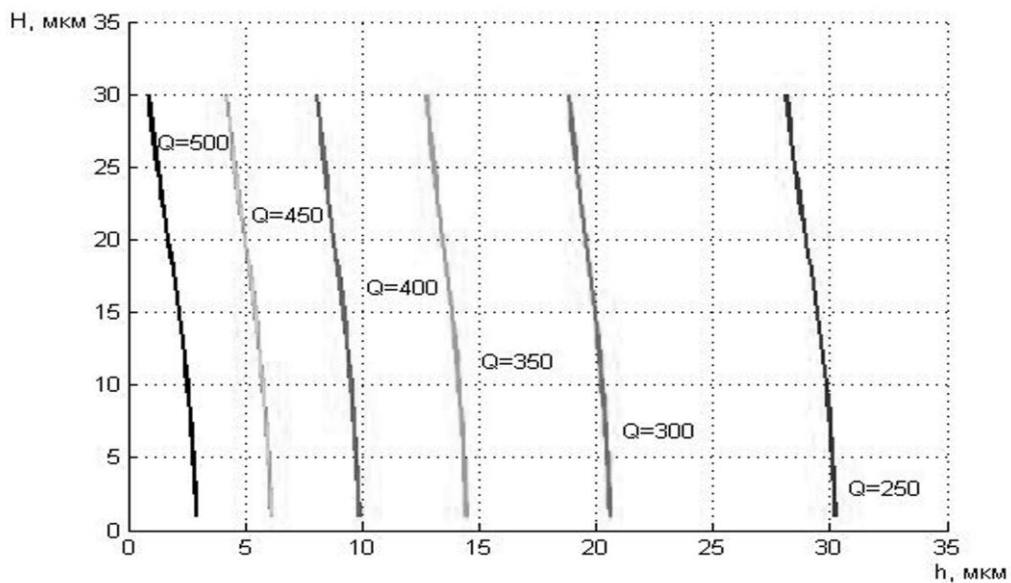


Рис. 7. Номограмма определения требований к шероховатости токопроводящих поверхностей ККР

С помощью численного моделирования для резонаторов, изготовленных из керамики В100, была построена номограмма рис. 7, определяющая зависимость собственной добротности ККР от глубины шероховатости внешней (H) и внутренней (h) поверхностей. При обработке внешней поверхности заготовки ККР периферией абразивного круга параметры, определяющие среднюю величину зерен абразивного круга, взяты равными $a = 60$ мкм и $b = 80$ мкм. При изготовлении отверстия в заготовке ККР алмазным сверлом средний период следования рисок по всей длине отверстия составляет $t = 20$ мкм.

На графиках, приведенных на рис. 7 можно видеть, что на величину собственной добротности резонатора большее влияние оказывает шероховатость его внутренней поверхности. Применение полученной номограммы при проектировании полосно-пропускающих фильтров и стабилизированных автогенераторов позволяет по минимально допустимым для них значениям собственной добротности используемых ККР определить оптимальные требования к параметрам шероховатости поверхностей керамических втулок.

Заключение

На основе уравнения шероховатых поверхностей керамических заготовок и их учёта в электродинамической модели ККР разработана математическая модель резонатора, позволяющая оценить ожидаемые значения собственной добротности экспериментального образца ККР при заданных параметрах шероховатости поверхностей керамической втулки.

Практическое применение полученных результатов заключается в возможности оптимизации техпроцесса изготовления экспериментальных образцов ККР под конкретные требования к величине его собственной добротности, в ряде случаев исключив из него самые трудоёмкие и затратные этапы – тонкое алмазное шлифование внешней поверхности керамической втулки и шлифование поверхности отверстия ультразвуковым способом.

Электродинамический подход, на основе которого создана математическая модель ККР круглого сечения, может быть использован при разработке модели ККР квадратного сечения.

Библиографический список

1. ВЧ- и СВЧ-керамические материалы и микроволновые элементы. Каталог продукции. Санкт-Петербург: ООО «Керамика», 2004.
2. **Козлов, В.А.** Проектирование полосно-пропускающих СВЧ-фильтров на основе коаксиальных керамических резонаторов / В.А.Козлов [и др.] // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XI Международной научно-технической конференции. – Изд-во УрГУ, Екатеринбург. 2012. С. 204–205.
3. **Козлов, В.А.** Технология изготовления и практическое применение керамических резонаторов в устройствах СВЧ диапазона / В.А. Козлов [и др.] // Антенны. 2010. Вып. 7. С. 63–66.
4. Применение коаксиальных керамических резонаторов в устройствах СВЧ-диапазона. Антенны и функциональные узлы СВЧ-и КВЧ-диапазонов. Методы расчёта и технология изготовления / В.А. Козлов [и др.] / под ред. А.Ю. Седакова. – М.: Радиотехник», 2011. – 112 с.
5. **Козлов, В.А.** Математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств / В.А. Козлов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17, № 3. С. 76–80.
6. **Никольский, В.В.** Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М.: Высш. шк., 1964. – 383 с.
7. **Баскаков, С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.

8. Кугушев, А.М. Основы радиоэлектроники / А.М. Кугушев, Н.С. Голубева. – М.: Энергия, 1969. – 880 с.
9. Каценеленбаум, Б.З. Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. – М.: Наука, 1966. – 240 с.

*Дата поступления
в редакцию: 16.04.2015*

М.М. Ivoylova

CERAMIC COAXIAL RESONATOR MODEL TAKING INTO ACCOUNT CONDUCTIVE SURFACES ROUGHNESS

Federal State Owned Unitary Enterprise Federal Research and Production Center,
«Measuring system research institute named after Yu.Ye. Sedakov»

Purpose: The purpose of the article is the estimation of the conductive surfaces roughness influence of the ceramic coaxial resonator, made with the ceramic storage mechanical treatment on its main parameters.

Design/methodology/approach: The fundamental stage of the ceramic bushings making technology are the following operations: the polishing with abrasive wheels (periphery) for the outer surface forming, the drilling with diamond drill for the hole making. In this research the electrodynamic and mathematical models of a ceramic coaxial resonator were developed on the base of the mathematical models of its outer and inner surfaces made with mechanical treatment methods.

Findings: It is shown that, the inner surface roughness has bigger influence on a resonator quality factor value. Using the results it is possible to formulate the optimal demands to resonator ceramic bushings roughness, taking into account band pass filters and active oscillators given parameters.

Research limitations/implications: The objective is considered within the T-wave approach which is the main wave type for coaxial resonator.

Originality/value: The received mathematical models provide the ceramic coaxial resonator designing optimal technological route according to given the resonator electrical parameters (eigen frequency, quality factor). At the same time in some cases there may be omitted the most difficult stages such as the fine diamond polishing and the ultrasonic methods polishing.

Key words: coaxial ceramic resonator, mathematical model of a resonator, mathematical models of surfaces roughness.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 532.5

Р.В. Шамин, А.В. Юдин, Д.Е. Тихонов

О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ВОЛН-УБИЙЦ

Российский университет дружбы народов

Рассмотрены вычислительные эксперименты по моделированию поверхностного волнения, которые применяются для исследования экстремально больших поверхностных волн в зависимости от параметров начального волнения. Рассмотрена гипотеза об экспоненциальном законе распределения времени ожидания волн-убийц.

Ключевые слова: поверхностные волны, волна-убийца, аномально большие волны в океане, вычислительный эксперимент, статистическая проверка гипотез.

Введение

В настоящее время феномен аномально больших поверхностных волн в океане (волны-убийцы) находится в центре внимания многих исследователей [1]. Одной из основных проблем, связанных с исследованием волн-убийц, является случайность их появления. С одной стороны, такие волны появляются достаточно редко, но в то же время частота их появления является закономерной. Как правило, редкие события описываются процессами Пуассона. Из математической статистики известно, что если число событий распределено по закону Пуассона, то интервалы между событиями должны быть распределены по экспоненциальному закону [2]. Использование пуассоновских процессов также мотивируется тем, что распределение Пуассона возникает в ряде предельных теорем.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет не количество экстремальных волн, возникающих в течение времени, а время ожидания появления волны-убийцы. Поэтому мы будем рассматривать функции распределения времени ожидания таких волн.

В последнее время с помощью вычислительных экспериментов удалось достичь большого прогресса в изучении статистики и качественных характеристик волн-убийц (см. [3 – 7] и др.). На основании этих работ можно сделать вывод, что экстремальные волны возникают вследствие нелинейной динамики поверхностных волн. В настоящей работе были проведены масштабные эксперименты с целью статистической проверки гипотезы о законе распределения времени ожидания волн-убийц.

Имея достаточно богатую выборку времен возникновения волн-убийц, можно проверить гипотезу о применимости экспоненциального закона распределения к описанию времени возникновения этих событий с помощью хорошо известных статистических методов проверки гипотез. В нашей работе мы сформировали беспрецедентно большую базу данных, содержащую данные времени возникновения волн-убийц, на основании масштабных вычислительных экспериментов.

Постановка вычислительных экспериментов

Вычислительные эксперименты основаны на численном решении уравнений, описывающих плоское (2π -периодическое) потенциальное течение идеальной жидкости со свободной поверхностью и бесконечной глубиной. Для наших целей такая модель является вполне оправданной [8, 9].

Для построения эффективных численных методов и проведения больших серий вычислительных экспериментов мы используем полные нелинейные уравнения гидродинамики идеальной жидкости со свободной поверхностью, которые после проведения конформного отображения области, занятой жидкостью, принимают удобный для этого вид. Впервые применение конформных преобразований для описания нестационарного течения идеальной жидкости со свободной поверхностью было предложено в работах [10, 11]. В работах [12–14] и других конформные переменные применялись для численного моделирования динамики поверхностных волн. В нашей работе моделирование аномально больших поверхностных волн основано на уравнениях, предложенных в работе [15]. Вопросы математической корректности этих уравнений и построения численных методов их решения были исследованы в серии работ [16–21].

Хорошо известно, что при моделировании нелинейной динамики поверхностных волн периодически происходит обрушение волн (необязательно максимальной амплитуды). Чтобы исключить ситуацию преждевременной остановки расчета, мы использовали диссипацию в эволюционных уравнениях. Эта диссипация была пропорциональна четвертым производным профиля свободной поверхности. Таким образом, она была значимой лишь при большой крутизне поверхности, что соответствует сбросу энергии при обрушении волн. Чтобы скомпенсировать потерю энергии вследствие описанной ранее диссипации, мы применяли также и накачку, которая физически соответствовала поверхностной силе, пропорциональной наклону профиля волны. Хотя эта накачка и может рассматриваться как ветровое воздействие на поверхностные волны, она включалась только в момент снижения энергии, поэтому волны, которые моделировались в наших экспериментах, соответствуют волнам зыби, а не ветровым волнам.

Постановки вычислительных экспериментов в основном соответствовали постановкам из [4, 5]. Начальное возмущение поверхности в вычислительных экспериментах определялось как ансамбль бегущих в одну сторону волн со средним значением волнового числа $K_0 = 50$. Предполагалось, что начальное возмущение поверхности задается суммой гармоник со случайными фазами

$$\eta(x, 0) = \sum_{-\frac{1}{2}K_{\max}}^{\frac{1}{2}K_{\max}} \varphi(k - K_0) \cos(kx - \xi_k).$$

Здесь K_{\max} – полное число спектральных мод, ξ_k – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $0 \leq \xi_k < 2\pi$. На рис. 1 представлен характерный график функции $\varphi(k) = k \exp(-\alpha k^2)$.

Параметры спектра подбирались так, чтобы квадрат средней крутизны

$$\mu^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta_x^2 dx$$

и дисперсия

$$D = \left(\int_{-K_0}^{K_0} k^2 e^{-\alpha k^2} dx \right) \left(\int_{-K_0}^{K_0} e^{-\alpha k^2} dx \right)^{-1}$$

принимали заданные значения (число K_0 определяет спектральную ширину).

Единого общепризнанного определения волны-убийцы до сих пор нет, поскольку это явление изначально содержит оценочные категории («большая волна», «опасное явление» и т.д.). Относительно различных определений волн-убийц см. [9, 22, 23]. Мы будем называть волной-убийцей такую волну, высота которой удовлетворяет амплитудному критерию:

$$\nu(t^*) = \frac{H_{\max}(t^*)}{\overline{H}_s(t^*)} \geq 2.1,$$

где $H_{\max}(t^*)$ – максимальная высота волнения в момент времени t^* ; $\overline{H}_s(t^*)$ – усредненная значительная высота волнения в момент времени t^* , т.е.

$$\overline{H}_s(t^*) = \frac{1}{t^*} \int_0^{t^*} H_s(\tau) d\tau.$$

Здесь $H_s(\tau)$ – значительная высота волнения в момент времени τ . Усреднение значительной высоты волнения позволяет нивелировать вклад самой аномальной волны при расчете значительной высоты волнения. Значение $\nu^* = 2.1$ соответствует принятым определениям волн-убийц в большинстве работ.

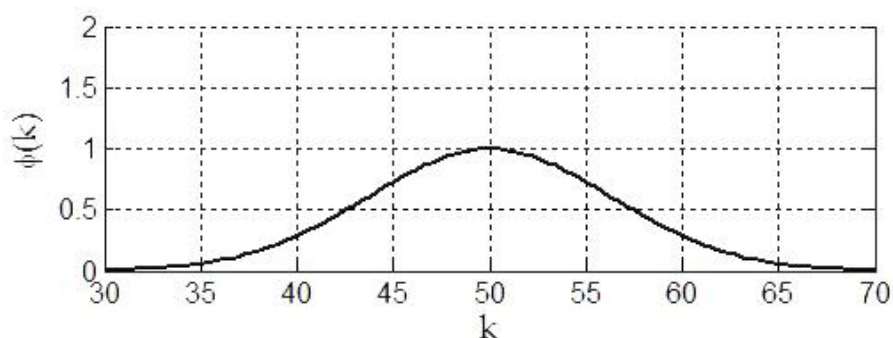


Рис. 1. Характерный график функции $\varphi(k - 50)$

Для исследования было проведено две серии экспериментов. В каждом из экспериментов в начальный момент времени волновое число принимало значение $K_0 = 50$, дисперсия $D = 20$, квадрат средней крутизны $\mu^2 = 2.06 \times 10^{-3}$ и $\mu^2 = 4.1 \times 10^{-3}$ соответственно. Была проведена масштабная серия однотипных экспериментов общей длительностью примерно 85800 периодов волн.

Закон распределения времени ожидания волны-убийцы

Как мы уже отмечали, волна-убийца представляет собой редкое событие в динамике поверхностных волн, поэтому для его описания предполагается использование пуассоновского потока. Используя вычислительные опыты, мы можем проверить эту гипотезу с помощью методов математической статистики.

Мы будем рассматривать случайную величину – время ожидания волны-убийцы, которую обозначим T . Для применения статистических критериев выдвинем основную и альтернативную гипотезы:

H_0 : $T \sim F_{\text{exp}}(\lambda)$ – случайная величина T имеет экспоненциальный закон распределения с параметром λ ;

H_1 : $T \not\sim F_{\text{exp}}(\lambda)$ – случайная величина T не распределена по экспоненциальному закону.

Экспоненциальный закон имеет следующую функцию распределения:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t}, & \text{если } t > 0, \\ 0, & \text{если } t \leq 0, \end{cases}$$

где $\lambda > 0$ – параметр распределения. Плотность распределения имеет вид:

$$p(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & \text{если } t > 0, \\ 0, & \text{если } t \leq 0. \end{cases}$$

При этом математическое ожидание E и дисперсия σ^2 связаны следующим соотношением:

$$E = \sqrt{\sigma^2} = \frac{1}{\lambda}.$$

Для проверки нашей статистической гипотезы мы использовали стандартный метод – критерий согласия χ^2 с уровнем значимости $\alpha = 0.05$.

Для проверки выдвинутой гипотезы вычислялась величина:

$$\psi_T = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i},$$

где m – число равных интервалов, на которые разбивается выборка, n_i – число попаданий в i -й интервал, $n'_i = F(t_{i+1}) - F(t_i)$ – теоретические частоты, F – функция распределения экспоненциального закона. Значение ψ_T сравнивается с табличным критическим значением χ_k^2 , где $k = (m - 1)$ – количество степеней свободы. Если $\psi_T \leq \chi_k^2$, то гипотеза H_0 принимается с вероятностью $1 - \alpha$, если же $\psi_T > \chi_k^2$, H_0 отвергается в пользу альтернативной гипотезы на уровне значимости α .

Кроме того, по значениям эмпирической и теоретической функции плотности вероятности для каждого из экспериментов был вычислен коэффициент детерминации, рассчитываемый по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p}_i)^2},$$

где p_i – значения эмпирической функции плотности вероятности, \hat{p}_i – значения теоретической функции плотности вероятности,

$$\bar{p}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i.$$

Сначала проверим нашу гипотезу для каждой серии экспериментов с одинаковыми значениями квадрата средней крутизны $\mu^2 = 2.06 \times 10^{-3}$ и $\mu^2 = 4.1 \times 10^{-3}$, а потом для смешанного случая.

Для статистического анализа сначала были рассмотрены результаты вычислительных экспериментов, в которых квадрат средней крутизны принимал значение $\mu^2 = 2.06 \times 10^{-3}$. Общая длительность экспериментов в этом случае составила $T = 41400$ периодов волн, в течение которых была зарегистрирована $N = 61$ волна-убийца. Математическое ожидание имело значение $E = 1203$, а дисперсия $\sigma^2 = 1200519$. Параметр экспоненциального закона распределения $\lambda = 0.0008$. Соотношение $\sigma/E = 0.91$ показывает хорошее соответствие гипотезе H_0 . Теоретическая функция плотности распределения имеет вид

$$p(t) = 0.0008 e^{-0.0008t}, t > 0. \quad (1)$$

На рис. 2 приведен пример волнограммы части эксперимента. Пространственно-временные следы аномально больших волн в течение примерно 3750 периодов волн представлены на рис. 3. Сравнительный график теоретической и эмпирической плотности распределения времени ожидания волн-убийц в вычислительном эксперименте представлен на рис. 4.

В результате вычислений по критерию χ^2 при $m = 6$ интервалах разбиения мы получили, что $\psi_T = 3.16$, $\chi_k^2 = 7.81$, $\psi_T \leq \chi_k^2$, т.е. гипотеза H_0 об экспоненциальном законе распределения принимается на уровне значимости $\alpha = 0.05$.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.88$, что свидетельствует о том, что высокая доля дисперсии эмпирических значений плотности вероятности объясняется полученной теоретической функцией (1).

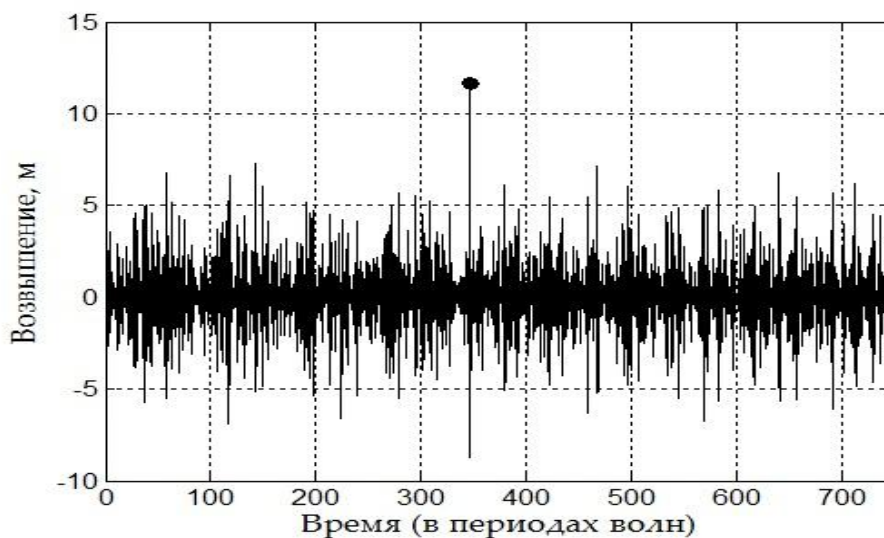


Рис. 2. Волнограмма части эксперимента

Аналогичные вычисления проводились и для экспериментов, в которых квадрат средней крутизны принимал значение $\mu^2 = 4.1 \times 10^{-3}$. В этом случае общая длительность экспериментов составила примерно $T = 44400$ периодов волн, общее количество волн-убийц $N = 105$. Соответствующие величины имели следующие значения $E = 894.87$, $\sigma^2 = 883002.3$, параметр закона $\lambda = 0.0011$. Соотношение $\sigma/E = 0.95$ также указывает на применимость экспоненциального закона распределения. Плотность вероятности имеет вид:

$$p(t) = 0.0011 e^{-0.0011t}, t > 0. \quad (2)$$

Сравнительный график теоретической и эмпирической плотности распределения времени ожидания волн-убийц в вычислительном эксперименте представлен на рис. 5.

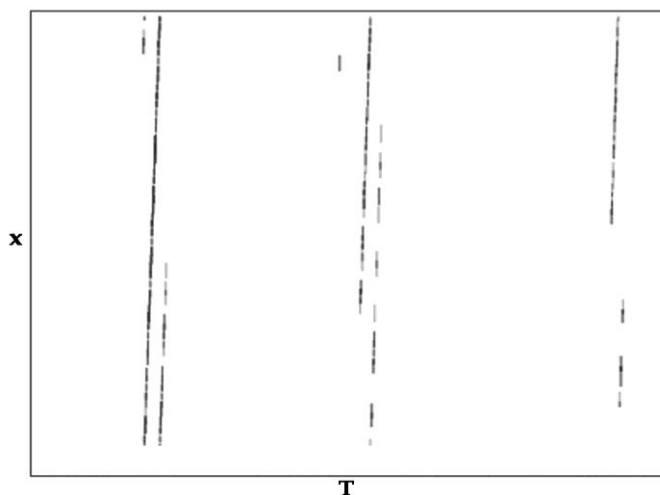


Рис. 3. Пространственно-временные следы волн-убийц

При проверке гипотезы по критерию χ^2 , при $m = 12$, получены следующие результаты: $\psi_T = 6.01$, $\chi_k^2 = 9.49$, $\psi_T \leq \chi_k^2$, следовательно, гипотеза H_0 об экспоненциальном законе распределения принимается на уровне значимости $\alpha = 0.05$.

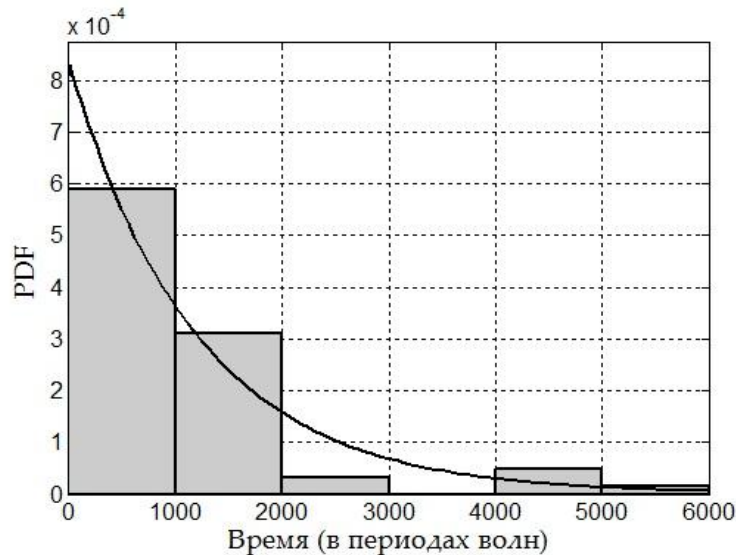


Рис. 4. Сравнительный график теоретической и эмпирической функции плотности распределения для экспериментов с $\mu^2 = 2.06 \times 10^{-3}$ (сплошная линия – теоретическая плотность вероятности, гистограмма – эмпирическая плотность вероятности)

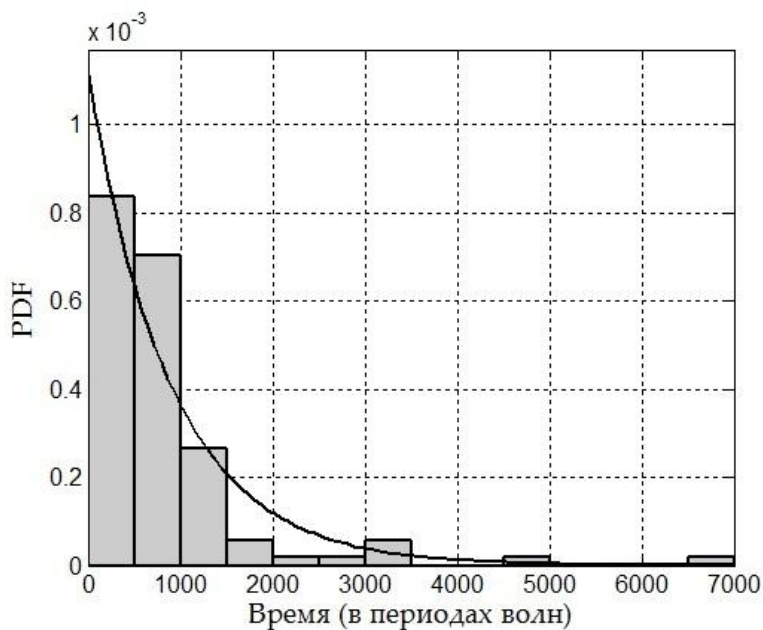


Рис. 5. Сравнительный график теоретической и эмпирической функции плотности распределения для экспериментов с $\mu^2 = 4.1 \times 10^{-3}$ (сплошная линия – теоретическая плотность вероятности, гистограмма – эмпирическая плотность вероятности)

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.97$ также позволяет сделать вывод о том, что высокая доля дисперсии эмпирических значений плотности вероятности объясняется полученной теоретической функцией (2).

Теперь проведем статистическую проверку гипотезы об экспоненциальном распределении времени ожидания волны-убийцы в случае, когда примерно в половине вычислительных экспериментов квадрат средней крутизны принимал одно значение, а в другой половине – другое значение. Этот случай соответствует ситуации, когда имеются волны с различными параметрами крутизны.

Общая длительность эксперимента составила $T = 85800$ периодов волн, количество зарегистрированных волн-убийц составило $N = 166$. Математическое ожидание, дисперсия и

интенсивность принимали следующие значения: $E = 1007.79$, $\sigma^2 = 1015190$, параметр закона $\lambda = 0.00099$. Соотношение: $\sigma/E = 0.99$. Плотность вероятности выражается соотношением:

$$p(t) = 0.00099 e^{-0.00099t}, t > 0. \quad (3)$$

Сравнительный график теоретической и эмпирической плотности распределения времени ожидания волн-убийц в вычислительном эксперименте представлен на рис. 6.

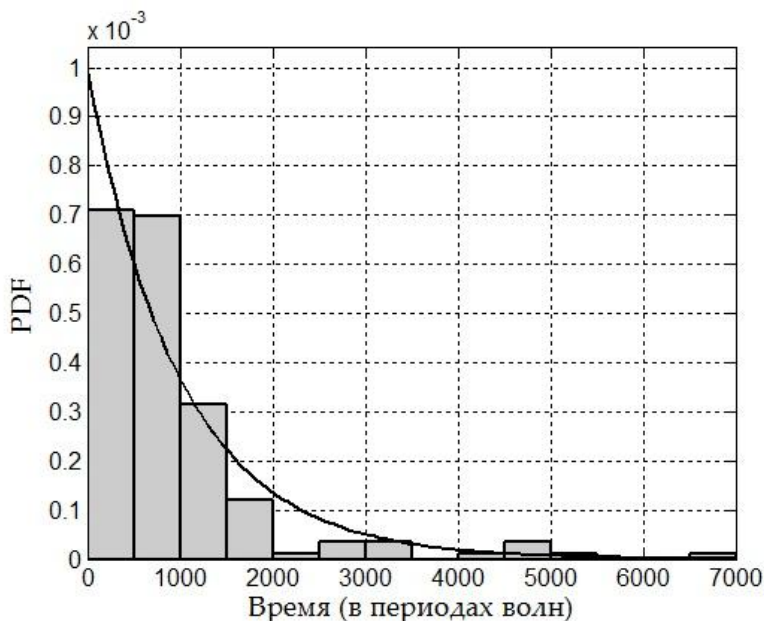


Рис. 6. Сравнительный график теоретической и эмпирической функции плотности распределения для экспериментов с различными значениями μ^2 (сплошная линия – теоретическая плотность вероятности, гистограмма – эмпирическая плотность вероятности)

В результате вычислений по критерию χ^2 при $m = 10$ интервалах разбиения мы получили, что $\psi_T = 14.88$, $\chi_k^2 = 12.59$, $\psi_T > \chi_k^2$, т.е. гипотеза H_0 об экспоненциальном законе распределения отвергается на уровне значимости $\alpha = 0/05$. В данном случае критерий χ^2 не дает оснований считать, что при рассмотренных параметрах волнения время ожидания волн-убийц описывается экспоненциальным законом распределения. Однако коэффициент детерминации принимал значение $R^2 = 0.99$, что свидетельствует о том, что высокая доля дисперсии эмпирических значений плотности вероятности объясняется полученной теоретической функцией (3). В данном случае можно считать, что время ожидания волны-убийцы также приближенно описывается экспоненциальным распределением.

Интересно отметить, что эмпирическая функция плотности вероятности в наших экспериментах имеет «неэкспоненциальные» хвосты, что свидетельствует о том, что в экспериментах всегда встречались очень большие интервалы между двумя соседними волнами-убийцами.

Заключение

В работе рассмотрен вопрос об оценке функции распределения времени ожидания волны-убийцы. С помощью результатов больших серий вычислительных экспериментов показано, что время ожидания аномальной поверхностной волны может быть описано с помощью экспоненциального закона распределения. Этот результат является ожидаемым и не противоречит известным натурным наблюдениям [24].

Однако в случае обработки результатов натурных экспериментов следует учитывать возможное отклонение от экспоненциального закона, поскольку в реальной ситуации возможны волны различной крутизны.

Авторы выражают благодарность академику РАН В.Е. Захарову за постоянное внимание и поддержку работы, а также профессору Е.Н. Пелиновскому за полезные обсуждения предмета настоящей работы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-35-20550_мол_а_вед.

Библиографический список

1. **Kharif, С.** Rogue Waves in the Ocean / С. Kharif, E. Pelinovsky, A. Slunyaev. – Berlin: Springer, 2009. – 216 p.
2. **Крамер, Г.** Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
3. **Chalikov, D.** Freak waves: Their occurrence and probability // Phys. Fluids. 2009. V. 21. Iss. 7.
4. **Захаров, В.Е.** О вероятности возникновения волн-убийц / В.Е. Захаров, Р.В. Шамин // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 2. С. 68–71.
5. **Захаров, В.Е.** Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах / В.Е. Захаров, Р.В. Шамин // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. Вып. 1. С. 68–71.
6. **Слюняев, А.В.** Численное моделирование и анализ пространственно-временных полей аномальных морских волн / А.В. Слюняев, А.В. Сергеева // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 24–36.
7. **Шамин, Р.В.** Моделирование пространственно-временного распространения волн-убийц / Р.В. Шамин, А.В. Юдин // Доклады Академии наук. 2013. Т. 448. № 5. С. 592–594.
8. **Куркин, А.А.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: НГТУ, 2004. – 158 с.
9. **Чаликов, Д.В.** Портрет волны-убийцы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 5–14.
10. **Овсянников, Л.В.** К обоснованию теории мелкой воды // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики. Новосибирск, 1973. Вып. 15. С. 104–125.
11. **Whitney, J.C.** The numerical solution of unsteady free-surface flows by conformal mapping // In: Proc. Second Inter. Conf. on Numer. Fluid Dynamics (ed. M. Holt). 1971. Springer-Verlag. P. 458–462.
12. **Chalikov, D.** Modeling of Extreme Waves Based on Equations of Potential Flow with a Free Surface / D. Chalikov, D. Sheinin // Journ. Comp. Phys. 2005. V. 210. P. 247–273.
13. **Дьяченко, А.И.** Нелинейная динамика свободной поверхности идеальной жидкости / А.И. Дьяченко, В.Е. Захаров, Е.А. Кузнецов // Физика плазмы. 1999. № 10. С. 916–928.
14. **Ruban, V.P.** Water waves over a time-dependent bottom: Exact description for 2D potential flows // Phys. Lett. A. 2005. V. 340. № 1–4. P. 194–200.
15. **Zakharov, V.E.** New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface / V.E. Zakharov, A.I. Dyachenko, O.A. Vasilyev // Eur. J. Mech. B Fluids. 2002. V. 21. С. 283–291.
16. **Шамин, Р.В.** Динамика идеальной жидкости со свободной поверхностью в конформных переменных // Современная математика. Фундаментальные направления. 2008. Т. 28 С. 3–14.
17. **Шамин, Р.В.** Об одном численном методе в задаче о движении идеальной жидкости со свободной поверхностью // Сиб. журн. выч. мат. 2006. Т. 9. № 4. С. 325–340.
18. **Шамин, Р.В.** О существовании гладких решений уравнений Дьяченко, описывающих неустановившиеся течения идеальной жидкости со свободной поверхностью // Доклады Российской академии наук. 2006. Т. 406. № 5. С. 112–113.
19. **Шамин, Р.В.** Вычислительные эксперименты в моделировании поверхностных волн в океане / Р.В. Шамин. – М.: Наука, 2008. – 133 с.
20. **Шамин, Р.В.** Об оценке времени существования решений уравнения, описывающего поверхностные волны // Доклады Российской академии наук. 2008. Т. 418. № 5. С. 603–604.
21. **Шамин, Р.В.** Разрешимость уравнений, описывающих волны минимальной гладкости // Доклады Академии наук. 2010. Т. 432. № 4. С. 458–460.
22. **Бухановский, А.В.** Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз / А.В. Бухановский, Л.И. Лопатухин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №4. С. 5–18.

23. **Шамин, Р.В.** Вопросы устойчивости волн-убийц / Р.В. Шамин, А.В. Горленко, А.И. Смирнова // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 1. С. 96–105.
24. **Зайцев, А.И.** Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин / А.И. Зайцев, А.Е. Малащенко, Е.Н. Пелиновский // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 4. С. 35–42.
25. **Лидбеттер, М.** Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер, Х. Ротсен, Г. Линдгрэн. – М.: Мир, 1989. – 391 с.
26. **Шамин, Р.В.** Вопросы обнаружения и прогнозирования волн-убийц в вычислительных экспериментах / Р.В. Шамин, А.И. Смирнова, А.В. Юдин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 3. С. 23–33.

*Дата поступления
в редакцию 05.05.2015*

R.V. Shamin, A.V. Yudin, D.E. Tikhonov

ON THE LAW OF DISTRIBUTION OF THE ROGUE WAVES WAITING TIME

Peoples' Friendship University of Russia

We consider the computational experiments on modeling of the surface waves that used for studying of extremely large surface waves depending on initial wave parameters. We consider the hypothesis of exponential distribution law of rogue waves waiting time.

Key words: surface wave, rogue waves, abnormally large waves in the ocean, computer experiment, statistical hypothesis testing.

УДК 532.54

А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин², И.Л. Шарипова¹, В.В. Курулин¹, Е.Н. Пелиновский²,
Е.С. Тятюшкина¹, Д.П. Мелешкина¹, С.В. Лашкин¹, Н.В. Тарасова¹

МИНИМАЛЬНЫЙ БАЗИС ЗАДАЧ ВАЛИДАЦИИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Цель: В работе обсуждается процесс валидации, являющийся важным этапом на пути промышленного внедрения инженерных пакетов программ.

Метод: В основе исследования лежат физико-математические и численные модели, предназначенные для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью.

Результаты: В целях улучшения и систематизации знаний в настоящей работе разработан базис задач валидации, необходимый для оценки точности моделирования программных решений, предназначенных для моделирования течений вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью. Проведена его систематизация и обобщение.

Область применения: Представленные результаты позволяют разработчику инженерных пакетов программ сконцентрироваться на вычислении погрешности моделирования, а не на поиске достоверных данных.

Ключевые слова: валидация, инженерные пакеты программ, течения, свободная поверхность, численное моделирование.

Введение

Данная работа является продолжением работы [1], в которой представлен минимальный базис задач, необходимый для валидации программ (или модулей в составе пакета программ), моделирующих течения вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью. Процесс валидации, определяющий степень точности, с которой модель отображает объективную реальность с точки зрения предполагаемого использования, является важным этапом на пути научно-промышленного внедрения разрабатываемых программ. Процессу валидации, сопутствует калибровка, в ходе которой осуществляется регулирование числовых или физических параметров модели с целью лучшего соответствия экспериментальным данным.

Процесс валидации выявляет границы применимости физико-математических моделей и численных схем, которые позволяют моделировать физическое явление, протекающее в естественных условиях до проведения численного эксперимента. Достоверность физико-математической модели, предназначенной для описания того или иного процесса, можно определить оценив уровень вносимый ею погрешности и неопределенности по сравнению с натурным экспериментом.

В процессе валидации проверяются научные основы модели путем сравнения с экспериментальными данными и устанавливается, согласуются ли результаты численного моделирования с физическими реалиями. Степень точности, требуемая от результатов моделирования, зависит от предполагаемого их использования. Как правило, к каждой расчетной величине, будь то интегральная или абсолютная характеристика, предъявляются свои требования. Изложение основных принципов верификации и валидации методов CFD-моделирования представлены в [1, 2]. Процедура валидации, состоящая из стадии оценки сходимости итераций, стадии проверки решения на непротиворечивость, стадии сравнения с экспериментом, а также содержащая уровни классов задач представлена в [1].

Одним из наиболее сложных классов задач вычислительной гидродинамики является моделирование течений с поверхностями раздела двух или более сред, которые в свою очередь можно подразделить на два класса - смешивающиеся и несмешивающиеся жидкости. Задачи этого класса встречаются во многих инженерных и научных задачах и играют большую роль в природе и технике. К этим задачам относят струйные течения, движение пузырей, образование пленок, движение капельных сред и т.д. В общем случае физико-математические модели для моделирования этого класса течений подразумевает использование многофазного подхода, учитывающего межфазное взаимодействие. Такие модели достаточно сложны и должны учитывать специфику моделирования конкретного течения. Отметим здесь, что экспериментальные и натурные исследования таких течений сопряжены со значительными трудностями и затратами, поэтому оценка степени достоверности численных методов, моделирующих такие течения, является очень актуальной задачей.

Распространенным частным случаем таких течений являются течения со свободной поверхностью. К таким течениям относятся течения топлива в форсунках двигателей, движение смазочных материалов, поверхностные волны на воде и др. Для такого класса задач ввиду того, что плотность фаз, например, жидкости и воздуха, на порядки различаются друг от друга, предполагают, что на движение жидкости газ не оказывает особого влияния и ограничиваются предположением о том, что взаимодействующие фазы не смешиваются. Моделирование таких течений осуществляется с помощью специализированных моделей, основанных на выделении объемной доли вещества в объеме [3].

В настоящей работе представлен, на наш взгляд, минимальный базис задач, необходимый для валидации программ расчета течений со свободной поверхностью. Под минимальным понимается базис, включающий задачи, которые в обязательном порядке должны быть численно решены программой, подлежащей валидации. Здесь следует подчеркнуть, что даже самый полный базис задач не претендует на окончательный, и, на чем большем количестве задач будет проверен расчетный модуль, тем лучше, и можно быть более уверенным, что количество ошибок в нем сведено к минимуму.

1. Метод расчета задач со свободной поверхностью

Будем рассматривать несжимаемые течения, состоящие в общем случае 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, которые имеют вид [4, 5]:

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

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 со-

хранения импульса. Наиболее распространенными являются методы типа SIMPLE, основанные на процедуре коррекции давления или принципе расщепления неизвестных [6, 7].

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:

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

где n – временной слой, τ – временной шаг, S_f – площадь грани f , разделяющей контрольные объемы расчетной сетки (рисунок 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), см. рис. 1.

Наиболее удобно использовать совмещенный алгоритм [8] решения системы (2), для реализации которого систему (2) перепишем в виде:

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

Здесь «верхняя черта» означает, что величина на грани получена интерполяцией из соседних контрольных объемов. В уравнение неразрывности в системе (3) была использована поправка Рхи-Чоу [9], 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:

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

При записи данных коэффициентов использовался алгоритм неортогональной коррекции [10] 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 [6]:

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

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:

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

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

$$a_N^{up} = (1 - \lambda_f) S_f^x, \quad a_N^{vp} = (1 - \lambda_f) S_f^y, \quad a_N^{wp} = (1 - \lambda_f) S_f^z, \quad (9)$$

$$a_P^{up} = \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^x, \quad a_P^{vp} = \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^y, \quad a_P^{wp} = \sum_{f=nb(P)} \lambda_f S_f^z.$$

Как и для коэффициентов (5) для записи использовался алгоритм неортогональной коррекции.

Второе слагаемое выражений (7) – конвективная составляющая, которая аппроксимируется с помощью любой известной дифференциальной схемы, применимой на произвольных неструктурированных сетках [6, 11, 12]. Во втором выражении уравнений (10) используется противопотоковая схема (Upwind Differences, UD). Также используются: противопоточная схема с линейной интерполяцией (Linear Upwind Differences, LUD), схема QUICK, центрально-разностная схема (Central Differences, CD), схемы семейства NVD (Normalized Variable Diagram), гибридные схемы – все перечисленные схемы, смешанные с противопоточной схемой для увеличения монотонности.

Дискретизация нестационарного слагаемого может быть осуществлена по одной из известных неявных схем [13] – схема Эйлера, схема 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 [3], 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:

$$a_N^{(k)} = \min(0, u_f^{(n-1)} S_f), \quad a_P^{(k)} = - \sum_{N=NB(P)} a_N^{(k)} + \frac{V}{\tau}, \quad (14)$$

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

где $\alpha_{MC}^{(k)}$, $\alpha_{UD}^{(k)}$ – значение объемной доли на грани найденной по схеме M-CICSAM и по противоточной схеме соответственно, $\alpha_P^{(k),n-1}$ – значение объемной доли на прошлый шаг по времени. Представленные слагаемые получены с помощью дискретизации методом отложенной коррекции [10].

Для численного решения итоговая система уравнений должна быть дополнена начальными и граничными условиями. На твердых стенках градиент давления и объемных долей равен нулю: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0$, значение скорости равно нулю: $u = 0$, $v = 0$, $w = 0$. На входе задано фиксированное значение скорости и объемных долей, градиент давления равен

нулю: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. На выходе фиксируется статическое давление, градиенты скорости и объем-

ных долей равны нулю $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial w}{\partial n} = 0$, $\frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0$.

Представленный неявный алгоритм расчета многофазных течений со свободной поверхностью решается с использованием многосеточного метода, позволяющего существенно ускорить вычислительную процедуру [7, 14]. Современный обзор методов ускорения гидродинамических расчетов представлен в [14]. Модель реализована в пакете программ ЛОГОС – российском программном продукте инженерного анализа, предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [1, 7, 8, 14].

2. Базис задач валидации для течений со свободной поверхностью

Практические все течения со свободной поверхностью нестационарные, поэтому основная цель валидации сводится к необходимости сравнения с экспериментальными данными физических характеристик на определенный момент времени или оценке временного периода их колебаний. Для оценки физических характеристик на определенный момент времени и временного периода их колебаний предлагается использовать следующие задачи валидации, которые мы и назовем «минимальным» базисом.

Таблица 1

Минимальный базис задач валидации

№	Название задачи	Оцениваемые параметры	Доступные данные
1	Обрушение столба жидкости	- Высота столба жидкости по левой стенке резервуара; - положение передней кромки жидкости вдоль дна резервуара	- Экспериментальные результаты [20]; - результаты численного моделирования [15]
2	Колебания воды под действием силы тяжести	Уровень жидкости на левой стенке резервуара	- аналитическое решение [15]; - результаты численного моделирования [15]
3	Обрушение столба жидкости на дно резервуара с препятствием	Форма свободной поверхности	- Экспериментальные результаты [20]; - результаты численного моделирования [15]
4	Гидравлический удар	Высота отраженной волны	Результаты численного моделирования [15, 21]
5	Течение через шлюзовые ворота	Форма свободной поверхности	Результаты численного моделирования [15]
6	Падение шара в жидкость	Вертикальная координата центра масс шара	- Экспериментальные результаты [17]; - аналитическое решение [17]
7	Падение параллелепипеда в жидкость	Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне	Экспериментальные результаты [17]
8	Падение капли в жидкость	Форма свободной поверхности	- Экспериментальные результаты [19]; - результаты численного моделирования [18]

3. Описание базиса задач валидации

В данном разделе приводится описание базиса задач валидации, представленных в разделе 2 (табл. 1). Также здесь приводятся результаты валидации, представленной модели, реализованной в пакете программ ЛОГОС.

В расчетах использовалась схема второго порядка точности по времени Адамса-Бэшфорта. Для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении сохранения импульса использовалась противоточная схема, а для конвективных слагаемых в уравнении переноса объемных долей – схема M-CICSAM.

Обрушение столба жидкости

В эксперименте, столб жидкости под действием силы тяжести (воды) падает на дно резервуара [20]. Параметры экспериментальной установки и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент времени приведены на рис. 1.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для проведения численного моделирования была построена структурированная сеточная модель, состоящая из 8400 ячеек. На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания, на переднюю и заднюю стенку – скольжение, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 2, *а* приведены результаты численного моделирования. Сплошной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, черными штрихами показаны вектора скорости. Результаты построены для различных моментов времени: 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 с. На рис. 2, *б* показаны результаты численного моделирования, полученные в работе [15]. На рис. 2, *в* приведены фотографии [15].

В момент времени $t = 0,2$ с передняя кромка водяного столба встречается с препятствием, формируя мощный всплеск вверх перед препятствием. Высота всплеска, форма образованной каверны хорошо согласуются, как между расчетами, так и экспериментом [15]. Затем образованная всплеском волна достигает правой границы модельной (экспериментальной) области, гидравлический удар об эту стену порождает волну. На момент времени $t = 0,6$ с приходится самая активная стадия обрушения, образованной волны. При этом расчетные результаты показывают образование воздушного кармана около правой границы области, по форме примерно совпадающего для обоих расчетных случаев. Фотография эксперимента позволяет его идентифицировать. В момент 1,0 с жидкость встречается с левой стенкой.

Из представленных результатов видно, что численные результаты, как по нестационарным характеристикам (время образования и обрушения волны), так и по форме свободной поверхности дают хорошее качественное согласование с экспериментом.

На рис. 3, *а* представлено изменение высоты столба жидкости вдоль левой стенки резервуара с течением времени, на рис. 3, *б* – изменение положения передней кромки жидкости

вдоль дна резервуара с течением времени. Высота столба жидкости по левой стенке резервуара, положение передней кромки жидкости вдоль дна резервуара (отсчитываются от левого нижнего угла) и время – величины безразмерные.

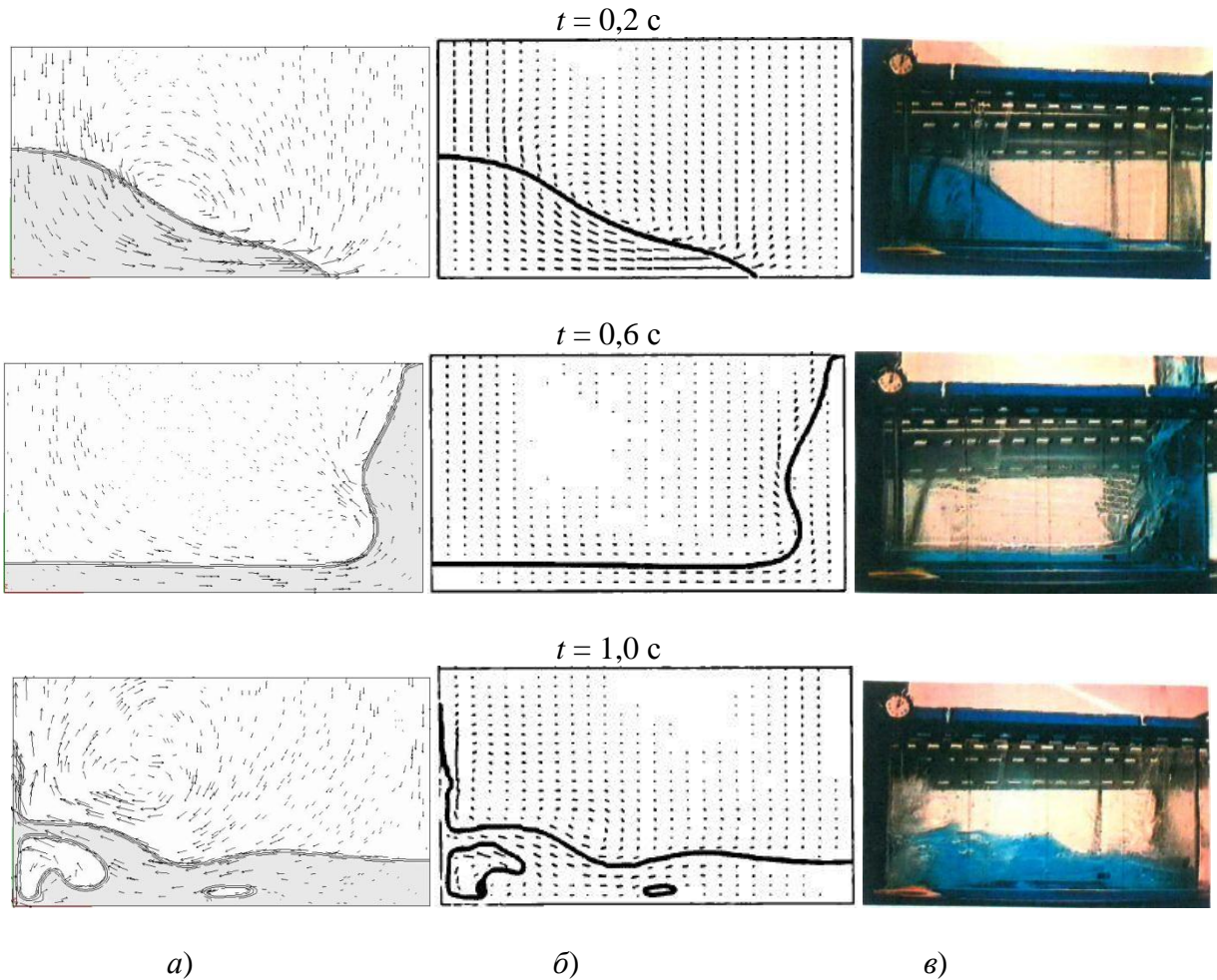


Рис. 2. Обрушение столба жидкости:
 а – результаты численного моделирования; б – результаты численного моделирования, полученные в работе [15]; в – экспериментальные данные [20]

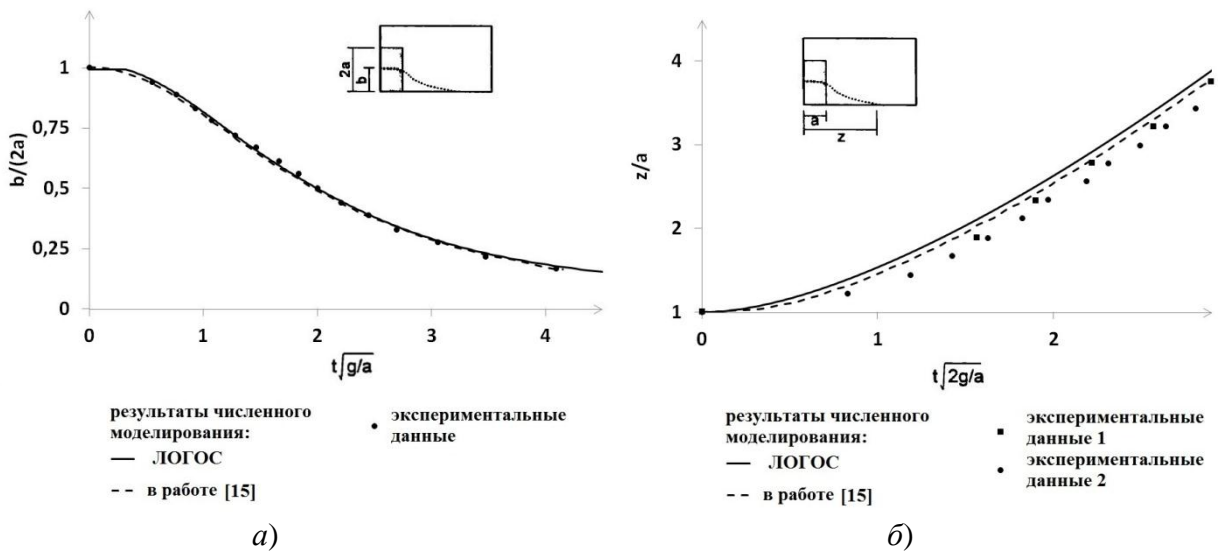


Рис. 3. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований:
 а – зависимость высоты столба жидкости на левой стенке резервуара от времени;
 б – зависимость положения передней кромки жидкости от времени

Сплошной черной линией показаны кривые, полученные в результате численного моделирования, штриховой линией – результаты численного моделирования, полученные в [15], маркерами отмечены экспериментальные данные [15].

При вычислении высоты столба жидкости погрешность результатов численного моделирования относительно экспериментальных данных не превышает 1%. При определении положения передней кромки жидкости погрешность результатов численного моделирования относительно экспериментальных данных колеблется от 3,4 до 9,6 %. Видно, что численные результаты дают хорошее качественное и количественное согласование с экспериментом [20] и численным решением, приведенными в работе [15].

Колебания воды под действием силы тяжести

В эксперименте исследуются колебания жидкости, налитой в резервуар, под действием силы тяжести. Параметры численной схемы и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент приведены на рис. 4. В начальный момент времени форма свободной поверхности имеет форму половины периода косинуса. Под действием силы тяжести она начинает колебаться. Теоретический период колебаний T составляет 0,3739 с [15].

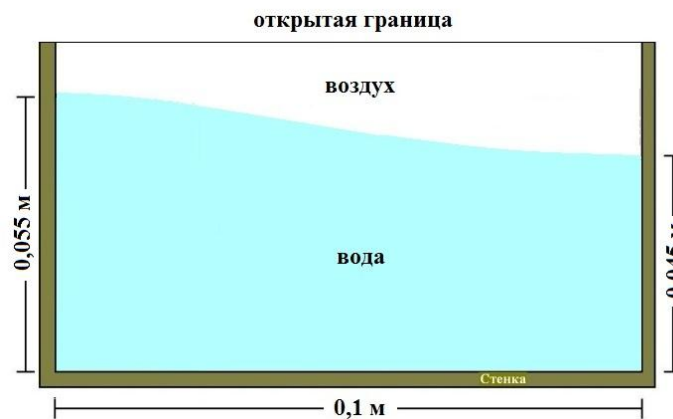


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Для проведения численного моделирования была построена структурированная сеточная модель размером 0,1x0,065x0,01 м, состоящая из 33600 ячеек. На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания, на переднюю и заднюю стенку – скольжение, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования колебания поверхности жидкости под действием силы тяжести. Сплошной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, серым цветом выделена жидкая фаза, черными штрихами показаны вектора скорости. Результаты построены для различных моментов времени, T – теоретический период колебаний. Под буквой «а» показаны результаты использования метода, описанного в п. 1, под буквой «б» – полученные в работе [15]. В момент времени $t = T/4$ граница раздела фаз принимает вид горизонтальной линии, а затем в $t = T/2$ – снова имеет форму полупериода косинусоиды, колеблющейся в противофазе. Процесс повторяется во времени.

На рис. 6 показано колебание уровня жидкости вдоль левой стенки резервуара с течением времени. В табл. 2 приведены погрешности численных результатов по времени относительно теоретических колебаний по закону косинуса. Погрешность по времени вычисляется следующим образом:

$$\frac{t_s - t_t}{t_t} \cdot 100\% ,$$

где t_s – период колебаний, полученный по результатам численного моделирования, t_t – теоретический период T [15].

Видно, что численные результаты дают хорошее качественное и количественное согласие с теорией и численным решением, приведенным в работе [15].

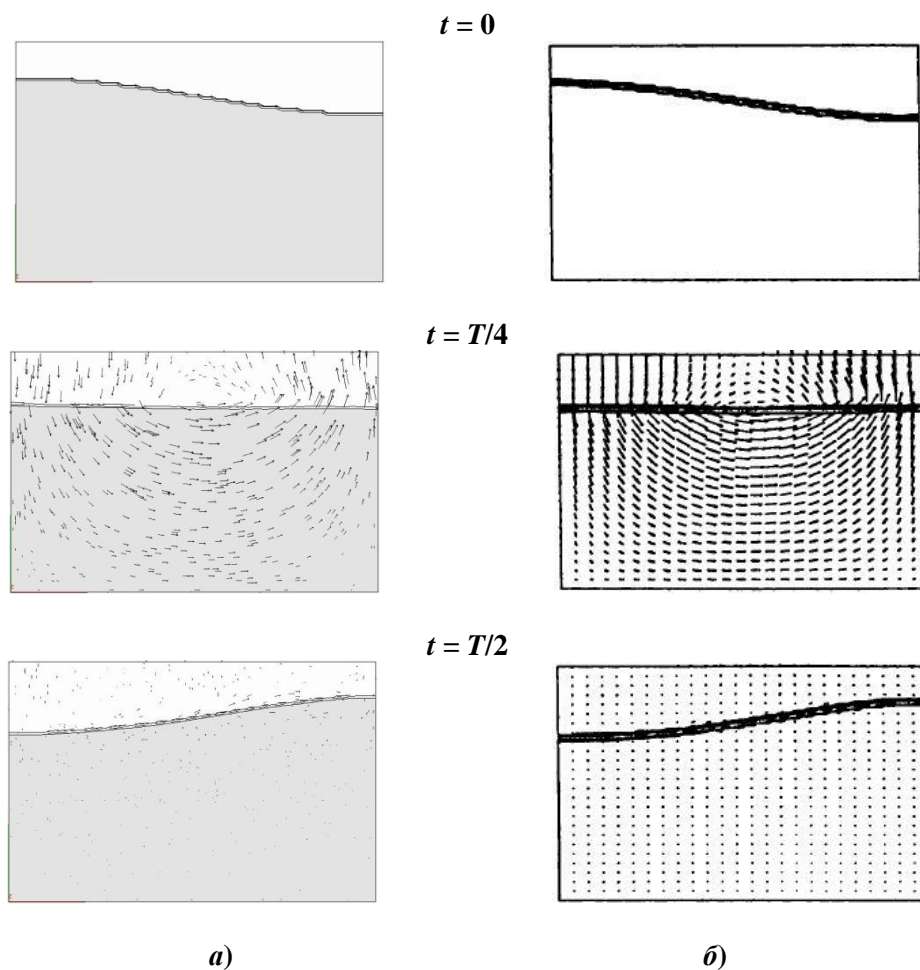


Рис. 5. Колебания жидкости под действием силы тяжести:
a – результаты численного моделирования по методу в п. 1;
б – результаты численного моделирования, полученные в работе [15]

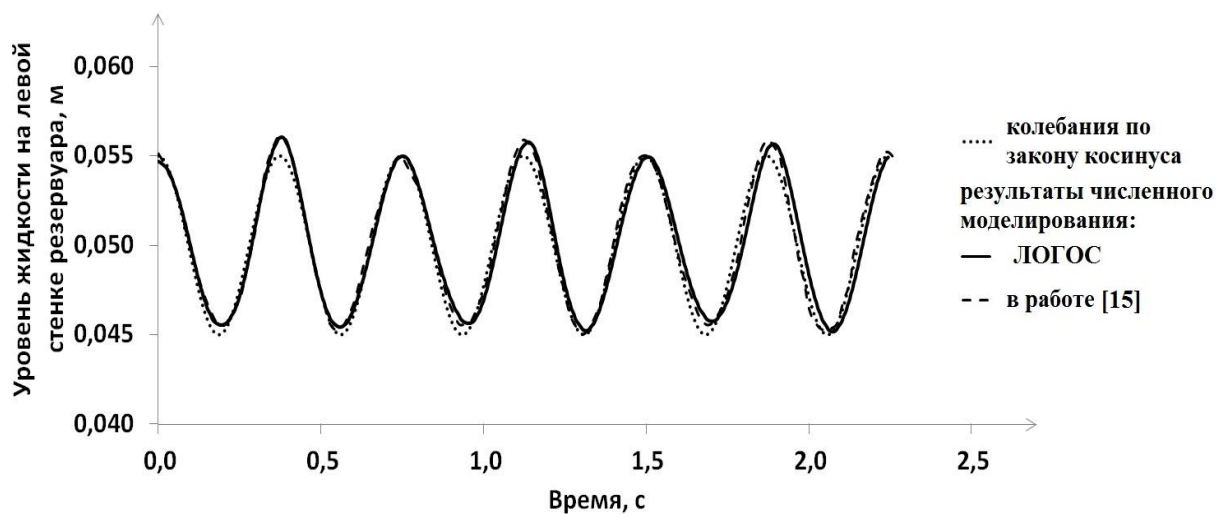


Рис. 6. Колебания уровня жидкости вдоль левой стенки резервуара под действием силы тяжести

Таблица 2

Погрешность полученных результатов численного моделирования

Время	Относительная погрешность по времени, %	
	Результаты численного моделирования [15]	Результаты численного моделирования по методу в п. 1
$2 \cdot T$	0,00	0,70
$4 \cdot T$	-0,75	0,76
$6 \cdot T$	0,04	0,03

Обрушение столба жидкости на дно резервуара с препятствием

В эксперименте исследуется обрушение столба жидкости (воды) на дно резервуара, где располагается препятствие прямоугольного сечения [20]. Параметры экспериментальной установки и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент времени приведены на рис. 7.



Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Для проведения численного моделирования была построена структурированная сеточная модель, состоящая из 92000 ячеек. На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания, на переднюю и заднюю стенку – скольжение, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 8, а приведены результаты численного моделирования обрушения плотины. Сплошной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, черными штрихами показаны вектора скорости. Результаты построены для различных моментов времени: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 и 0,6 с. На рис. 8, б показаны результаты численного моделирования, приведенные в работе [15]. На рис. 8, в приведены фотографии, сделанные в ходе эксперимента [20].

В момент времени $t = 0,1$ с передняя кромка водяного столба, построенная по результатам численного моделирования, еще не встретилась с препятствием, однако на экспериментальной фотографии виден тонкий слой жидкости, который уже достиг нижней части препятствия. В момент времени $t = 0,2$ с гидравлический удар о препятствие порождает волну. На момент времени $t = 0,5$ с приходится самая активная стадия обрушения образованной волны. При этом расчетные результаты показывают образование воздушного кармана около правой границы области по форме примерно совпадающего для обоих расчетных случаев. Фотография эксперимента позволяет его идентифицировать. Видно, что численные результаты дают хорошее качественное согласование с экспериментом.

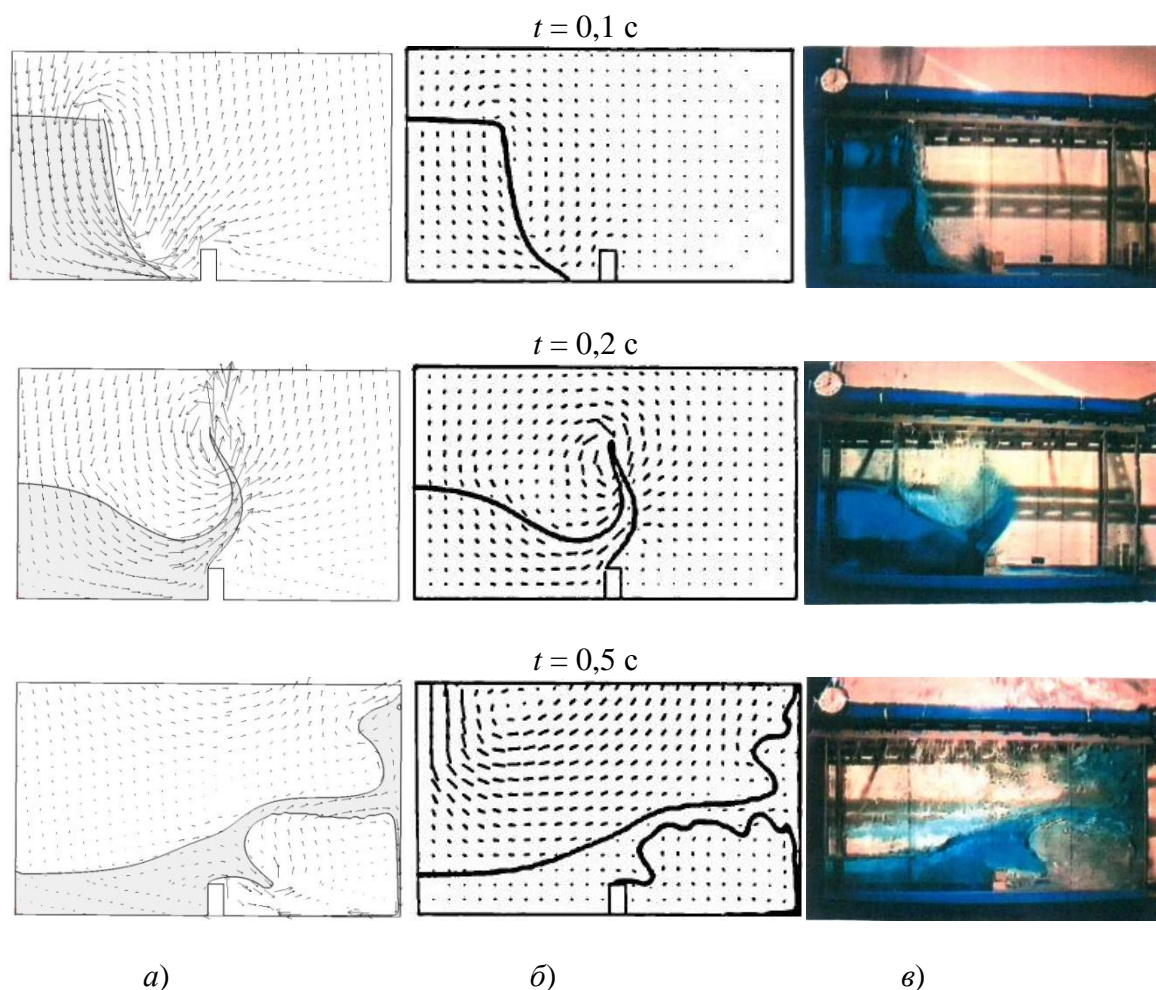


Рис. 8. Обрушение столба жидкости на дно резервуара с препятствием:

a – результаты численного моделирования; *б* – результаты численного моделирования, полученные в работе [15]; *в* – экспериментальные данные [20]

Гидравлический удар

Численно исследуется гидравлический удар, который возникает в процессе движения горизонтального слоя жидкости в ограниченной стенками области. Жидкость, двигаясь с начальной скоростью 1 м/с, ударяется о противоположную стенку, происходит ее обрушение и возникновение обратной волны. Параметры численной схемы приведены на рис. 9 [15]. Длина и высота емкости составляют 12.5 и 4.0 м. соответственно.



Рис. 9. Параметры численной схемы

Для моделирования этой задачи была построена структурированная сеточная модель,

состоящая из 6000 ячеек. На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

В табл. 3 приведены значения высоты h_0 (рис. 9), которую достигает вода в результате обрушения с учетом $g = 1 \text{ м/с}^2$ и $g = 0,4548 \text{ м/с}^2$. Высота h_0 измерялась вдоль правой стенки в тот момент времени, когда волна, отразившись от правой границы расчетной области, достигала левой, и поверхность жидкости за фронтом волны была примерно параллельна дну емкости. Была рассчитана относительная погрешность численных результатов относительно аналитического значения. Видно хорошее количественное согласование численных и аналитических результатов.

Таблица 3

Сравнение численных результатов

Расчетный случай	$g, \text{ м/с}^2$	$h_0, \text{ м}$		Относительная погрешность, %
		Результаты численного моделирования [21]	Результаты численного моделирования по методу в п. 1	
1	1,0	2,19	2,20	0,46
2	0,4548	2,90	2,93	1,03

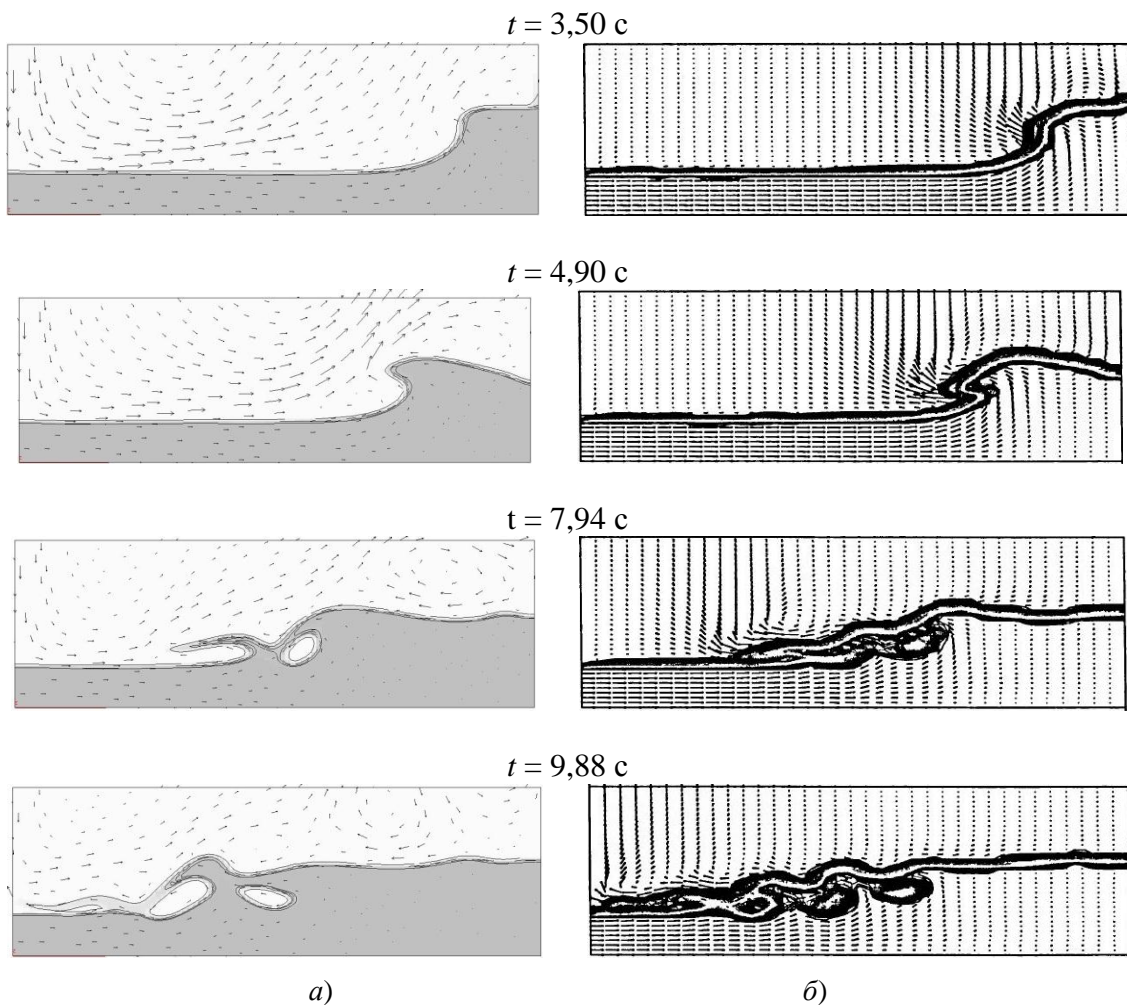


Рис. 10. Гидравлический удар во втором расчетном случае для моментов времени 3,50; 4,90; 7,94 и 9,88 с:

a – результаты численного моделирования; *б* – опубликованные в работе [15]

На рис. 10 приведены результаты численного моделирования обрушения жидкости с помощью: а) представленной в настоящей работе модели; б) опубликованные в [15]. Сплош-

ной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, серым цветом выделена жидкая фаза, черными штрихами показаны вектора скорости. В момент $t = 3,50$ с отраженная от правой стенки ударная волна начинает двигаться в обратном направлении. В момент $t = 4,90$ с фронт волны изгибается и начинает формироваться каверна. Затем в моменты времени $t = 7,94$ с и $t = 9,88$ с отраженная волна, сформировав несколько каверн, достигает левой стенки.

Течение через шлюзовые ворота

Численно исследуется задача о течении под тонкой перегородкой, разделяющей бассейны с разными уровнями воды. Параметры численной схемы приведены на рис. 11 [15]. В начальный момент времени вода, заполняющая левый бассейн, под действием силы тяжести начинает перетекать в правый бассейн под тонкой перегородкой, имитирующей шлюзовые ворота.

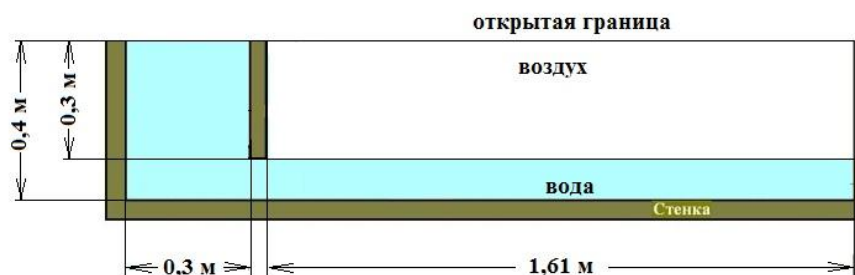


Рис. 11. Параметры численной схемы

Для моделирования этой задачи была построена структурированная сеточная модель, состоящая из 6000 ячеек. На левую, нижнюю и нижнюю часть правой стенки накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху и на верхней части правой стенки фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 12 приведены результаты моделирования течения: а) результаты численного моделирования; б) результаты, опубликованные в работе [15]. Сплошной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, черными штрихами показаны вектора скорости.

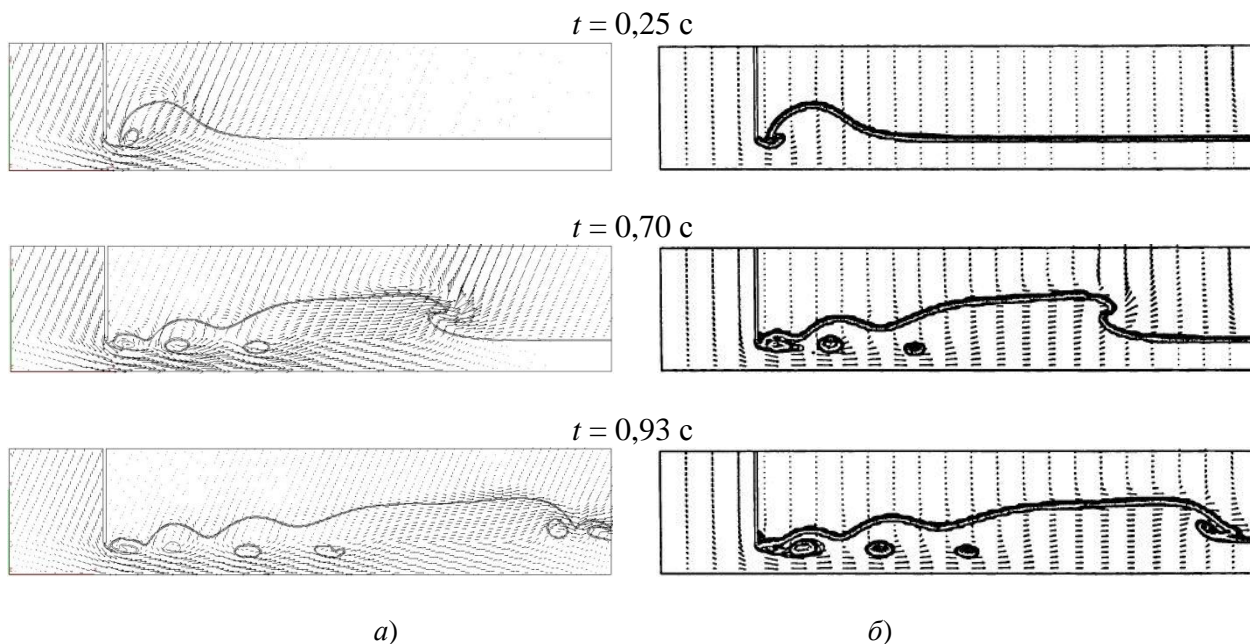


Рис. 12. Течения через шлюзовые ворота:

а – результаты численного моделирования; б – опубликованные в работе [15]

В момент времени $t = 0,25$ с наблюдается формирование первой каверны сразу за тонкой стенкой. В момент времени $t = 0,70$ с формируется третья каверна, в $t = 0,93$ с фронт волны достигает правой стенки.

Следует отметить, что в работе [15] не указано, в какие моменты времени были сделаны фотографии. Авторами этой статьи были самостоятельно выбраны моменты времени для построения результатов численного моделирования. Видно хорошее качественное согласование численных и аналитических результатов.

Падение шара в жидкость

В задаче моделируется падение твердого шара в воду с небольшой начальной скоростью. Подобный эксперимент проводился для шаров из разных материалов и изложен в работе [17].

Параметры численной схемы приведены на рис. 13. Шар радиусом $r = 1,27$ см непосредственно перед столкновением с водной поверхностью имеет скорость $V = 2,17$ м/с. Уровень воды h в начальный момент времени составляет $0,2$ м. Расчетная область представляет собой цилиндр радиусом $R = 0,25$ м и высотой $H = 0,2254$ м.

Рассматривалось два расчетных случая: в первом случае шар был сделан из полипропилена и плотность его составляла $0,86$ от плотности воды, во втором – из стали с плотностью $7,86$ от плотности воды.

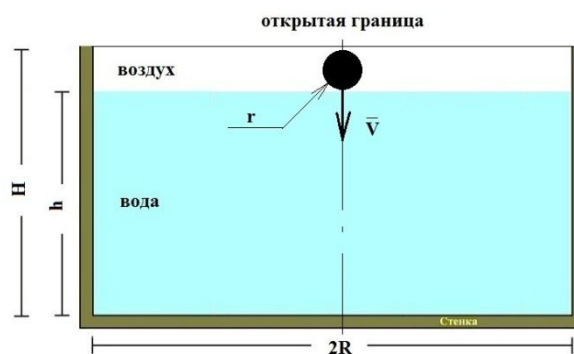


Рис. 13. Параметры численной схемы

Для моделирования этой задачи была построена структурированная сеточная модель, измельченная в области движения твердого тела и состоящая из 800000 ячеек (см. рис. 14). На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

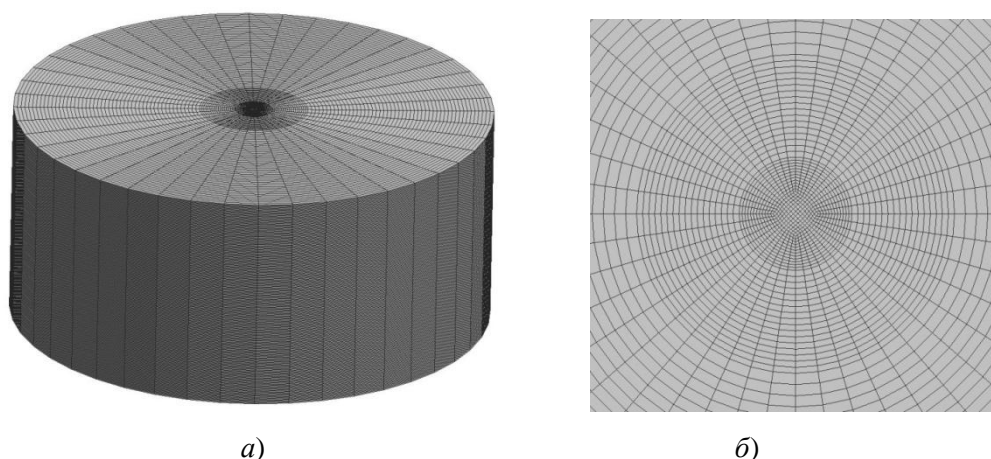


Рис. 14. Дискретная модель:

a – общий вид; b – измельчение сетки в области движения твердого тела

На рис. 15 показана динамика погружения стального шара в воду: а) экспериментальные фотографии [17]; б) результаты численного моделирования, построенные для соответствующих моментов времени. Серым цветом выделена жидкая фаза, сплошной черной линией отмечена граница раздела фаз, шар выделен черным цветом. В момент $t = 5,9$ мс шарик полностью погружается под воду. В момент $t = 54,9$ мс около над поверхностью шара начинает формироваться каверна, формирование которой к моменту времени $t = 68,9$ мс заканчивается по результатам численного моделирования и полностью завершается в эксперименте.

Видно хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

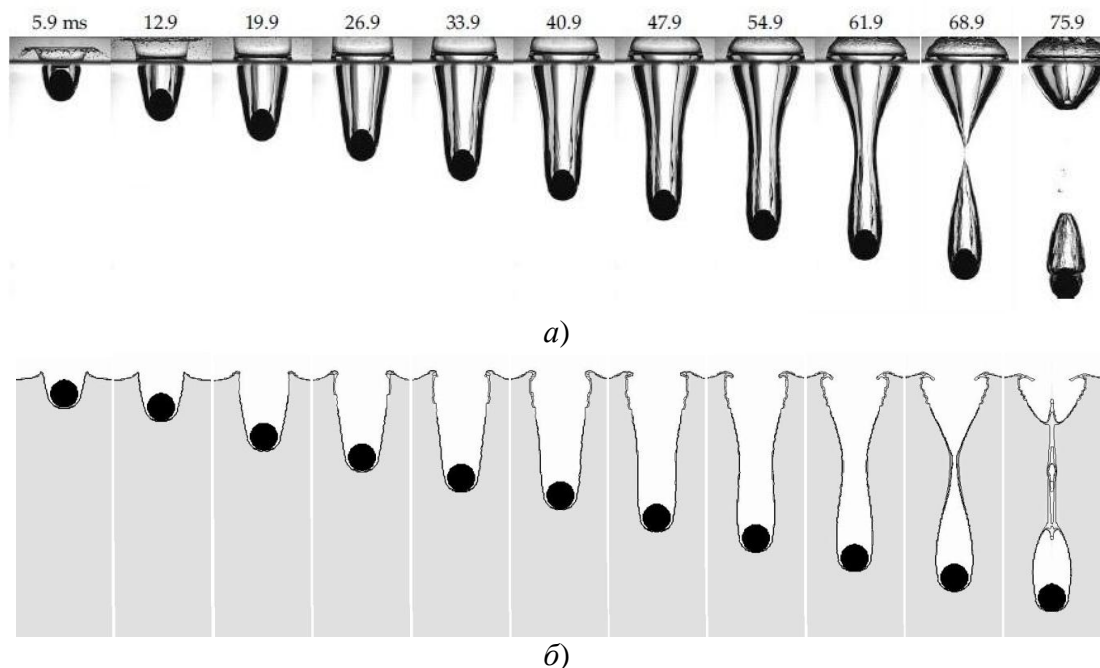


Рис. 15. Погружение стального шара в воду:

а – экспериментальные фотографии [17];

б – результаты численного моделирования

На рис. 16 показано изменение глубины погружения шара в воду с течением времени. Приведены результаты для двух расчетных случаев. Теоретические результаты приведены в работе [17].

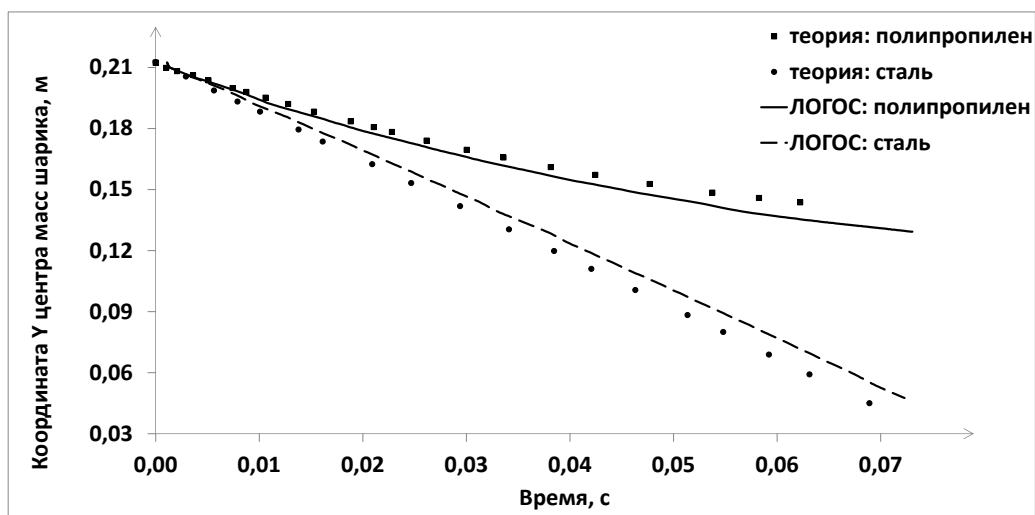


Рис. 16. Изменение вертикальной координаты центра масс шарика от времени

Погрешность результатов моделирования относительно теоретических результатов составляет:

- для полипропиленового шара – 5,8%;
- для стального шара – 6,2%.

Падение параллелепипеда в жидкость

Верификацию представленного алгоритма на правильное описание распространения волн на свободной поверхности можно осуществить с помощью численного моделирования эксперимента, описанного в [16]. 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. 17.

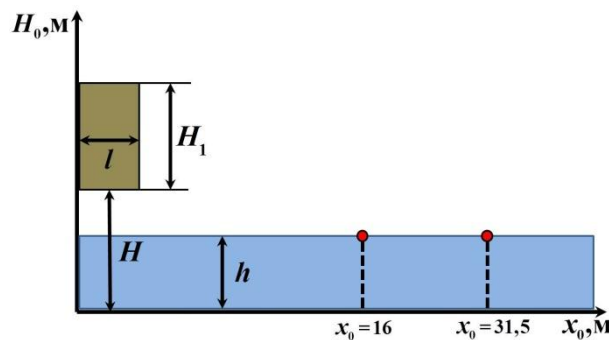


Рис. 17. Параметры численной схемы

Рассматривалось несколько вариантов постановок задачи, отличающихся друг от друга размерами тела, высотой, с которой оно падает и глубиной заполнения бассейна. В безразмерной форме эти параметры выглядят следующим образом [16]:

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

где ρ_l, ρ – плотность твердого 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, $H^0 = 3,75$, $H_1^0 = 2,26$, $l^0 = 1,15$, $\rho^0 = 0,215$.

Для второго расчетного случая $h = 8$ см, $H^0 = 2,90$, $H_1^0 = 2,26$, $l^0 = 0,575$, $\rho^0 = 0,215$. На расстоянии $x^0 = 16$ установлен мареограф – датчик, фиксирующий колебания водной поверхности.

Для третьего расчетного случая $h = 4$ см, $H^0 = 4,75$, $H_1^0 = 4,5$, $l^0 = 1,15$, $\rho^0 = 0,215$, мареограф был установлен на расстоянии $x^0 = 31,5$.

Для моделирования падения параллелепипеда в воду была построена 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 мареографа сетка более мелкая. На левую, правую и нижнюю стенки дискретной модели накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 18 показано образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи. Черной линией обозначен контур параллелепипеда. Серым цветом выделена жидкая фаза. В момент времени $t = 0,25$ с наблюдается ранняя стадия развития каверны и брызговой струи. В момент времени $t = 0,3$ 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 [16] не указано, в какие моменты времени были сделаны фотографии. Авторами этой статьи были самостоятельно выбраны моменты времени для построения результатов численного моделирования.

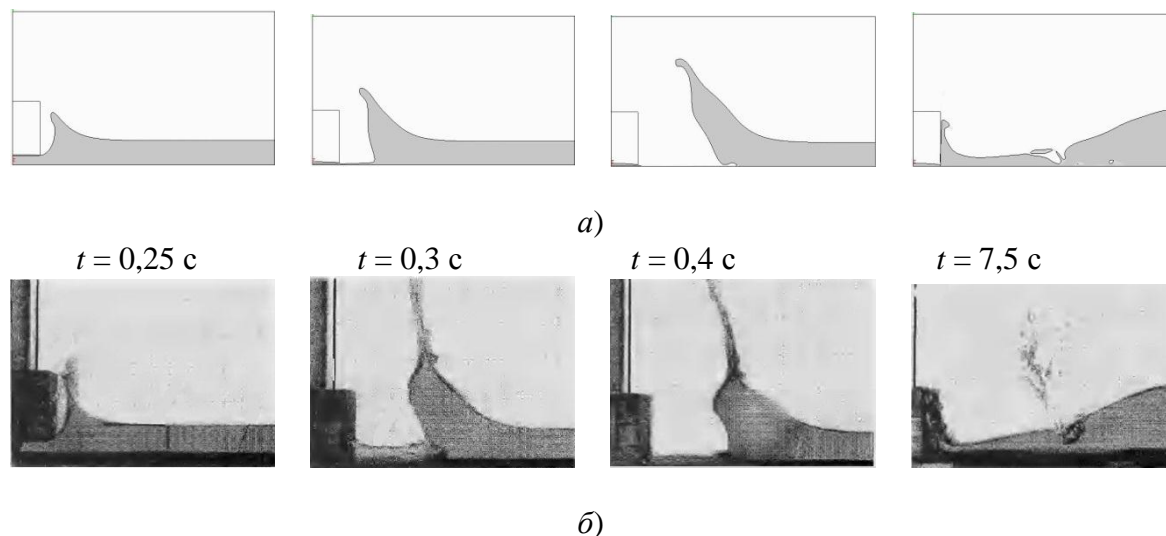


Рис. 18. Образование волн от падения параллелепипеда для первой постановки задачи:
 а – результаты численного моделирования, построенные в моменты времени 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 с;
 б – экспериментальные данные [16]

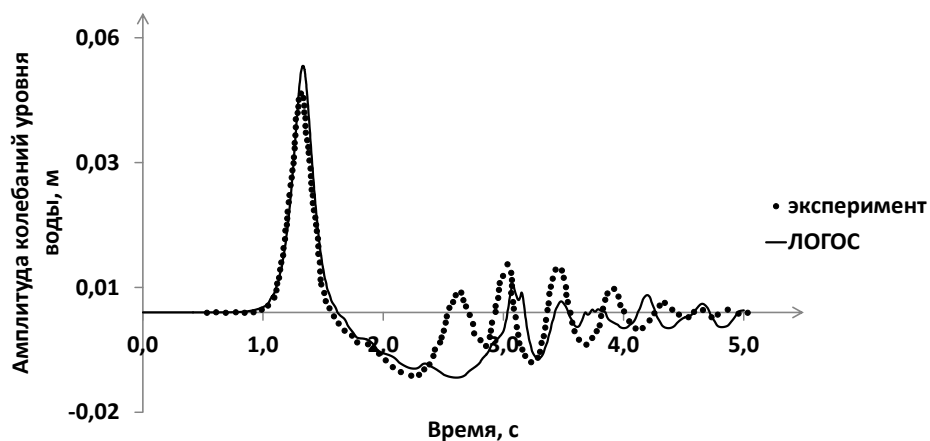


Рис. 19. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне для второй постановки задачи

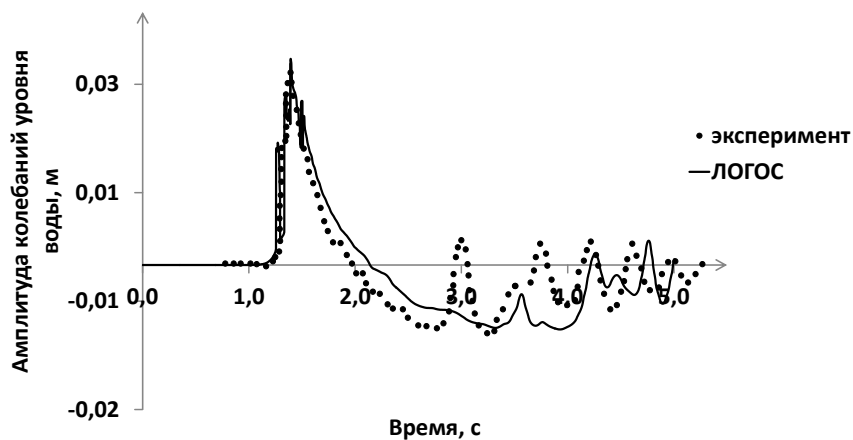


Рис. 20. Амплитуда колебаний уровня воды в бассейне для третьей постановки задачи

На рис. 19 и рис. 20 приведены зависимости амплитуды колебаний уровня воды в бассейне от времени для второй и третьей постановки задачи соответственно. Точками на гра-

фик нанесены экспериментальные данные, записанных неподвижным волномером [16]. Сплошной черной линией показана амплитуда колебаний уровня воды, налитой в бассейн, полученных по результатам численного моделирования.

Сравнение мареографных записей показывает хорошее совпадение для первой приходящей волны. Вычисленная амплитуда вторая волны («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.

Падение капли в жидкость

Рассматривается задача об ударе капли о поверхность жидкости с образованием короны. Капля имеет те же параметры, что и жидкость: плотность 1200 кг/м^3 , вязкость $0,022 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$, коэффициент поверхностного натяжения $0,0652 \text{ Н/м}$, числа Вебера и Рейнольдса в момент столкновения капли с поверхностью воды равны 2010 и 1168 соответственно. Радиус капли составляет $0,0021 \text{ м}$. Результаты экспериментальных и численных исследований приведены в работах [18] и [19] соответственно. Расчетная область представляет собой цилиндр с высотой H $0,15 \text{ м}$ и радиусом R $0,03 \text{ м}$ (см. рис. 21).

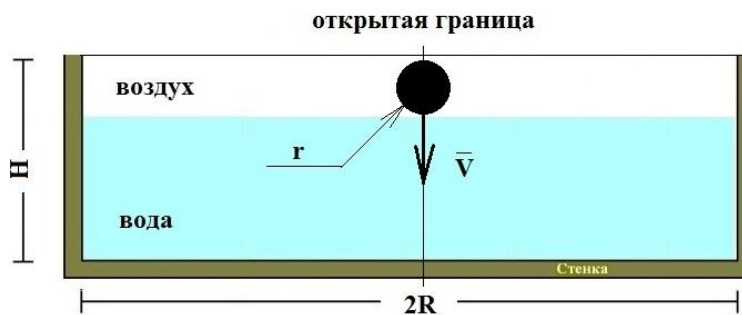


Рис. 21. Численная схема

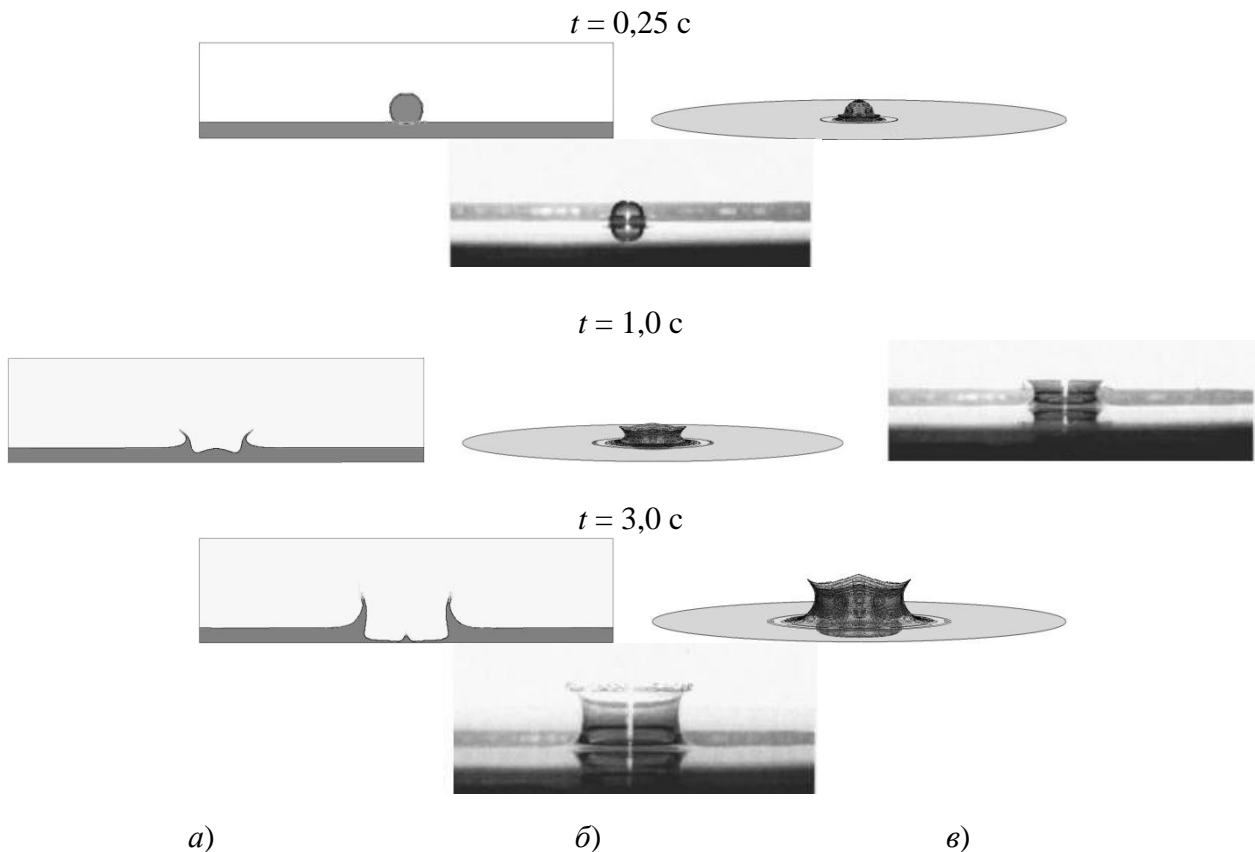


Рис. 22. Динамика удара капли о поверхность жидкости

Для моделирования этой задачи была построена структурированная сеточная модель с измельчением в области падения капли и образования короны, состоящая из 2,8 млн ячеек. Сверху фиксировалось статическое давление 0 Па.

На рис. 22 приведена динамика удара капли о поверхность жидкости: а) и б) результаты численного моделирования падения капли; в) экспериментальные фотографии [19]. Сплошной черной линией изображена граница раздела фаз – вода и воздух, серым цветом выделена жидкая фаза. В момент $t = 0,25$ с капля начинает погружаться в воду. В момент $t = 1,0$ с видна корона брызг, сформировавшаяся в результате падения капли. В момент времени $t = 3,0$ с корона продолжает увеличиваться.

Видно хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

Заключение

Представлено описание минимального базиса задач валидации для тестирования разрабатываемых программных комплексов, предназначенных для моделирования динамики несжимаемых вязких жидкостей. Для каждого расчетного случая приведены экспериментальные и/или численные данные моделирования. Однако следует еще раз напомнить, что даже самый полный базис задач валидации не претендует на окончательный, и, на чем большем количестве задач будет проверен расчетный модуль, тем лучше и можно быть больше уверенным, что количество ошибок в нем сведено к минимуму.

С использованием сформированного базиса задач была проведена валидация пакета программ ЛОГОС для данного класса задач. Относительная погрешность результатов не превышает 10%. Видно хорошее качественное и количественное согласование численных и экспериментальных результатов. По результатам исследований можно сделать вывод, что ЛОГОС позволяет с достаточной точностью моделировать течения со свободной поверхностью.

Библиографический список

1. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2014. № 4(104). С. 21–69.
2. AIAA, «Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations», AIAA G-077-1998.
3. **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.
4. **Волков, К.Н.** Течения газа с частицами / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 600 с.
5. **Kolev, N.I.** Multiphase Flow Dynamics / N.I. Kolev. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
6. **Ferziger, J.H.** Computational methods fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
7. **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.] // ВАИТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 4.
8. **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.
9. **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.

10. **Jasak, H.** Error Analysis and Estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Thesis submitted for the degree of doctor // Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1996.
11. Математические модели и алгоритмы для численного моделирования задач гидродинамики и аэродинамики: учеб. пособие / А.С. Козелков [и др.]. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 166 с.
12. **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.
13. **Роуч, П.** Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
14. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / А.С. Козелков [и др.]. – М.: Физматлит, 2013.
15. **Ubbink, O.** Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces. Thesis. Imperial College of Science, Technology & Medicine. London. 1997.
16. **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.
17. **Aristoff, J.M.** The water entry of decelerating spheres / J.M. Aristoff [et al.] // Phys. Fluids. Am. Inst. Phys. 2010. No. 22.
18. **Джанг, Т.** Численное исследование динамики удара капли о поверхность жидкости с образованием короны / Т. Джанг, Д. Оуянг, Х. Ли, Д. Рен, С. Ванг // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т.54. № 5. С. 38–47.
19. **Wang, A.B.** Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films / A.B. Wang, C.C. Chen // Physics of Fluids. 2000. V. 12. No. 9. P. 2155–2158.
20. **Koshizuka, S.** A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation / S. Koshizuka, H. Tomako, Y. Oka // Computational Fluid Dynamics Journal. 1995. V. 4(1). P. 29–46.
21. **Hirt, C.W.** Volume of Fluid Method (VOF) for the dynamics of free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // Journal of Computational Physics. 1981 V. 39. P. 201–225.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2015*

**A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin², I.L. Sharipova¹, V.V. Kurulin¹, E.N. Pelinovsky²,
E.S. Tyatyushkina¹, D.P. Meleshkina¹, S.V. Lashkin¹, N.V. Tarasova¹**

MINIMAL BASIS TASKS FOR VALIDATION OF METHODS OF CALCULATION OF FLOWS WITH FREE SURFACES

FSUE «RFNC – VNIIEF»¹,

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: In this paper the validation process, which is an important step towards the industrial application of engineering software packages is discussed.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models designed to simulate the flow of a viscous incompressible fluid with free surfaces.

Results: In order to improve and systematize the knowledge in this paper a basis of validation tasks required to assess the accuracy of the simulation software solutions designed for the simulation of flows of incompressible viscous fluid with free surfaces are developed. Held its systematization and generalization.

Application domain: Presented results allow the developer of engineering software packages focus on the computation of error modeling, rather than searching for reliable data.

Key words: validation, engineering software packages, flow, free surface, numerical simulation.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.72

Д.В. Поляков, А.И. Попов

ГЕНЕРАТОР МОНОТОННЫХ ХЕШ-ФУНКЦИЙ ДЛЯ АССОЦИАТИВНОГО МАССИВА

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Цель: Получение генератора хеш-функций с хорошими значениями асимптотических характеристик алгоритмов решения основных поисковых задач.

Подход: Методика исследований основана на теории множеств и теории информационного поиска.

Результаты: Представлен подход к генерации хеш-функций. Предложен метод получения хеш-функции на основе рассматриваемого генератора.

Ограничения исследований: Предложена и обоснована гипотеза о высоких характеристиках алгоритмов для решения основных поисковых задач при использовании хеш-функций, полученных с помощью предложенного метода. Ожидается, что дальнейшие исследования подтвердят гипотезу и позволят детально определить характеристики этих алгоритмов.

Оригинальность / значение: Предлагаемый генератор задаёт семейство хеш-функций для новых эффективных ассоциативных массивов, основанных на хеш-таблицах.

Ключевые слова: хеш-функция, хеш-таблица, ассоциативный массив, минимальная хеш-функция, монотонная хеш-функция, совершенная хеш-функция, генерация хеш-функций, поиск идентичного значения, задача о близости, интервальный поиск.

Введение

В наше время информационные технологии играют в обществе одну из ключевых ролей. И их непрерывное развитие сопровождается ростом количества данных, которые необходимо обрабатывать. К примеру, осуществление мониторинга в различных отраслях человеческой деятельности приводит к накоплению огромных объёмов данных, нуждающихся в статистической, а иногда и интеллектуальной обработке. Решение задач мониторинга, составление планов и расписаний, автоматизация производства и процесса оказания услуг – всё это и многое другое предполагают хранение и обработку большого количества данных. В итоге, практически каждая современная информационная система содержит в себе базу данных.

Для работы с данными, порядок расположения которых не важен, используются так называемые ассоциативные массивы – абстрактные типы данных для хранения коллекций элементов, поддерживающие, как минимум, три операции: поиск элемента, добавление элемента и удаление элемента [1].

Способы организации ассоциативного массива разделяются на две основные группы: хеш-таблицы и бинарные деревья [1-2]. Основные показатели эффективности конкретного способа организации ассоциативного массива – это время, затрачиваемое на операции поиска, добавления и удаления элемента, а также расход памяти [1, 3].

Данные показатели зачастую [1-3] оцениваются не в абсолютных величинах, а с помощью, так называемой *O*-нотации, то есть асимптотической сложности относительно числа хранимых элементов. Асимптотическая сложность представляет собой оценку роста времени работы алгоритма при росте объёма входных данных. Эта мера хорошо себя зарекомендовала и стала классической для оценки сложности алгоритмов [1].

Вместе с тем, если рассматриваемые показатели носят случайный характер, то их целесообразно задавать двумя численными характеристиками: средним значением и значением в худшем случае.

Современные реалии требуют оценивать сложность решения не одной, а, как минимум, трёх поисковых задач: поиск идентичных объектов, решение задачи о близости и интервальный поиск [3].

Поиск элемента – тривиальная и очевидная задача, состоящая в поиске в ассоциативном массиве объекта, идентичного объекту-запросу. Решение задачи о близости – поиск ближайшего элемента к объекту-запросу. Обычно задача о близости появляется в связи с тем, что заданный объект в массиве не найден и возникает необходимость найти ближайший к нему объект. Интервальный поиск – это поиск набора хранимых элементов в интервале, который собственно и задаётся поисковым запросом. Такая задача распространена в теории баз данных, статистике [4] и автоматизации проектирования [5].

Основные определения и обозначения

В данной работе исследуются способы организации ассоциативного массива на основе хеш-функций. Такие массивы называются хеш-таблицами [1-3].

Хеш-таблицы представляют собой в некотором роде обобщение индексных массивов с их прямой адресацией к элементам [1]. Обращение к i -му элементу индексного массива (a_i) происходит за константное время благодаря тому, что вычисляется адрес данного элемента по формуле

$$\&a_i = a + iw, \quad (1)$$

где a – адрес первого байта выделенной под массив области памяти, w – размер в байтах ячейки массива, а $\&a_i$ – адрес i -того элемента, то есть адрес a_i . Представленная формула становится очевидной, если вспомнить, что байт – минимальная адресуемая ячейка памяти, а все байты индексного массива по определению расположены по порядку. Таким образом, если элементы массива содержатся в *RAM* (памяти, позволяющей получить доступ к любой ячейке по её адресу, за одинаковое время), то вычисление адреса позволяет обратиться к соответствующему элементу за константное, то есть не зависящее от числа элементов в индексном массиве время. Такое время на языке O -нотации записывается как $O(1)$, что означает независимость времени обращения к элементу массива от его номера n .

Основная идея подхода к организации хеш-таблиц в том, чтобы выбрать некоторую функцию (хеш-функцию), которая будет вычислять адрес ячейки для хранения некоторого элемент x на основе самого x . Строго говоря, хеш-функция вычисляет не адрес элемента, а его индекс (i) в некотором индексном массиве, после чего адрес уже вычисляется по формуле (1).

Определим строго понятие хеш-функции для ассоциативного массива.

Пусть U – это множество элементов, для хранения которых предназначен ассоциативный массив. В самом общем случае U задаётся типом данных элементов, для хранения которых предназначена хеш-таблица. Вместе с тем, при решении конкретных задач U удобно ограничить. Например, для ассоциативного массива хранящего элементы четырёхбайтного целочисленного типа $U = \{u \in N, -2^{31} \leq u \leq 2^{31} - 1\}$, однако, если по условию поставленной задачи данный массив используется для хранения возраста людей, целесообразно ограничить U , задав его следующим образом: $U = \{u \in N, 0 \leq u \leq 150\}$.

Определим хеш-функцию как отображение $h_m: U \rightarrow \{i \in N, i = \overline{0, m-1}, m \in N\}$. Создадим индексный массив из m элементов и обозначим его A_m . Будем считать, что индексы элементов данного массива – целые числа от 0 до $m-1$. Элемент массива A_m с индексом $i = \overline{0, m-1}$ будем обозначать $A_m[i]$. Вычисление адреса $A_m[i]$ будем осуществлять по формуле (1). Тогда хеш-таблицу для хранения элементов множества U зададим как $\langle h_m, A_m \rangle$.

Очевидно, что добавление произвольного элемента $u \in U$ в хеш-таблицу на практике

реализуется присваиванием значения u элементу массива $A_m[h_m(u)]$, а поиск элемента $u \in U$ в хеш-таблице путём его сравнения с элементом, хранящимся в $A_m[h_m(u)]$. Так как если элемент $u \in U$ содержится в хеш-таблице, то он содержится в ячейке $A_m[h_m(u)]$, операция его удаления очевидно. Сложность таких операций определяется сложностью вычисления хеш-функции, а она асимптотически оценивается как $O(1)$, так как вычисление хеш-функции не зависит от числа элементов в массиве.

Таким образом, операции поиска, добавления и удаления элементов из хеш-таблицы оказываются гораздо быстрее, чем аналогичные в ассоциативных массивах, реализованных на основе бинарных деревьев и имеющих зачастую логарифмическую сложность. Вместе с тем, на практике при работе с заранее неизвестным набором объектов невозможно выбрать функцию h_m так, чтобы она не отображала никакие два элемента из U в один и тот же индекс. Такая ситуация называется коллизией. Существует множество методов разрешения коллизий, например, методы линейного зондирования, цепочек переполнения, универсальное хеширование и др. [1-2].

Другой неприятной ситуацией является, как правило, имеющаяся в A_m избыточная память. Впрочем, если таковая отсутствует, то любая операция вставки приведёт к коллизии.

Таким образом, избыточная память для хеш-таблицы является своеобразным краеугольным камнем. С одной стороны, если выделить много памяти, то это будет крайне расточительным, а с другой, если избыточной памяти мало, то число коллизий возрастёт, что пагубно скажется на скорости работы и в конечном итоге быстро приведёт к переполнению и как результату – рехешированию [1, 6] – процессу перераспределения памяти. Этот процесс обладает огромной трудоёмкостью по сравнению с алгоритмами поиска элементов, вставки, избегания коллизий. В контексте асимптотической сложности он оценивается как $O(n)$, где n – количество элементов в хеш-функции.

Вместе с тем константа при n крайне велика. То есть данный алгоритм при равных характеристиках вычислительных машин будет работать гораздо медленнее, чем многие другие с такой же асимптотической сложностью. Необходимость рехеширования возникает в рамках алгоритма добавления элемента и является вероятностным событием. Она неизбежно наступает для любых хеш-таблиц. Множество работ посвящено снижению этой вероятности [1-3, 6].

Для хеш-таблиц скорость поиска элемента при удачном выборе хеш-функции, равномерно рассеивающий поступающие объекты хранения, в среднем будет высока. Вместе с тем, большинство хеш-таблиц не способны эффективно решить задачи о близости и интервального поиска. Наконец, при хорошем математическом ожидании эффективности поиска худшие случаи поиска обладают сложностью выше сложности поиска полным перебором, так как приходится перебирать пустые ячейки [6]. Очевидно, что хеш-таблицы имеют огромный потенциал. И на сегодняшний день крайне важно развивать данное направление исследований. Необходимо ослаблять и устранять вышеозначенные недостатки, а также формировать общую теорию хеш-таблиц.

Рассмотрим некоторые понятия, связанные с хеш-функцией. Пусть X – множество элементов, хранимых в $\langle h_m, A_m \rangle$. Очевидно, что $X \subset U$.

Хеш-функция называется совершенной [7-8], если она инъективна [9] на X . То есть при хранении элементов X не возникло коллизий.

Хеш-функция называется минимальной [10-11], если она сюръективна [9] на X . То есть, нет элементов массива A_m , которые бы пустовали, а значит, нет и избыточной памяти.

Понятия совершенной и минимальной хеш-функций, а также алгоритмы их построения подробно обсуждаются во многих научных работах [7, 8, 10, 11] и учебной литературе [1-2].

Минимальная совершенная хеш-функция обладает свойствами инъективности и сюръективности, а значит [9] является биекцией X на $\overline{0, m-1}$. Такая функция позволяет осуществлять поиск и удаление за одну итерацию, а также не требует избыточной памяти, вместе с тем, операция добавления элементов будет всегда вызывать коллизию и некоторые ме-

ханизмы разрешения коллизий, например, линейное зондирование, будут неприменимы. Минимальные совершенные хеш-функции удобны, когда набор хранимых элементов известен заранее [11] и операций добавления и удаления не предусматривается.

Важным свойством некоторых хеш-функций является их монотонность [10-12]. Она позволяет относительно быстро решать задачу о близости и осуществлять интервальный поиск, что являлось крайне асимптотически сложной задачей для немонотонных хеш-функций. Действительно, если функция монотонна, то либо найденное, либо ближайшее ненулевое слева или справа в A_m значение являются решением задачи о близости. А проверка на близость трёх элементов производится за константное время. Таким образом, для монотонных хеш-функций сложность решения задачи о близости асимптотически совпадает с решением поисковой задачи и является $O(1)$.

Задача интервального поиска для монотонных хеш-функций решается нахождением двух ближайших значений к границам запроса-интервала и перечислением всех ненулевых значений A_m между ними. При использовании немонотонной хеш-функции такие задачи привели бы к обходу всего массива A_m , число элементов которого может быть существенно и даже асимптотически больше числа хранимых элементов.

Отметим также, что если монотонная хеш-функция является ещё и совершенной, то сложность интервального поиска равна его минимальной границе [3] – сложности перечисления всех найденных элементов.

Метод генерации монотонных хеш-функций

Далее, без ограничения общности, будем рассматривать U , как множество числовой природы. Более подробно данное допущение пояснено в литературе [1, 6]. Здесь же просто примем это как условие поставленной задачи хранения и поиска объектов.

Пусть $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, $X \subset [x_1, x_n] \subset U$, $x_1 < x_2, \dots < x_n$. Строгость неравенства объясняется тем, что хранение одинаковых элементов реализуется на основе хранения одного из них и учёта их количества. Построим совершенную монотонную хеш-функцию для множества X .

Рассмотрим множество $F = \{f \mid f \text{ – непрерывная, строго возрастающая биекция на } U \text{ и } f: [x_1, x_n] \rightarrow [0, 1]\}$. Назовём F образующим множеством. Выберем некоторую функцию $f \in F$, назовём её образующей и рассмотрим образы элементов X . Из биективности и возрастания f на U следует, что:

$$0 = f(x_1) < f(x_2) < \dots < f(x_n) = 1. \quad (2)$$

Введём в рассмотрение показатель δ_{\max} , вычисляемый по следующей формуле:

$$\delta_{\max} = \min_{i=2, n} (f(x_i) - f(x_{i-1})). \quad (3)$$

Для построения хеш-таблицы возьмём произвольное число $\delta \leq \delta_{\max}$ и вычислим m – размер индексного массива A_m хеш-таблицы:

$$m = \left\lfloor \frac{1}{\delta} \right\rfloor + 1, \quad (4)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – округление в меньшую сторону.

Рассмотрим множество полуинтервалов $y_i = [i \cdot \delta; (i+1) \cdot \delta)$, $i = \overline{0, m-1}$.

Заметим, что:

$$\bigcup_{i=0, m-1} y_i = [0; \delta \cdot m] \supset [0; 1] \quad (5)$$

Действительно, для $\forall i = \overline{0, m-2}$ правая выколотая граница полуинтервала y_i совпадает с левой включённой границей полуинтервала y_{i+1} . Таким образом, объединение всех полу-

интервалов приведёт к образованию одного полуинтервала с левой включённой границей y_0 и правой выколотой y_{m-1} , то есть к $[0; \delta \cdot m)$. Осталось показать, что $\delta \cdot m > 1$. Для этого проведём следующие равносильные преобразования на основе (4):

$$\left\lfloor \frac{1}{\delta} \right\rfloor = m-1,$$

$$m-1 \leq \frac{1}{\delta} < m$$

Помножим обе части неравенства на δ :

$$\delta \cdot (m-1) \leq 1 < \delta \cdot m.$$

Что и требовалось доказать.

Зададим хеш-функцию следующим образом:

$$h_m(x) = \left\lfloor \frac{f(x)}{\delta} \right\rfloor \quad (6)$$

Индексный массив A_m определяется числом его элементов, которое было вычислено в (3). Покажем, что h_m – монотонная хеш-функция на отрезке $[x_1, x_n]$ и совершенная монотонная на множестве X . Для этого докажем следующие леммы.

Лемма 1. Пусть $x \in [x_1, x_n]$. Тогда для того, чтобы $f(x) \in y_i, i = \overline{0, m-1}$, необходимо и достаточно $h_m(x) = i$.

Доказательство. Покажем необходимость. Возьмём и зафиксируем произвольное $i = \overline{0, m-1}$ и произвольный $x \in [x_1, x_n]$. Пусть $f(x) \in y_i$, это означает, что

$$i \cdot \delta \leq f(x) < (i+1) \cdot \delta. \quad (7)$$

Разделим все части неравенства (7) на δ :

$$i \leq \frac{f(x)}{\delta} < (i+1). \quad (8)$$

Из (8) следует, что $\left\lfloor \frac{f(x)}{\delta} \right\rfloor = i$ или, согласно (6) $h_m(x) = i$. Необходимость доказана.

Покажем достаточность. Для этого предположим противное, то есть $\exists i = \overline{0, m-1}$ и $x \in [x_1, x_n]$, такие что $h_m(x) = i$ и $f(x) \notin y_i$. Так как $x \in [x_1, x_n]$ и в силу (5) $f(x) \in [0, 1] \subset \bigcup_{j=0, m-1} y_j$.

Следовательно $\exists j = \overline{0, m-1}$, такое, что $f(x) \in y_j$. Тогда в силу доказанной ранее необходимости $h_m(x) = j$, но по нашему предположению $h_m(x) = i$, то есть $i = j$, а значит $f(x) \in y_i$. Получили противоречие. Наше предположение неверно, а достаточность доказана.

Лемма 2. $(\forall i, j = \overline{1, n}) (h_m(x_i) \neq h_m(x_j))$

Доказательство. Предположим противное, то есть $(\exists i, j = \overline{1, n}) (h_m(x_i) = h_m(x_j))$.

Пусть $h_m(x_i) = h_m(x_j) = k, k = \overline{0, m-1}$, тогда в силу леммы 1 $f(x_i) \in y_k$ и $f(x_j) \in y_k$. Положим для определённости, что $f(x_i) < f(x_j)$ (строгость знака сравнения обусловлена (2)). Отсюда получаем

$$k \cdot \delta \leq f(x_i) < f(x_j) < (k+1) \cdot \delta. \quad (9)$$

Из (9) и выбора $\delta \leq \delta_{\max}$ следует, что $f(x_j) - f(x_i) < \delta \leq \delta_{\max}$. С другой стороны из (2) и (3) следует, что $f(x_j) - f(x_i) \geq f(x_{i+1}) - f(x_i) \geq \delta_{\max} \geq \delta$. Наше предположение неверно. Лемма доказана.

Утверждение 1. Функция h_m , заданная выражениями (2)–(6), является монотонной на $[x_1, x_n]$ и совершенной на X хеш-функцией, задающей хеш-таблицу из m элементов.

Доказательство. Согласно выбору функции f и выражению (5) $(\forall x \in [x_1, x_n])(f(x) \in y_k, k = \overline{0, m-1})$, что по лемме 1 равносильно $h_m(x) = k, k = \overline{0, m-1}$. Таким образом, показано, что h_m является хеш-функцией на $[x_1, x_n]$, задающей хеш-таблицу из m элементов.

Возьмём и зафиксируем произвольные $\tilde{x}, \hat{x} \in [x_1, x_n], \tilde{x} < \hat{x}$. В силу (5) $(\exists k = \overline{0, m-1})(f(\tilde{x}) \in y_k)$, тогда по лемме 1 $h_m(\tilde{x}) = k$, а в силу строго возрастания f её значение в \hat{x} будет строго больше того её значения в \tilde{x} . Из этого делаем вывод, что $f(\hat{x})$ принадлежит либо полуинтервалу y_k , либо любому другому полуинтервалу, расположенному на числовой оси правее y_k . То есть, $f(\hat{x}) \in y_s, k \leq s$. Тогда по лемме 1 $k \leq h_m(\hat{x})$ или $h_m(\tilde{x}) \leq h_m(\hat{x})$. Таким образом для произвольных $\tilde{x}, \hat{x} \in [x_1, x_n], \tilde{x} < \hat{x}$ показано, что $h_m(\tilde{x}) \leq h_m(\hat{x})$. Монотонность h_m на $[x_1, x_n]$ доказана.

Таким образом показано, что функция h_m является монотонной хеш-функцией на $[x_1, x_n]$, а, следовательно, она монотонная хеш-функция и на подмножестве $[x_1, x_n] - X$. Совершенство h_m на X следует из определения, так как инъективность h_m на X доказана леммой 2.

Утверждение доказано.

Отметим, что предложенный подход к генерации хеш-функций предполагает наличие уже некоторого объёма хранимых данных – множества X . И поэтому он удобен лишь при рехешировании, так как в начале работы с хеш-таблицей X равен пустому множеству.

Процесс получения хеш-функции начинается с построения F – образующего множества функций, которое строится на основе X . Далее происходит выбор образующей функции $f \in F$. Он произволен и от него зависят свойства хеш-функции. После этого по формуле (3) находим δ_{\max} . Выбор же δ из полуинтервала $[\delta_{\max}, 0)$ произволен, и от него также зависят свойства хеш-функции. Таким образом, некоторую хеш-функцию, сгенерированную на основе предложенного подхода, удобно задать в виде

$$\langle X, f(x), \delta \rangle, \quad (10)$$

а соответствующую ей хеш-таблицу

$$\langle X, f(x), \delta, A_m, L, R \rangle, \quad (11)$$

где L и R – ячейки, отвечающие соответственно за поиск и добавление элементов, находящихся в полуинтервалах $[\inf U; x_1)$ и $(x_n; \sup U]$. Таким образом, становятся возможны поиск и добавление в хеш-таблицу (11) произвольного элемента множества U . Естественно, при проведении операции добавления элемента могут возникать коллизии. В данной статье не рассматриваются алгоритмы разрешения коллизий. Единственное требование, которое к ним предъявляется – это сохранение упорядоченности элементов. Так, например, разрешение коллизий методом цепочек[1-3] удовлетворяет предъявленным требованиям, а большинство механизмов разрешения коллизий основанных на открытой адресации[1-2] могут нарушить упорядоченность данных, располагающихся в хеш-таблицах.

Отметим, что в самом общем случае δ может быть больше δ_{\max} . Действительно, неравенство $\delta \leq \delta_{\max}$ используется только в доказательстве леммы 2, которая в свою очередь используется только для того, чтобы показать совершенство (10) на X . Таким образом, если в (10) не соблюдено неравенство $\delta \leq \delta_{\max}$, то утверждение 1 верно за исключением совершенства хеш-функции на X .

Может показаться, что ограничения, наложенные на множество образующих функций, довольно строгие. Подробное обоснование выбора именно такого множества представлено в [13]. Способ построения хеш-функции (3) – (6) назовём генератором хеш-функций.

Исследование свойств генерируемых хеш-функций

Для исследования свойств сгенерированных с помощью (3) – (6) хеш-функций введём некоторые обозначения.

Множество $X_U = \{x_i \in U \mid i = \overline{1, n}, \inf U = x_1 < x_2, \dots < x_n = \sup U\}$.

Функция P_X – функция распределения случайной величины X . Здесь предполагается, что в хеш-таблицу записываются случайные величины, подчинённые некоторому закону распределения. Этому закону подчиняется как множество X , так и новые элементы, записываемые в хеш-таблицу. Плотность вероятности случайной величины X обозначим $\rho(x)$.

Введём функционал $G_i(f), i = \overline{2, n}, f \in F$, такой что $G_i(f) = f(x_i) - f(x_{i-1})$. Назовём функцию f_{opt} оптимальной, если

$$f_{opt} = \arg \left(\max_{f \in F} \left(\min_{i=2, n} G_i(f) \right) \right). \quad (12)$$

Частные случаи хеш-функций вида (10) рассматривались в литературе. Например, хеш-функция $\langle X, x, \delta_{\max} \rangle$ представлена в работах Э.Э. Гасанова и Л.П. Луговской [3, 14]. В них показано [14], что операция поиска производится за 6 элементарных операций, а m в среднем при равномерном законе распределения X равно n^2 . Вместе с тем, в данных работах не было исследовано никакого механизма разрешения коллизий.

В «Теории хранения и поиска информации» Э.Э. Гасанова и В.Б. Кудрявцева (теорема 13, примеры 1 и 2) [3] представлены в качестве элементов предложенных алгоритмов хеш-функции $\langle X, \frac{x - x_1}{x_n - x_1}, \frac{1}{k} \rangle$, где k – некоторое число и подробно исследованы, а в [15]

предложен алгоритм вида $\langle X_U, P_X, \frac{1}{k} \rangle$. Все алгоритмы, базирующиеся на хеш-функциях, предложенных в вышеупомянутых работах [3, 14-15], имеют высокую оценку математического ожидания скорости поиска (1-2 итерации) и нижнюю логарифмическую асимптотическую оценку в худшем случае.

Рассмотрим некоторые хеш-функции. Но для начала предложим критерии их оценки. Хеш-функции не являются хеш-таблицами, они не предусматривают алгоритмов разрешения коллизий, и потому по ним, в отрыве от конкретной реализации ассоциативного массива невозможно оценить время решения поисковых задач, а также добавления и удаления элементов. В качестве критерия оценки хеш-функции предлагается «равномерность рассеивания» [3] «равномерность распределения записей в массиве» [2] или «равномерность хеширования» [1]. Все эти термины означают одно и то же, а именно то, что для каждого добавляемого объекта хранения, его попадание в тот или иной элемент A_m приближённо равновероятно. Будем называть этот показатель хеш-функции – равномерность хеширования.

Рассмотрим хеш-функцию

$$\langle X_U, P_X, \delta \rangle. \quad (13)$$

Во-первых, отметим, что заданная хеш-функция корректна, а именно $P_X \in F$. Действительно, P_X непрерывная, строго возрастающая, и в $x_1 = \inf X$ она равна 0, $x_n = \sup U$ – единице. Вместе с тем, рассматриваемая хеш-функция удовлетворяет утверждению 1. Какова же её равномерность хеширования? Для ответа на этот вопрос возьмём и зафиксируем произвольный индекс $i = \overline{0, m-1}$ и рассмотрим $x \in U \mid h_m(x) = i$. Согласно лемме 1 это равносильно тому, что $P_X(x) \in [i \cdot \delta; (i+1) \cdot \delta)$. Тогда, в силу того, что любая биективная функция обратима, имеет место неравенство:

$$P_X^{-1}(i \cdot \delta) \leq x < P_X^{-1}((i+1) \cdot \delta). \quad (14)$$

То есть все x , значение хеш-функции (13) которых равно i , удовлетворяют неравен-

ству (14). А вероятность p_i – того что произвольный элемент множества U попадёт в полуинтервал, заданный неравенством (14) вычисляется согласно расчёту геометрической вероятности следующим образом:

$$p_i = P_X(P_X^{-1}((i+1) \cdot \delta)) - P_X(P_X^{-1}(i \cdot \delta)) = (i+1) \cdot \delta - i \cdot \delta = i \cdot \delta + \delta - i \cdot \delta = \delta$$

или

$$p_i = \delta . \quad (15)$$

То есть для хеш-функции (13) получение любого значения равновероятно, она обладает максимальной равномерностью хеширования. Однако на практике возникает ряд проблем. Зачастую неизвестны ни P_X , ни $\inf U$, ни $\sup U$. Более того, из-за необходимости разбивать на маленькие отрезки образ U появляется потребность в больших дополнительных объёмах памяти.

В работе «Оптимизационная задача построения отображения на адресное пространство для модели хранения данных с константным временем поиска» [13] исследовались хеш-функции вида:

$$\langle X, f_{opt}, \delta_{max} \rangle. \quad (16)$$

Для таких функций было доказано, что они являются минимальными, монотонными и совершенными на X . В случае если базирующаяся на (16) хеш-таблица предполагает операции добавления, достаточно взять любое $\delta < \delta_{max}$. Оно не изменит совершенности и монотонности хеш-функции, но добавит достаточное количество пустых элементов. Также очевидно, что изменение δ в полуинтервале $(0, \delta_{max}]$ фактически представляет собой управление размером дополнительной памяти. Поэтому перейдём к рассмотрению следующей хеш-функции:

$$\langle X, f_{opt}, \delta \rangle, \quad 0 < \delta \leq \delta_{max}. \quad (17)$$

Исследуем свойства хеш-функции (17) подробнее.

Лемма 3. Для хеш-функции вида (17) $\delta_{max} = \frac{1}{n-1}$.

Доказательство. Предположим, что $\delta_{max} > \frac{1}{n-1}$. Тогда, согласно (3):

$$(\forall i = \overline{2, n}) \left(f(x_i) - f(x_{i-1}) \geq \delta_{max} > \frac{1}{n-1} \right) \Rightarrow \sum_{i=2}^n f(x_i) - f(x_{i-1}) > \sum_{i=2}^n \frac{1}{n-1}$$

или

$$f(x_n) - f(x_1) > \frac{n-1}{n-1} \text{ или } 1 > 1.$$

Получили противоречие, следовательно, предположение неверно, значит δ_{max} для любой хеш-функции не превосходит $\frac{1}{n-1}$.

Согласно построению (12) f_{opt} таково, что δ_{max} – максимально для всех f_{opt} . Таким образом, для доказательства леммы достаточно показать существование $f^* \in F$, такой, что

$$\min_{i=2, n} (f^*(x_i) - f^*(x_{i-1})) = \frac{1}{n-1}.$$

В качестве f^* выберем любую функцию из F , удовлетворяющую системе:

$$\left(f^*(x_i) = \frac{i-1}{n-1} \right) (\forall i = \overline{2, n}). \quad (18)$$

Действительно, для таких функций $f^*(x_i) - f^*(x_{i-1}) = \frac{i-1}{n-1} - \frac{i-1}{n-1} = \frac{1}{n-1}$ для $(\forall i = \overline{2, n})$, а

значит и $\min_{i=2, n} (f^*(x_i) - f^*(x_{i-1})) = \frac{1}{n-1}$.

Пусть F_{opt} – множество оптимальных функций на X_n .

Следствие 1. Для $(\forall f_{opt} \in F_{opt})(\forall i = \overline{2, n}) \left(f_{opt}(x_i) - f_{opt}(x_{i-1}) = \frac{1}{n-1} \right)$.

Доказательство. Предположим противное. Учтём, что согласно лемме 3: $\delta_{\max} = \frac{1}{n-1}$.

То есть: $(\forall f_{opt} \in F_{opt})(\forall i = \overline{2, n}) \left(f_{opt}(x_i) - f_{opt}(x_{i-1}) \geq \frac{1}{n-1} \right)$. Тогда отрицание условия будет иметь вид:

$$(\exists f_{opt} \in F_{opt})(\exists i = \overline{2, n}) \left(f_{opt}(x_i) - f_{opt}(x_{i-1}) > \frac{1}{n-1} \right). \quad (19)$$

Возьмём и зафиксируем f_{opt} из (19). Тогда для него верно, что

$$\sum_{i=2}^n f_{opt}(x_i) - f_{opt}(x_{i-1}) > \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} \Leftrightarrow 1 > 1.$$

Получили противоречие. Следовательно, наше предположение неверно и следствие доказано.

Следствие 2.

$$F_{opt} = \left\{ f \in F \mid \left(f^*(x_i) = \frac{i-1}{n-1} \right) (\forall i = \overline{2, n}) \right\}. \quad (20)$$

Доказательство. В лемме 3 было показано, что произвольная функция из F_{opt} является оптимальной. Теперь покажем обратное, то есть любая оптимальная функция удовлетворяет (18). Возьмём и зафиксируем произвольное $i = \overline{2, n}$. Рассмотрим сумму (S):

$$S = \sum_{k=2}^i f_{opt}(x_k) - f_{opt}(x_{k-1}).$$

С одной стороны, $S = f_{opt}(x_i) - f_{opt}(x_1) = f_{opt}(x_i)$, а согласно следствию 1 $S = \frac{i-1}{n-1}$. Таким образом, для произвольного $i = \overline{2, n}$ получаем $f_{opt}(x_i) = \frac{i-1}{n-1}$. Что и требовалось доказать.

Под X_n будем понимать множество X , состоящее из n элементов и меняющееся путём добавления новых элементов, распределённых на U согласно закону P_x . Для простоты дальнейшей работы и корректности записей обозначим $X_n = \{x_1^n, x_2^n, \dots, x_n^n\}$.

Лемма 4. При $n \rightarrow \infty$ $X_n \rightarrow X_U$.

Доказательство. Условие Леммы аналогично следующим двум условиям:

$$\begin{cases} \lim_{n \rightarrow \infty} x_1^n = \inf U, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} x_n^n = \sup U. \end{cases} \quad (21)$$

Возьмём и зафиксируем произвольное $\varepsilon > 0$. Рассмотрим полуинтервалы $[\inf U, \inf U + \varepsilon)$ и $(\sup U - \varepsilon, \sup U]$. Вероятности попадания элемента в эти полуинтервалы: $P_x(\inf U + \varepsilon)$ и $P_x(\sup U) - P_x(\sup U - \varepsilon)$ являются ненулевыми, а потому с неограниченным возрастанием n , найдутся такие n_1 и n_2 , что $x_1^{n_1} \in [\inf U, \inf U + \varepsilon)$, а $x_{n_1}^{n_1} \in (\sup U - \varepsilon, \sup U]$. Начиная с этого момента с возрастанием n x_1^n не увеличится, а x_n^n не уменьшится. То есть $(\forall n > n_1)(|x_1^n - \inf U| < \varepsilon)$ и $(\forall n > n_2)(|x_n^n - \sup U| < \varepsilon)$. То есть (21) верно, по определению предела.

Утверждение 2. При $n \rightarrow \infty$ $f_{opt} \rightarrow P_X$.

Доказательство. Согласно (20) и в силу строгого возрастания f_{opt}

$$(\forall x \in (x_{i-1}, x_i]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\frac{i-2}{n-1} < f_{opt}(x) \leq \frac{i-1}{n-1} \right) \quad (22)$$

Рассмотрим множество $Z_m = \left\{ z_k, k = \overline{0, m} \mid z_k = P_X^{-1}\left(\frac{k}{m}\right) \right\}$. Вероятность того, что случайная величина x попадёт в отрезок $[z_{k-1}, z_k]$, равна: $P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k}{m}\right)\right) - P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k-1}{m}\right)\right) = \frac{k}{m} - \frac{k-1}{m} = \frac{1}{m}, \forall k = \overline{1, m}$.

Пусть w_k – число точек множества X , попавших в $[z_{k-1}, z_k]$. Тогда, согласно статистическому определению вероятности [16]

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{w_k}{n} = \frac{1}{m}, \forall k = \overline{1, m}. \quad (23)$$

Возьмём и зафиксируем некоторое число $k = \overline{1, m}$. Рассмотрим такие целые числа M и N , что $(x_M \leq z_{k-1} < z_k \leq x_N) \wedge (x_{M+1} > z_{k-1}) \wedge (x_{N-1} < z_k)$.

Тогда, согласно нашим обозначениям

$$M = \sum_{l=1}^{k-1} w_l, N = M = \sum_{l=1}^k w_l. \quad (24)$$

Из (24) и (22) легко видеть, что

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\frac{\sum_{l=1}^{k-1} w_l - 2}{n-1} < f_{opt}(x) \leq \frac{\sum_{l=1}^k w_l - 1}{n-1} \right)$$

или

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\sum_{l=1}^{k-1} \frac{w_l}{n-1} - \frac{2}{n-1} < f_{opt}(x) \leq \sum_{l=1}^k \frac{w_l}{n-1} - \frac{1}{n-1} \right). \quad (25)$$

Возьмём пределы от каждого члена неравенства в (25) при $n \rightarrow \infty$. Получим

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{l=1}^{k-1} \frac{w_l}{n-1} - \frac{2}{n-1} \right) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} (f_{opt}(x)) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{l=1}^k \frac{w_l}{n-1} - \frac{1}{n-1} \right) \right)$$

или

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\sum_{l=1}^{k-1} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{w_l}{n-1} \right) \leq f_{opt}(x) \leq \sum_{l=1}^k \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{w_l}{n-1} \right) \right).$$

Тогда в силу (23) получаем:

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\frac{k-1}{m} \leq f_{opt}(x) \leq \frac{k}{m} \right).$$

Из чего в силу построения множества Z_m делаем вывод

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) (P_X(z_{k-1}) \leq f_{opt}(x) \leq P_X(z_k)). \quad (26)$$

Согласно построению множества $Z_m, z_k = P_X^{-1}\left(\frac{k}{m}\right), \forall k = \overline{0, m}$. Тогда (26) перепишем в виде:

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k-1}{m}\right)\right) \leq f_{opt}(x) \leq P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k}{m}\right)\right) \right)$$

или

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(\frac{k-1}{m} \leq f_{opt}(x) \leq \frac{k}{m} \right). \quad (27)$$

С другой стороны:

$$\begin{aligned} x \in [z_{k-1}, z_k] &\Leftrightarrow (z_{k-1} \leq x \leq z_k) \Rightarrow \\ P_X(z_{k-1}) \leq P_X(x) &\leq P_X(z_k) \Leftrightarrow \\ P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k-1}{m}\right)\right) &\leq P_X(x) \leq P_X\left(P_X^{-1}\left(\frac{k}{m}\right)\right) \Leftrightarrow \\ \frac{k-1}{m} &\leq P_X(x) \leq \frac{k}{m}. \end{aligned} \quad (28)$$

В силу (27) и (28) получаем:

$$(\forall x \in [z_{k-1}, z_k]) (\forall f_{opt} \in F_{opt}) \left(f_{opt}(x), P_X(x) \in \left[\frac{k-1}{m}, \frac{k}{m} \right] \right). \quad (29)$$

Выбор m произволен. Это позволяет нам неограниченно увеличивать m , сохраняя при этом условие $m \ll n$, так как n устремлён к бесконечности. В случае неограниченного увеличения m , отрезок $\left[\frac{k-1}{m}, \frac{k}{m} \right]$ неограниченно уменьшается, что приводит в силу (29) к неограниченному сближению $f_{opt}(x), P_X(x)$. Что и требовалось доказать.

Следствие. При $n \rightarrow \infty$. (17) \rightarrow (13).

Доказательство. Действительно при $n \rightarrow \infty$ в силу леммы 4 $f_{opt} \rightarrow P_X$, а в силу утверждения 2 $f_{opt} \rightarrow P_X$. Это и означает $\langle X, f_{opt}, \delta \rangle \rightarrow \langle X_U, P_X, \delta \rangle$ или (17) \rightarrow (13).

Заключение

Следствие к утверждению 2 приводит к гипотезе о том, что на больших значениях n хеш-функция вида (17) обладает высокой равномерностью хеширования. Однако возможно, что высокая равномерность достигается только на очень больших n . И использование (17) для построения хеш-таблиц на практике может быть неоправданно. Для подтверждения или опровержения гипотезы необходимо провести вычислительные эксперименты. При постановке данных экспериментов целесообразно в качестве f_{opt} использовать соответствующий линейный сплайн [17]. Сплайн не обеспечивает высокой скорости поиска, так как его вычисление имеет логарифмическую асимптотическую оценку. Однако он представляет собой f_{opt} , а целью экспериментов является исследования поведения f_{opt} при росте n . Также с помощью сплайнов удобно задать верхние и нижние ограничения для f_{opt} . Проведение этих исследований позволит определить области применения и дальнейшие пути развития, предложенного в данной работе генератора хеш-функций.

Библиографический список

1. **Кормен, Т.** Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2011. – 1290 с.
2. **Кузнецов, С.Д.** Методы сортировки и поиска / С.Д. Кузнецов. – ИСП РАН, Центр Информационных Технологий. Режим доступа: <http://citforum.ru/programming/theory/sorting/sorting2.shtml>.
3. **Гасанов, Э.Э.** Теория хранения и поиска информации / Э.Э. Гасанов, В.Б. Кудрявцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 288 с.
4. **Loftsgaarden, D.** A nonparametric density function / D.O. Loftsgaarden C.P. Queensberry. – Ann. Math. Stat. 36, 1965. С. 1049–1051.
5. **Lauter, U.** 4-dimensional binary search trees as a means to speed up associative searches in design verification of integrated circuits // Journal of Design Automation and Fault Tolerant Computing, 2, 1978. №3. С. 241–247.
6. **Кнут, Д.** Искусство программирования для ЭВМ Т. 3. Сортировка и поиск / Д. Кнут. – М.: Мир, 1978.

7. **Zbigniew, J.C.** An optimal algorithm for generating minimal perfect hash functions / J.C. Zbigniew, G Navas, B.S. Majewski. – Informational processing letters. 1992. №43(5). С. 257–264.
8. **Pescio, C.** Minimal perfect hashing. – Dr. Dobb's Journal. 1996. № 249.
9. **Верещагин, Н.К.** Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Ч. 1. Начала теории множеств. – 2-е изд., испр. / Н.К. Верещагин, А. Шень. – М.: МЦНМО, 2002. – 128 с.
10. **Belazzougui, D.** Monotone Minimal Perfect Hashing: Searching a Sorted Table with O(1) Accesses / D. Belazzougui, P. Boldi, R. Pagh, S. Vigna. – Proceedings of the 20th Annual ACM-SIAM Symposium On Discrete Mathematics (SODA), New York, 2009. ACM Press.
11. **Belazzougui, D.** Theory and Practise of Monotone Minimal Perfect Hashing / D. Belazzougui, P. Boldi, R. Pagh, S. Vigna. – In Proceedings of the 11th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments, ALENEX '09. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
12. Математическая энциклопедия / под ред. И. М. Виноградова. – М.: Советская энциклопедия, 1977–1985.
13. **Яковлев, А.В.** Оптимизационная задача построения отображения на адресное пространство для модели хранения данных с константным временем поиска / А.В. Яковлев [и др.]. – Воронеж: Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. №12. С. 36–41.
14. **Гасанов, Э.Э.** Константный в худшем случае алгоритм поиска идентичных объектов / Э.Э. Гасанов, Ю.П. Луговская // Дискретная математика, 1999. Т.11. №4. С. 139–144.
15. **Поляков, Д.В.** Алгоритм поиска идентичных объектов на непрерывном множестве // Методы управления потоками в транспортных системах. МАДИ. 2009. С. 114–121.
16. **Лаговский, А.Ф.** Теория вероятности: учеб. пособие / А.Ф. Лаговский. – Калининград: Изд-во Калининградского университета, 1997. – 103 с.
17. **Алберг, Дж.** Теория сплайнов и её приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. – М.: Мир, 1972. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

D.V. Polyakov, A.I. Popov

GENERATOR OF THE MONOTONE HASH FUNCTION FOR AN ASSOCIATIVE ARRAY

Tambov state technical university

Purpose: Generator of hash functions with a good value of asymptotic characteristics of algorithms solving of basic search problems is offered.

Approach: The methodology is based on the set theory and theory of information retrieval.

Findings: The approach to the generation of hash functions is presented. Offered the method for obtaining a hash function based on the considered generator.

Research limitations: Proposed and substantiated the hypothesis of high characteristics of the algorithms for solving basic search problems by hash functions obtained with the proposed method. Expected that the further researches will confirm the hypothesis and will specify it's characteristics.

Originality/value: Proposed generator defined the family of hash functions for new effective associative arrays based on hash table.

Key words: hash function, hash table, an associative array, minimal hashing, monotone hashing, perfect hashing, generation of hash functions, search of an identical object, the problem of proximity, interval search.

УДК 004.045

С.В. Логанов

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАПИСИ СОСТАВНЫХ ОБЪЕКТОВ В БД

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена решению проблемы сохранения и восстановления составных объектов бизнес слоя в реляционной БД с обеспечением возможности редактирования как самого бизнес-объекта, так и его составных частей.

Ключевые слова: сохранение объектов в БД, шаблоны проектирования, обеспечение слабой связанности и высокого зацепления.

Типовой задачей разработки объектно-ориентированных программ является запись объектов модели предметной области в БД. Часто для решения этой задачи по тем или иным причинам невозможно использование различных объектных и объектно-реляционных библиотек, выполняющих эту задачу. Поэтому разработчик объектно-ориентированного ПО вынужден самостоятельно выбирать решение задачи чтения и сохранения объектов.

Для записи простых объектов в БД М. Фаулер [1] предложил использовать шлюз таблицы данных. Это решение основано на создании дополнительного объекта шлюза, на который возлагается обязанность чтения и записи объекта предметной области или бизнес-объекта (рис. 1). Это решение является шаблоном «Чистой синтетики» [2] и обеспечивает хорошее распределение обязанностей для множества бизнес-объектов, имеющих зависимости и простые ассоциации с другими объектами.

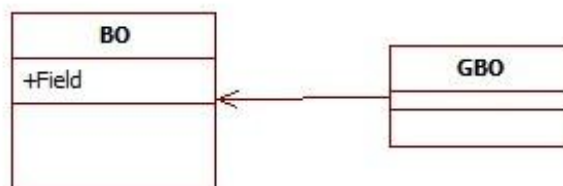


Рис. 1. Объект – шлюз (GBO) для записи бизнес-объекта (BO) в БД

В случае если бизнес-объект состоит из множества однородных частей, то для чтения из БД также может быть использован объект-шлюз бизнес-объекта (рис. 2).

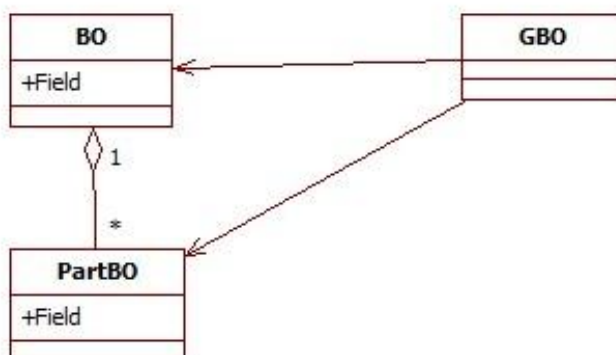


Рис. 2. Объект – шлюз для чтения составного бизнес-объекта в БД

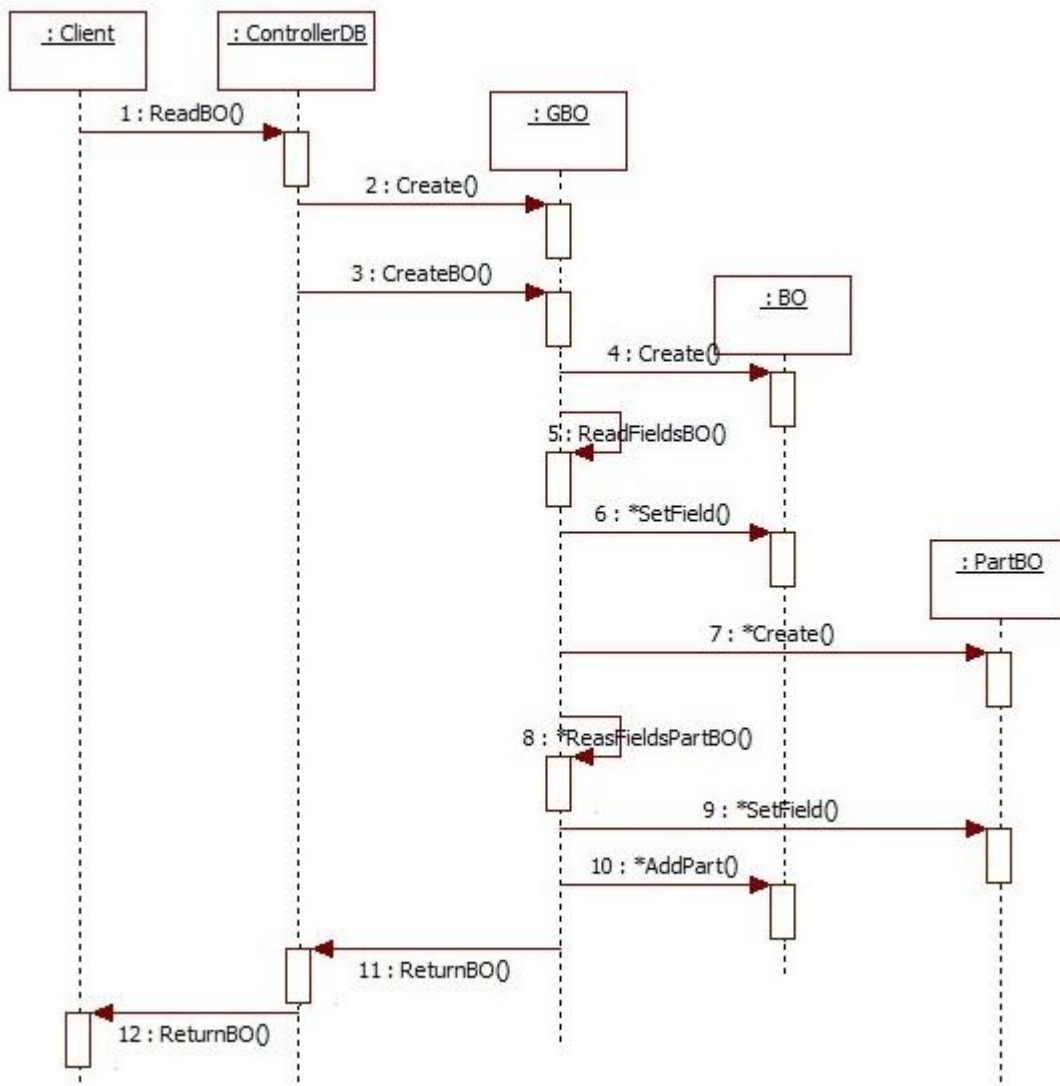


Рис. 3. Чтение бизнес-объекта из БД

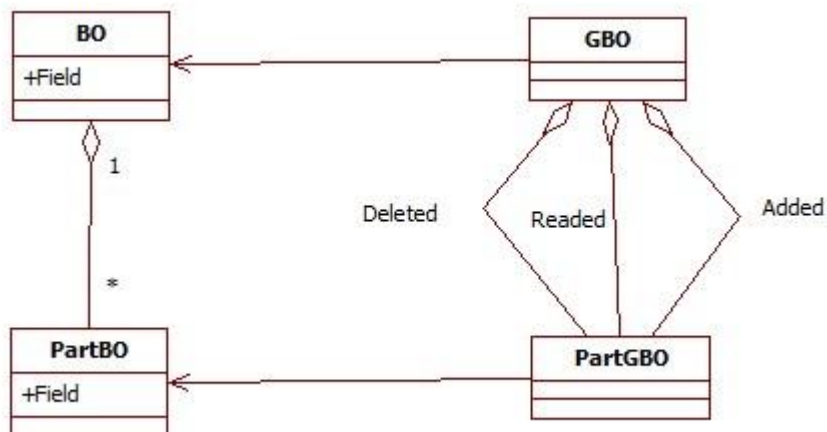


Рис. 4. Объект – шлюз для чтения и записи бизнес-объекта в БД

Запрос некоторого класса клиента (Client) к контроллеру БД (ControllerDB) на получение составного объекта может быть выполнен как показано на рис. 3. При этом контроллер БД обеспечивает чтение объекта DataSet, содержащего таблицы для бизнес-объектов и их со-

ставных частей, а объект шлюз бизнес-объекта (ГВО) выполняет поиск заданного по какому-либо уникальному признаку бизнес-объекта и воссоздает полную структуру этого объекта.

Если необходимо редактирование бизнес-объекта и его составных частей, то объект-шлюз согласно шаблону «Эксперт» также должен содержать собственные части, которые имеют ассоциацию с частями бизнес-объекта и обеспечивают перенос содержимого из DataSet в объекты части и обратно. При этом шлюз бизнес-объекта должен содержать три списка своих частей для новых, прочитанных и удаленных частей бизнес-объекта (рис. 4). При выполнении чтения из БД шлюз бизнес-объекта (ГВО) заполняет список прочитанных объектов (PartГВО), у которых имеются ассоциации с оригинальными частями бизнес-объекта (PartBO) (рис. 5).

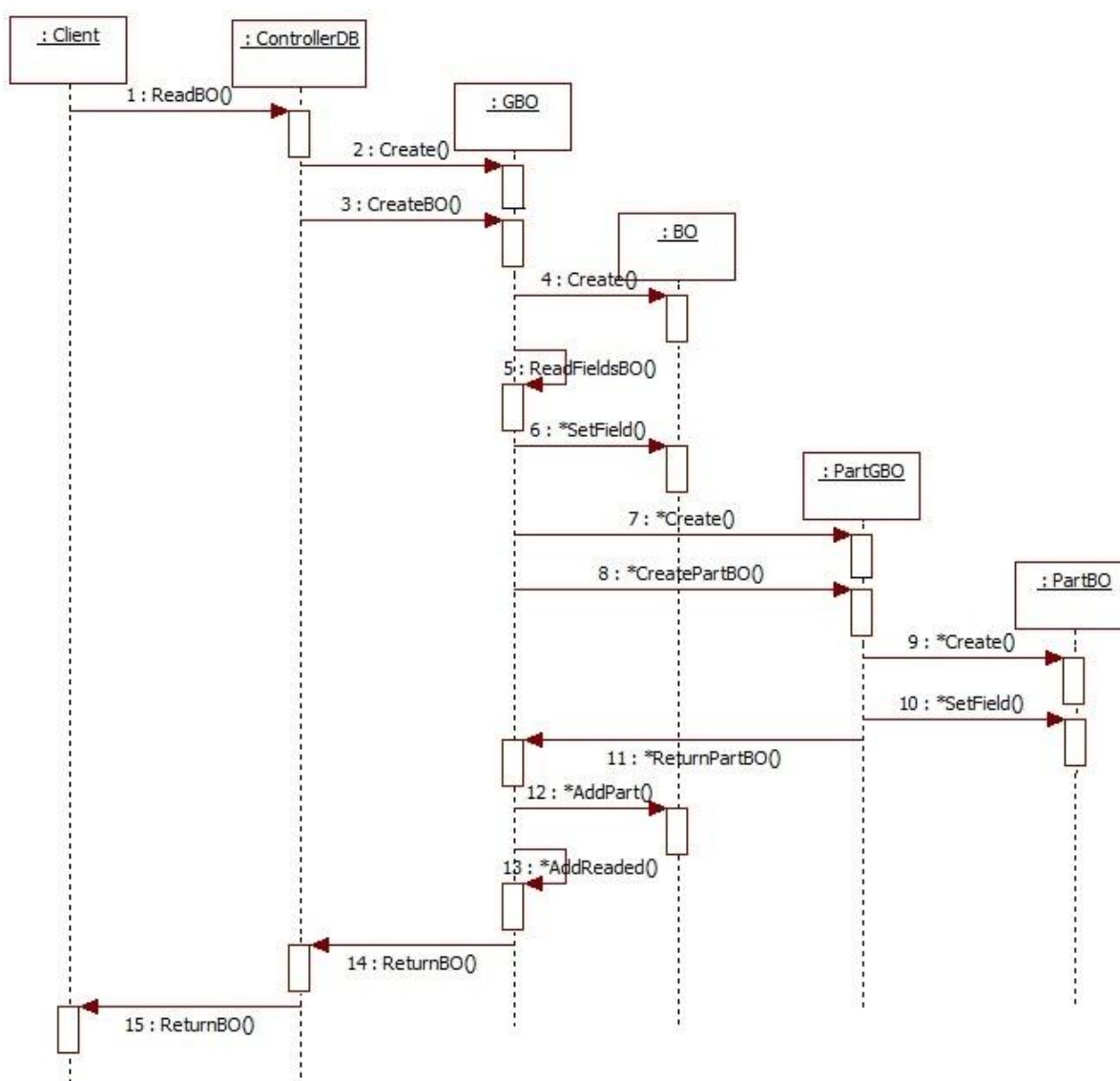


Рис. 5. Чтение бизнес-объекта с учетом возможного его последующего записи в БД

Тогда редактирование бизнес-объекта и его содержимого некоторой формой EdtForm должно осуществляться с помощью контроллера системной операции (Controller) [2] для обеспечения высокой степени зацепления и малого уровня связанности. Обязанностью данного контроллера является управление двумя объектами: бизнес-объектом и шлюзом бизнес-объекта. Добавление нового бизнес-объекта и его части показано на рис. 6, которое происходит по запросу формы редактирования и передаче в запросе всей необходимой информации.

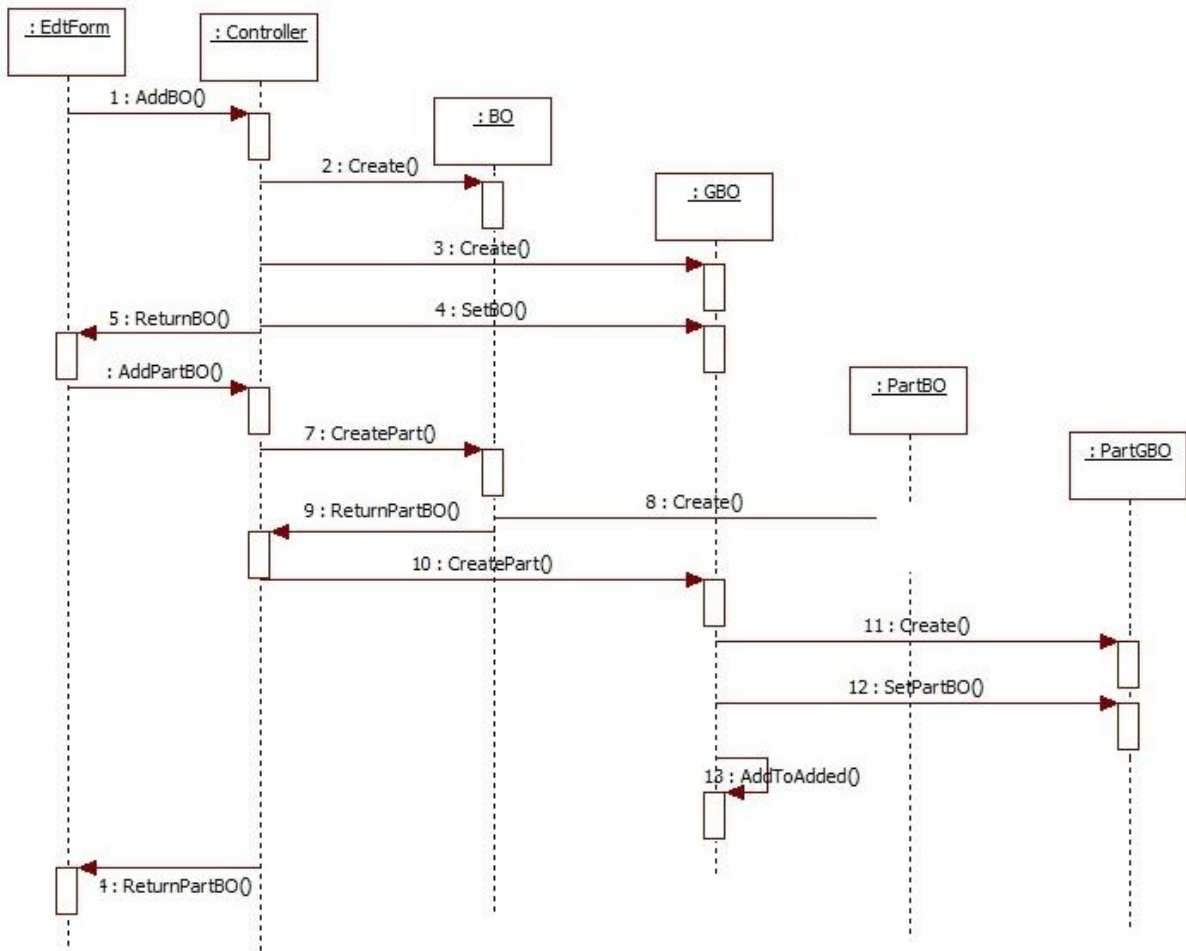


Рис. 6. Создание бизнес-объекта и добавление в него одной из частей

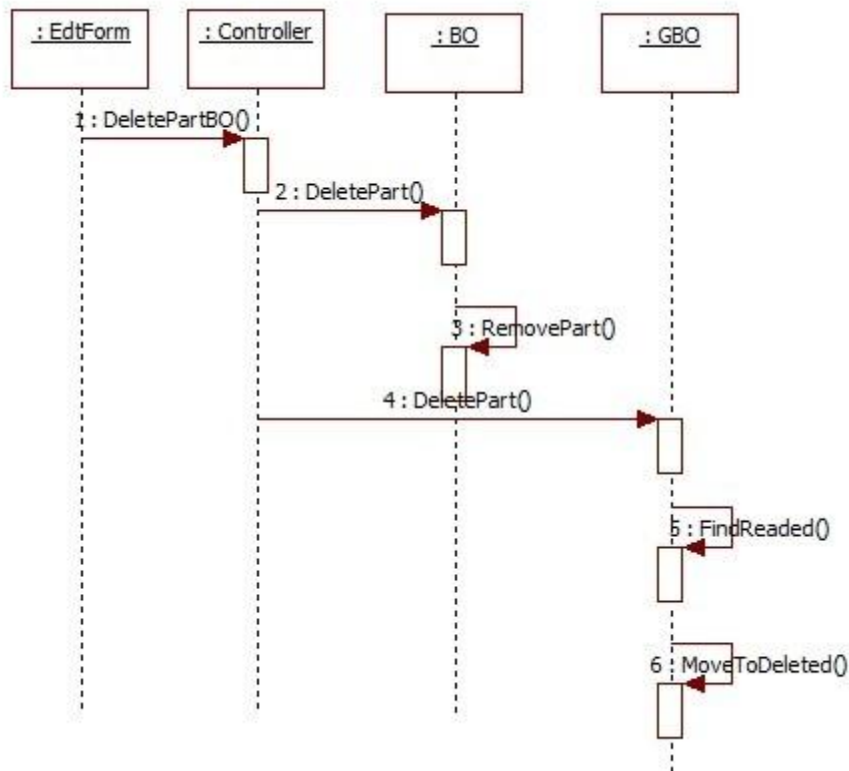


Рис. 7. Удаление существующей в БД части бизнес-объекта

Удаление части бизнес-объекта, которая уже существует и прочитана из БД, представлено на рис. 7. При выполнении такого удаления часть шлюза бизнес-объекта (PartGBO) переносится из списка прочитанных в список удаленных частей для последующего их удаления из БД. Удаление части бизнес-объекта, которая была создана в процессе его редактирования, показано на рис. 8 и выполняется простым ее удалением из списка добавленных частей.

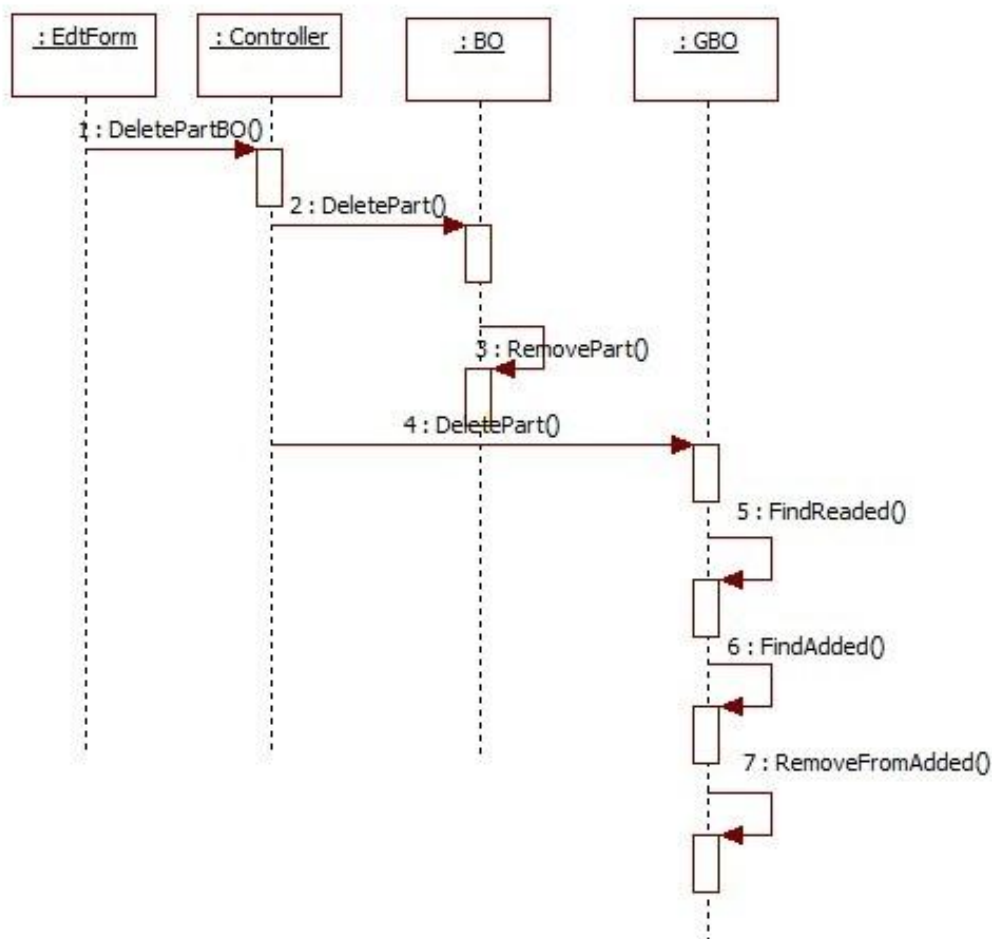


Рис. 8. Удаление вновь добавленной части бизнес-объекта

Сохранение отредактированного бизнес-объекта предполагает вставку новых объектов из списка добавленных частей, обновление записей для частей, оставшихся в списке прочитанных объектов и удаление записей, соответствующих списку удаленных объектов (рис. 9).

Полный цикл управления бизнес-объектом можно полностью переложить на его шлюз, обеспечив его и его частей возможностью появляться там, где ожидается взаимодействие с оригинальным бизнес-объектом и его частями с помощью наследования (рис. 10).

В этом случае в местах, где предполагается редактирование бизнес-объекта, должен использоваться объект-шлюз и его части. А там, где бизнес-объект выполняет свои задачи предметной области, он может быть использован непосредственно.

Если же бизнес-объект состоит из нескольких видов частей, то и объект-шлюз согласно шаблону «Эксперт» также должен состоять из частей нескольких видов. При этом каждому виду части бизнес-объекта должен соответствовать класс, являющийся частью шлюза этого бизнес-объекта.

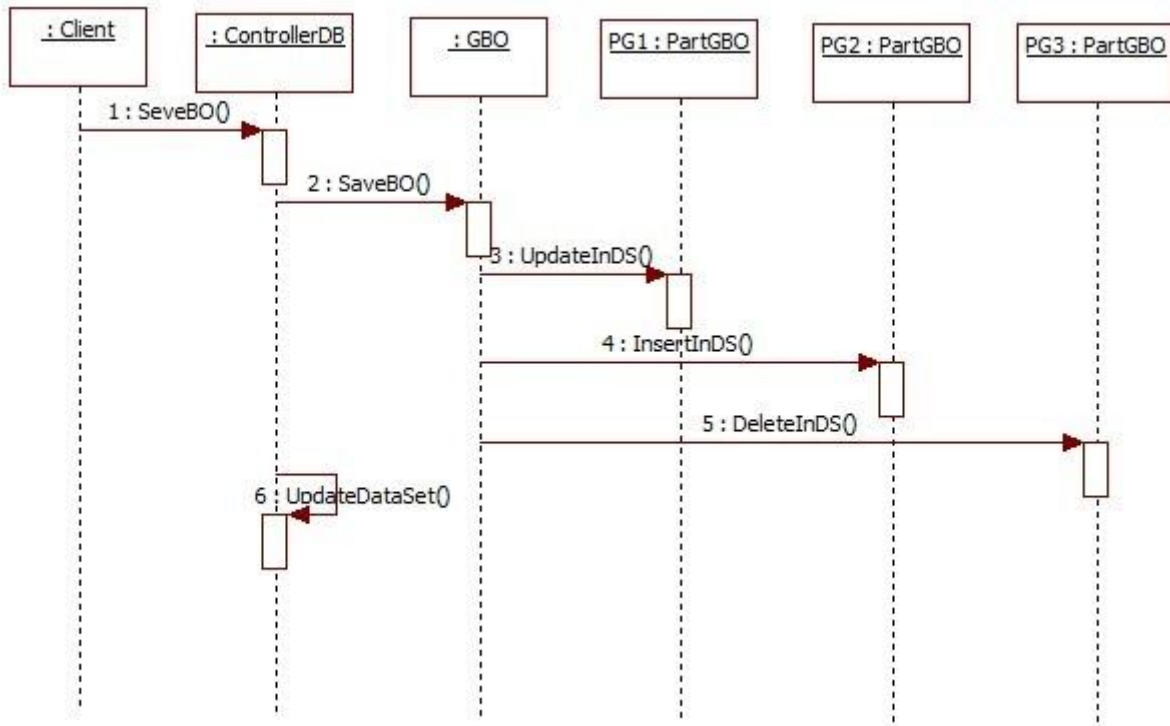


Рис. 9. Сохранение отредактированного бизнес-объекта в БД

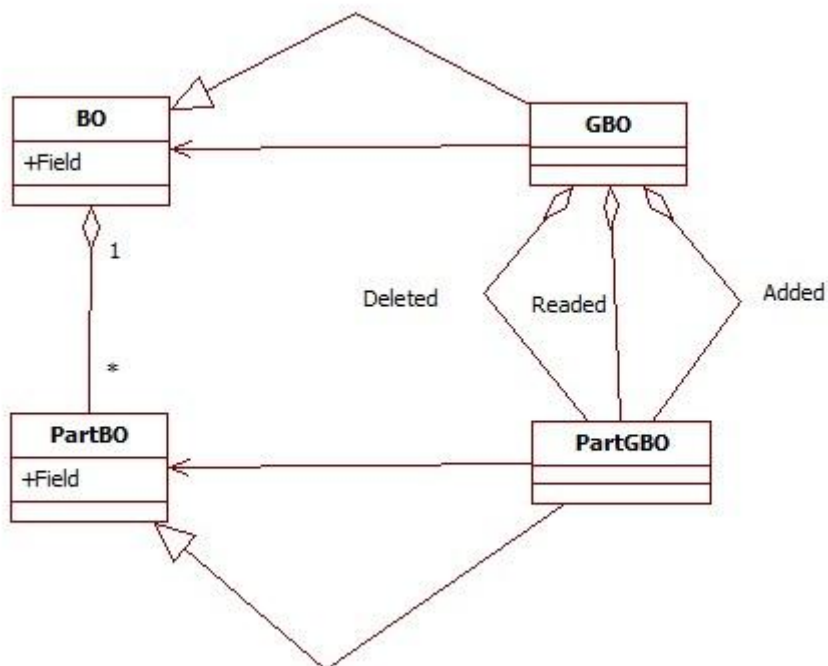


Рис. 10. Определение объекта – шлюза для замещения бизнес-объекта

Выводы

Предложено применение шлюза бизнес-объекта для сохранения и восстановления составных объектов бизнес-слоя с возможностью обеспечения редактирования как самого бизнес-объекта, так и его составных частей. Определена структура шлюза бизнес-объекта, обеспечивающая корректное обновление объектов модели предметной области в реляционной

БД. Предложена структура универсального шлюза, обеспечивающего редактирование бизнес-объектов без использования контроллера управления.

Библиографический список

1. **Мартин, Ф.** Архитектура корпоративных программных приложений: [пер. с англ.] / Ф. Мартин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 544 с.
2. **Ларман, К.** Применение UML2.0 и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ и проектирование: учеб. пособие: [пер. с англ.] / К. Ларман. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 736 с.

*Дата поступления
в редакции 16.04.2015*

S.V. Loganov

SAVING COMPOSIT BUSSINESS OBJECTS IN RELATION DATABASE

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

Purpose: The solution to the problem of the preservation and restoration of composite objects in the business layer in a relational database with the capability of editing the business object and its constituent parts.

Design/ methodology/ approach: Applying pattern "Pure fabrication" for writing and reading composite objects of the domain model.

Findings: The application gateway of business object to save and restore the composite objects in the business layer with the possibility of editing the business object and its constituent parts.

Research limitations/implications: Used in applications for which it is impossible to use special libraries storing objects in a relational database.

Originality/ value: Identified pattern of gateway business object providing a correct update of the composite business object.

Key words: storing objects in databases, design patterns, providing low coupling and high cohesion.

УДК 004.896

В.А. Лазарев

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

«Интел ЗАО», Нижний Новгород

Представлен результат анализа предметной области систем автоматизированного тестирования и рассматривается методика интеллектуальной поддержки подобных систем с использованием продукционной модели представления знаний.

Ключевые слова: Интеллектуальная поддержка, продукционная модель, автоматическое тестирование

По мере развития индустрии программного обеспечения (ПО) развиваются и средства обеспечения заданного качества выпускаемых продуктов. Одним из основных подходов к достижению заданного качества продукта стала автоматизация процесса тестирования программного обеспечения. Данный сегмент рынка автоматизированных систем (АС) активно развивается. Однако, к сожалению, не существует единого формализованного подхода к комплексу вопросов построения и поддержки данного класса систем.

Как показала практика, применение автоматизированного тестирования несет ряд сложностей, проявляющихся по мере их развития:

- увеличение количества тестов приводит к увеличению машинного времени требующемуся для получения тестовых результатов, а также к увеличению времени анализа полученных результатов;
- гетерогенность тестовых платформ, как программная, так и аппаратная, требует различных подходов и компетенций для анализа тестовых результатов;
- основной фокус при анализе тестовых результатов делается внутрь теста. Проблемы, приносимые окружением, чаще всего остаются «за скобками»;
- большой объем рутинных действий приводит к демотивации персонала, что негативно сказывается на качестве анализа тестовых результатов.

В данной работе ставится задача автоматизации процесса поддержки автоматизированного тестирования программных комплексов. Для этого приводятся результаты анализа предметной области функционирования рассматриваемых АС. Предлагается использовать интеллектуальную систему (ИС), в основе которой лежит продукционная модель представления знаний в качестве инструментария поддержки системы автоматизации тестирования программных комплексов (САТПК). Представлена методика формализации знаний о предметной области и построения инструментария интеллектуальной поддержки.

Теоретический анализ

Анализ предметной области их функционирования позволил сформулировать ряд типовых требований к САТПК.

1. Поддержка в режиме реального времени любых изменений в тестируемом ПО. Реализация этих идей позволяет выявлять проблемы в программном продукте на ранних стадиях разработки ПО. По мере роста размеров и сложности программных продуктов количество тестов и время, требуемое для их исполнения, растет пропорционально. В результате для получения результатов за ограниченное время требуется увеличивать парк тестовых машин и распараллеливать процесс тестирования.

2. Предоставление достоверных данных. Неверные результаты тестирования приводят к дополнительным расходам (либо на анализ ошибки в тесте, либо на исправление ошиб-

ки на более поздних этапах жизненного цикла программного продукта, что всегда «дороже»). Кроме того, аппаратные или программные сбои на конкретных машинах могут заблокировать процесс тестирования. Для решения подобных проблем увеличивают количество тестовых машин в каждой платформе. В результате подозрительный тест можно выполнить на нескольких однотипных тестовых машинах, что зачастую помогает локализовать проблему.

3. Гетерогенность тестовых платформ. Так как многие программные продукты поддерживают несколько платформ (как минимум несколько версии операционной системы), требуется проводить тестирование на парке тестовых машин.

4. Непрерывная работа САТПК. Для сокращения издержек требуется максимально загрузить имеющиеся мощности, в том числе в нерабочее время.

5. Эта задача решается путем автоматизации запуска, распределения тестовых задач, а также автоматизации сбора тестовых результатов.

6. Отслеживаемость процесса тестирования. При автоматическом исполнении тестов необходимо иметь возможность анализа тестового результата по завершении тестов. Для этого все данные о настройке тестового окружения и самом процессе выполнения теста должны сохраняться, включая информацию в стандартных потоках ввода-вывода, статус промежуточных операций.

7. Воспроизводимость результатов. Для анализа тестового падения полезно иметь возможность перезапустить упавший тест с той же версией тестов и продукта, а также на той же программно-аппаратной платформе.

8. Автоматизация процесса построения тестов и тестируемого ПО.

9. Поддержка в режиме реального времени процесса автоматического тестирования. Статистически выявлено, что эффективная поддержка работы САТПК способна без дополнительных затрат поднять эффективность работ бизнес-единицы, которая разрабатывает и тестирует ПО.

Большинство из сформулированных требований воспроизводится в каждой из известных авторам САТПК. Это позволило формализовать типовую архитектуру данного класса АС, которая представлена на (рис. 1).

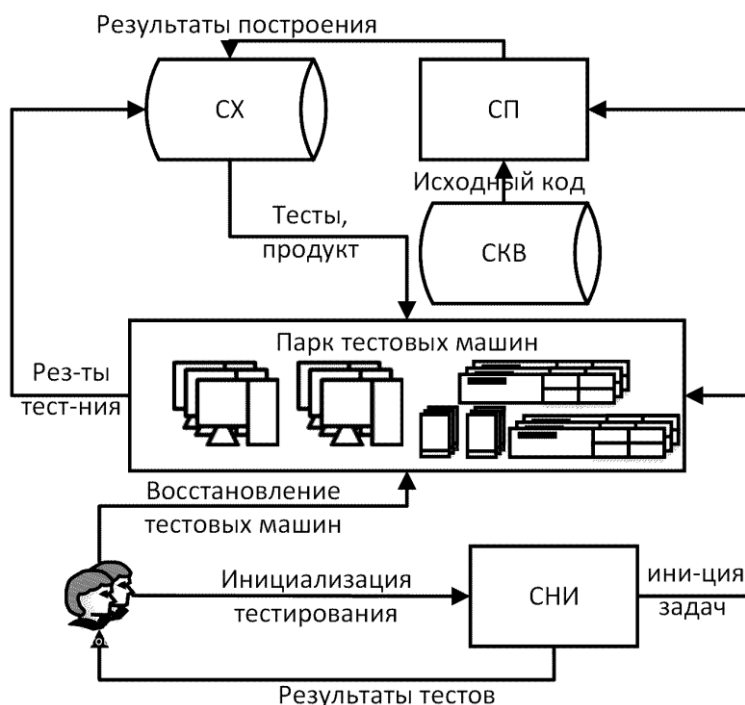


Рис. 1. Типовая архитектура САТПК

На рисунке представлена общая архитектура системы автоматического тестирования,

состоящая из парка тестовых машин, системы распределения задач, в качестве которой используется система непрерывной интеграции (СНИ), системы построения (СП), системы контроля версий исходного кода (СКВ), сетевого хранилища (СХ), персонала, который обеспечивает работу системы.

В данной работе предлагается внедрить систему интеллектуальной поддержки процесса автоматического тестирования. В результате произойдет переход к системе, указанной на рис. 2, в которой интеллектуальный модуль (СИП) автоматизирует ряд рутинных операций, которые ранее требовали участия персонала.

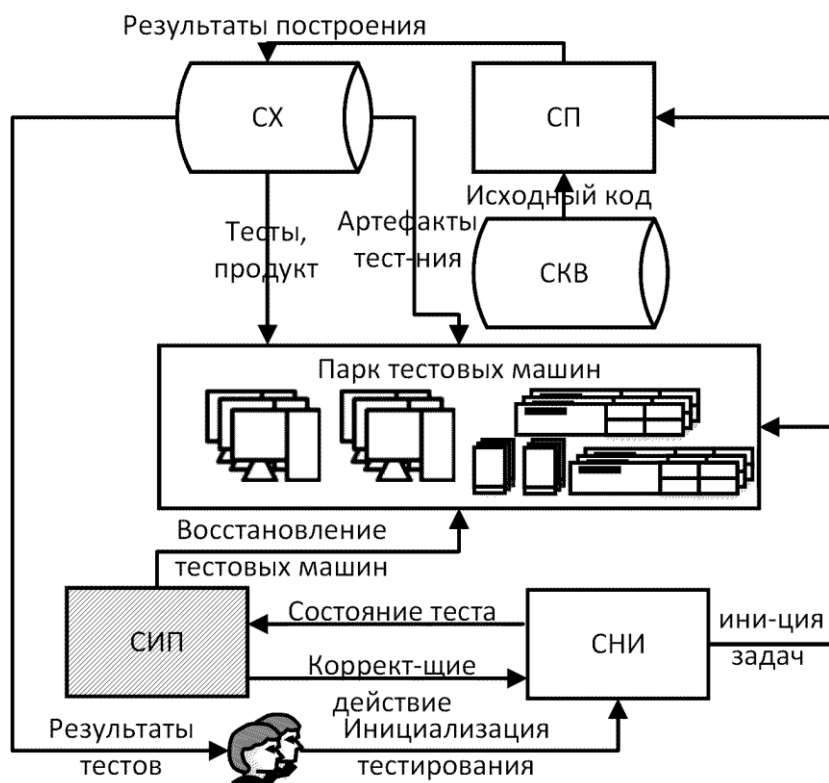


Рис. 2. Модифицированная архитектура САТПК

Методика

Для перехода к данной архитектуре требуется формализовать процедуру представления данных о предметной области работы СИП и ее представление в машинно-ориентированном виде. В качестве ядра СИП выступает производственная экспертная система, построенная с помощью оболочки CLIPS [1].

Выбор производственной модели обусловлен следующими свойствами [2]:

- естественность для человека. Подобные системы идеально моделируют логическое мышление без учета эмоций;
- ориентация на модифицируемость и расширяемость. Данное свойство обусловлено:
 - аддитивным характером правил. Т.е. если к множеству правил добавить новое подмножество, изначальное множество не меняется;
 - локальностью изменения. При изменении отдельного правила меняется только одна причинно-следственная связь;
- машинная ориентация правил. Производственные правила легко реализуются с помощью баз данных и композитной логики.

Кроме того, в пользу выбора производственной модели говорят следующие свойства предметной области:

- основными знаниями являются информация о причинно-следственных связях между

различными состояниями элементов подсистем (исполняющийся тест, тестовая машина, результат конкретного теста) системы автоматического тестирования и способы приведения их в желаемое состояние. Основной задачей системы поддержки автоматического тестирования является управление работой элементов различных подсистем. Для поддержания их в требуемом состоянии наиболее логично использовать продукционные правила ЕСЛИ...ТО...;

- тестовые инженеры чаще всего используют неформализованные процедуры в формате: ЕСЛИ...ТО... Данные процедуры легко формализуются с помощью продукционных правил.

В результате применение продукционных правил позволит эффективно построить базу знаний поддержки системы автоматического тестирования. В процессе анализа знаний о предметной области формат продукционного правила претерпел ряд трансформаций:

1. В простейшем случае продукционной модели правило имеет следующий вид:

$$(k) \text{ЕСЛИ } A_i \text{ и } \dots \text{ и } A_j \text{ ТО } B_k,$$

где k – идентификатор правила;
 A – множество допустимых условий;
 B – множество допустимых действий.

2. Для упрощения поддержки и минимизации вероятности возникновения формальных и концептуальных конфликтов, свойственных продукционной модели, БЗ разбивается на фрагменты в соответствии с типовыми задачами в предметной области. Правило примет следующий вид:

$$(k) \text{ЕСЛИ } (frag) \text{ и } (A_i \text{ и } \dots \text{ и } A_j) \text{ ТО } B_k,$$

где $frag$ – идентификатор фрагмента предметной области, к которой принадлежит данное правило.

3. Для разрешения формальных и концептуальных конфликтов, свойственных продукционным БЗ, а также для оптимизации БЗ вводятся функции мер:

$$(k) (M_{k,1} \dots M_{k,n}) \text{ЕСЛИ } (frag) \text{ и } (A_i \text{ и } \dots \text{ и } A_j) \text{ ТО } B_k,$$

где M – множество допустимых мер, применяемых к правилам.

4. Для решения проблемы сложности представления всего множества параметров реальных объектов, вводятся дескрипторы, которые указывают на паспорт ситуации:

$$(k) (D.M_1 \dots D.M_n) \text{ЕСЛИ } (frag) \text{ и } (D.A_i \text{ и } \dots \text{ и } D.A_j) \text{ ТО } D.B_k,$$

где D – дескриптор ситуации.

Данный дескриптор ссылается на паспорт ситуации, содержащий всю информацию, требуемую для работы правила. Пример паспорта ситуации для правила «проверка сетевой доступности тестового устройства» приведен на рис. 3.



Рис. 3. Пример паспорта ситуации

Предлагается использовать модифицированный формат продукционного правила. Для формализации знаний о предметной области и их представления в заданном формате используется модель «конструктор», предложенная в работе [3]. В рамках такой модели проектирование осуществляется в соответствии со стратегией «сверху - вниз». При этом вводится четыре уровня проектирования (рис. 4).

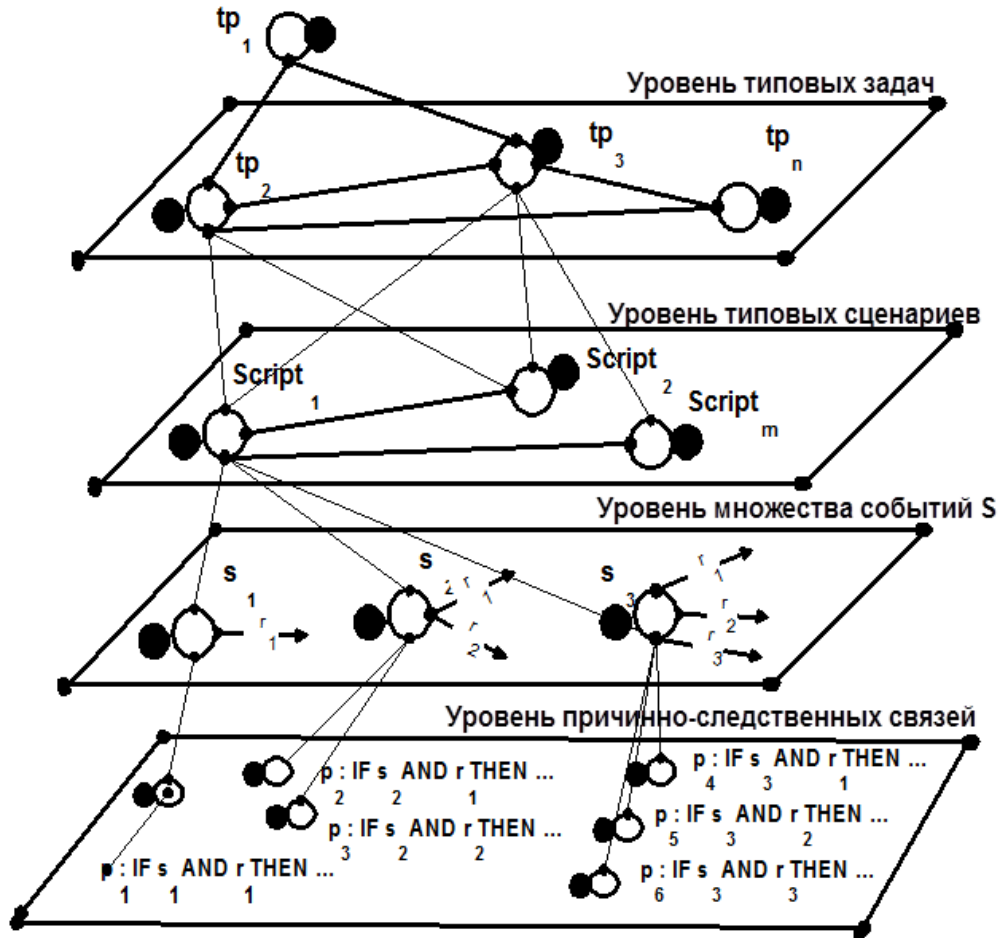


Рис. 4. Модель конструктор

Уровень типовых задач описывает набор обособленных подзадач, требующих решения для решения глобальной задачи. Уровень типовых сценариев описывает множество сценариев, позволяющих решать типовые задачи. Уровень событий описывает объекты управления и их параметры, необходимые работы сценариев. Уровень причинно-следственных связей содержит набор продукционных правил, являющихся основой для вышестоящих уровней. В результате проектирование интеллектуального модуля разбивается на следующие этапы.

В качестве первого шага строится множество типовых задач в предметной области. Совокупность элементов типовых задач образует класс, которому в абстрактной модели соответствует родовой объект «Типовая задача». Далее между элементами класса устанавливаются горизонтальные, вертикальные и причинно-следственные связи. Следующим шагом является построение для каждой типовой задачи множества типовых сценариев ее решения. Для этого производится декомпозиция предметной области на элементы порождающего сценарии множества событий. При этом каждая типовая задача рассматривается отдельно, что позволяет упростить анализ и формализацию. Пересечения на уровне типовых сценариев или типовых событий искусственно убираются за счет дублирования объектов пересечения.

После проектирования сценарной части осуществляется формирование ситуационных портретов. Для этого целесообразно использовать стратегию «снизу - вверх». При этом в ка-

честве первого шага осуществляется проектирование СП для элементов порождающего сценарии множества событий. Затем генерируются ситуационные портреты для типовых сценариев и, наконец, ситуационные портреты для типовых задач.

Для автоматизации формирования ситуационной части предлагается использовать алгебру ситуационных портретов. Этот аппарат позволяет автоматизировать процесс формирования СП для порождающего сценарии множества событий, сценариев, типовых задач.

На заключительном этапе происходит переход от концептуального описания к машинно-ориентированному. При этом сценарии отображаются в базу правил продукции, а состояния в базу фактов.

Экспериментальная часть

Проиллюстрируем применение данного подхода проектированием фрагмента базы знаний (БЗ), описывающей одну из типовых задач системы поддержки автоматического тестирования. На первом шаге проектирования модели СИП САТПК выделим множество типовых задач, которые решаются в рассматриваемой предметной области $TP = \{tp_1, tp_2 \dots tp_n\}$.

Рассмотрим типовые задачи, возникающие при поддержке САТПК.

Таблица 1

Типовые задачи

Типовая задача
Управление состоянием парка тестовых и служебных машин
Управление конфигурацией тестов
Управление запуском набора тестов
Управление процессом исполнения тестов
Управление процессом сохранения тестовых результатов
Автоматический анализ тестовых результатов и связь их с системой учета ошибок
Анализ статистики запусков и генерация рекомендаций по оптимизации тестирования
Генерация новых правил и знаний

На втором шаге требуется выделить набор событий, составляющих сценарий решения типовой задачи. В таблице представлены события, из которых формируется обобщенный сценарий анализа состояния тестового устройства.

Таблица 2

События для типовой задачи «контроль состояния тестового устройства»

Обозначение параметра	Описание события в рассматриваемой предметной области	Количество исходов
s_1	Состояние тестового устройства неизвестно	1
s_2	Тесты исполняются на устройстве?	2
s_3	Тестовое устройство отвечает на сетевые запросы?	2
s_4	Тестовые результаты доступны?	2
s_5	Причины падения тестов?	4
s_6	Доступность в СНИ?	2
s_7	Клиент СНИ настроен корректно?	2
s_8	Причина недоступности устройства в СНИ?	5

На следующем шаге осуществляется ранжирование событий, для чего:

- на первом этапе ранжируются исходы в соответствии с вероятностью его наступления на основе статистики предыдущих запусков автоматизированных тестов (табл. 3);

- на втором этапе ранжируются события в соответствии с статистическим критерием, вычисляемым как сумма вероятностей возможных исходов (табл. 4).

Таблица 3

Вероятность возникновения исходов

Обозначение состояния	Описание состояния	Вероятность возникновения
sr_1	Тестовые результаты доступны, целевое состояние.	89,10%
sr_2	Недостаточный уровень привилегий.	0,09%
sr_3	Некорректное окружение.	0,18%
sr_4	Недоступны сетевые диски.	0,04%
sr_5	Проблема СНИ.	0,13%
sr_6	Не отвечает на сетевые запросы.	2,67%
sr_7	Клиент СНИ сконфигурирован, но не исполняется.	0,09%
sr_8	Клиент СНИ не сконфигурирован.	0,03%
sr_9	Отключен пользователем.	0,89%
sr_{10}	Отключен из-за проблем с ресурсами.	0,53%
sr_{11}	Идет процесс зеркалирования.	1,78%
sr_{12}	Идет тест, требующий эксклюзивного доступа к устройству.	4,46%

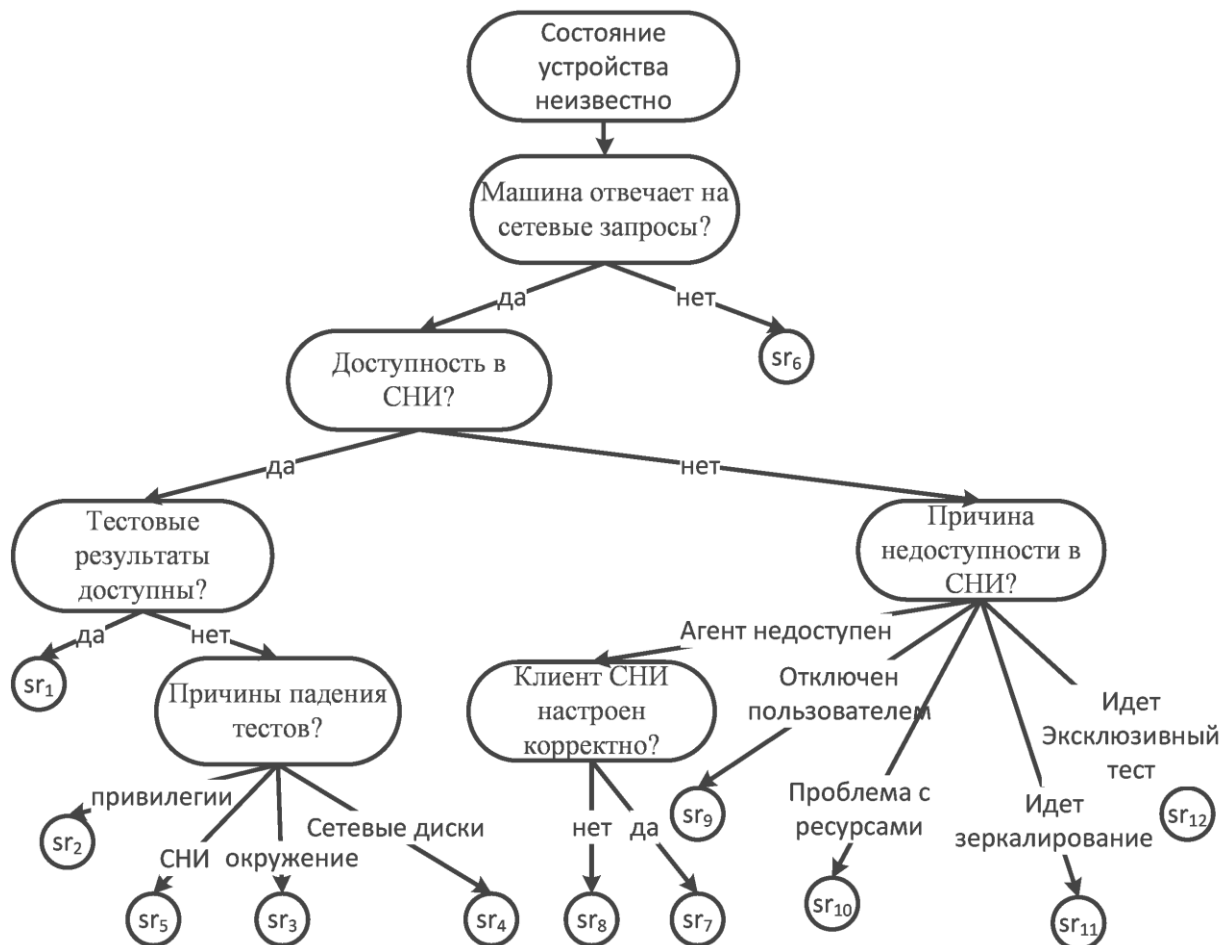


Рис. 5. Сценарий «анализ состояния тестового устройства»

Таблица 4

Вероятность успешного применения события

Обозначение параметра	Описание (параметра объекта) в рассматриваемой предметной области	Вероятность события
s_1	Состояние тестового устройства неизвестно	100%
s_2	Тесты начинают исполнение на устройстве?	89,55%
s_3	Тестовое устройство отвечает на сетевые запросы?	100%
s_4	Тестовые результаты доступны?	89,10%
s_5	Причины недоступности тестовых результатов?	0,44%
s_6	Доступность в СНИ?	100%
s_7	Клиент СНИ настроен корректно?	0,12%
s_8	Причина недоступности устройства в СНИ?	7,63%

Строится дерево сценария в соответствии с приоритетом событий (рис. 5).

На следующем этапе создаем правила в формате системы CLIPS:

(defrule check-ci-agent “Клиент СНИ настроен корректно?”

(pool-monitoring)

(measure1 first)

(not (repair ?))

=> measure1 second

(if ci-agent-is-configured

then (repair start-ci-agent)

else (repair configure-ci-agent))

Результаты

Предложена модифицированная продукционная модель описания процессов в предметной области функционирования САТПК. Разработано ядро инструментального комплекса поддержки процесса автоматизированного тестирования на всех этапах ЖЦ. Полученные результаты позволили перейти к новой архитектуре, в которой средства интеллектуальной поддержки дополняют инженеров, что позволяет:

- повысить качество анализа тестовых результатов,
- снизить требования к квалификации персонала,
- сократить время затрачиваемое на поддержку автоматического тестирования.

Перспективы дальнейшего развития:

- автоматизация процедуры выделения новых знаний и их представления в машинно-ориентированном виде, а также их верификации [4–6];
- доработка инструментального комплекса – скелетной оболочки поддержки системы АТПК.

Библиографический список

1. A Tool for Building Expert Systems: [электронный ресурс]: URL: <http://clipsrules.sourceforge.net/> (дата обращения 21.09.2014)
2. Лорьер, Жан-Луи. Системы искусственного интеллекта // Курьер. 1991. С. 379–400.
3. Мисевич, П.В. Сценарно-ситуационный подход к проектированию средств интеллектуальной поддержки процесса функционирования автоматических систем // Системы управления и информационные технологии. 2007. №2.1(28). С. 166–171.

4. **Милов, В.Р.** Программный комплекс автоматизированной верификации реализаций протокольных объектов / В.Р. Милов [и др.] // Системы управления и информационные технологии. 2014. №4 (58). С. 35–41.
5. **Баранов, В.Г.** Имитатор передачи сообщений автоматического зависимого наблюдения для управления воздушным движением / В.Г. Баранов [и др.] // Системы управления и информационные технологии. 2014 №3.0 (57). С. 49–53.
6. **Белов, Д.А.** Проблемно-ориентированная автоматизированная система мониторинга движения железнодорожного состава / Д.А. Белов, П.В. Мисевич, В.П. Хранилов // Автоматизация в промышленности. 2009. №2. С. 49–51.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

V.A. Lazarev

TOOLS DESIGN METHODOLOGY FOR INTELLECTUAL SUPPORT OF AUTOMATED SOFTWARE TESTING SYSTEM

«Intel CJSC », Nizhny Novgorod

Purpose: Growth of test automation systems highlights need in support automation for them.

Design/methodology/approach: The paper introduces new architecture of software testing system containing intellectual support module. It provides methodology for analysis of object domain and developing the intellectual module built on production knowledge base with modified format of rules. «Constructor» model is used as design approach.

Findings: It is possible, to apply quality of tests automation systems by introducing of intellectual support module.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the area of automated knowledge detection, formalization and verification.

Originality/value: Presented approach allows improve quality of tests analysis, reduces time needed for test cycle execution and decreases requirements for test engineer qualification.

Key words: intellectual support, production model, automated testing, “Constructor” model.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791.01

К.Б. Конищев¹, Б.П. Конищев²

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева²

Рассматривается влияние химического состава конструкционных сталей на образование горячих трещин при сварке. Рассматривается отрицательное влияние серы, углерода, фосфора и других элементов на образование горячих трещин при сварке конструкционных сталей. Приводится сравнительная оценка сопротивляемости некоторых марок низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей по параметру Итамуре HCS, критерию UCS европейского стандарта и эквиваленту углерода $C_{эг}$. Показано, что наиболее достоверную оценку дает эквивалент углерода $C_{эг}$. Дана оценка сопротивляемости высоколегированных сталей горячим трещинам по соотношению эквивалентов хрома $[Cr]_э$ и никеля $[Ni]_э$.

Ключевые слова: сульфидная эвтектика, ликвация серы, зональная неоднородность, температурный интервал хрупкости, сопротивляемость горячим трещинам, параметр Итамуре HCS, европейский критерий UCS, эквивалент углерода на горячие трещины $C_{эг}$, эквиваленты хрома и никеля.

Важным показателем хорошей свариваемости сталей является сопротивляемость этих сталей образованию горячих трещин при сварке. Горячие трещины образуются на завершающей стадии кристаллизации металла в ТИХ (температурном интервале хрупкости) при низкой пластичности металла.

Образование горячих трещин определяется следующими факторами:

1. Величиной температурного интервала хрупкости ТИХ.
2. Значением минимальной пластичности металла δ_{\min} .
3. Темпом внутренней деформации $\alpha_{вн}$.

Чем больше темп внутренней деформации $\alpha_{вн}$, тем больше возможность образования горячих трещин. Темп внутренней деформации зависит от формы, размеров и жесткости конструкции. Наибольший темп внутренней деформации будет при сварке конструкций малой и большой жесткости. Наименьший темп внутренних деформаций будет при сварке конструкций средней жесткости. Чем больше минимальная пластичность стали δ_{\min} в ТИХ, тем больше сопротивляемость стали образованию горячих трещин. Чем меньше величина температурного интервала хрупкости $\Delta T_{хр}$, тем больше сопротивляемость стали образованию горячих трещин.

Величина температурного интервала хрупкости $\Delta T_{хр}$ и значение минимальной пластичности металла δ_{\min} зависят от химического состава стали, от содержания вредных и полезных элементов. Наиболее вредным элементом в сталях, вызывающих горячие трещины является сера.

Сера обладает неограниченной растворимостью в жидком железе и весьма малой растворимостью в твердом. Сера образует с железом легкоплавкий сульфид железа FeS с температурой плавления $T_{пл}=1190^{\circ}\text{C}$ и более легкоплавкую сульфидную эвтектику Fe-FeS с температурой плавления $T_{пл}=985^{\circ}\text{C}$.

При затвердевании металла сварочной ванны в результате избирательного процесса ее кристаллизации легкоплавкие сульфиды и сульфидная эвтектика оттягивается вглубь жидкой фазы и затвердевает при более низких температурах, сосредотачиваясь по границам столбчатых кристаллов в виде жидких прослоек, имеющих в температурном интервале хрупкости очень низкую пластичность. Наибольшее количество серы сосредотачивается в центральной части шва, в месте стыка кристаллов, образуя зональную ликвацию, где чаще образуются горячие трещины.

Вторым по вредности элементом, вызывающим горячие трещины, является углерод, расширяющим $\Delta T_{хр}$ и снижающим δ_{min} , менее вредными элементами являются фосфор, кремний, никель, медь.

Полезными элементами являются Mn, Ti и другие элементы, образующими тугоплавкие сульфиды и снижающими $\Delta T_{хр}$.

Для предупреждения горячих трещин ограничивают содержание серы в основном металле. По содержанию серы стали делятся на 4 группы: стали обыкновенного качества Ст2сп, Ст3сп, содержащие $S \leq 0,05\%$, качественные стали 15, 20, содержащие $S \leq 0,04\%$, высококачественные стали 23Г2А, содержащие $S \leq 0,035\%$, особокачественные стали 20Г-Ш, содержащие $S \leq 0,02\%$. Еще больше ограничивают серу в сварочных проволоках: Св-08 $S \leq 0,04\%$, Св-08А $S \leq 0,03\%$, Св-08АА $S \leq 0,02\%$. Содержание серы в металле шва снижают также за счет применения сварочных флюсов и электродных покрытий, обеспечивающих рафинирование металла – перевод серы из металла в основной шлак, содержащий оксиды CaO и MgO.

Эффективным способом борьбы с горячими трещинами является применение низкоуглеродистых сварочных проволок, содержащих 0,08% углерода и ниже.

Для оценки сопротивляемости конструкционных сталей образованию горячих трещин в зависимости от их химического состава применяют расчетно-статистические методы, основанные на использовании уравнений на основе анализа экспериментальных данных. Одно из параметрических уравнений (по Итамуре) применительно к низколегированным сварным швам имеет вид [1]

$$HCS = \frac{1000C(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100})}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

Если $HCS > 4$, то сварные швы потенциально склонны к горячим трещинам для сталей с пределом прочности менее 700 МПа. Для сталей с пределом прочности более 700 МПа допустимое значение HCS составляет 1,6-2,0.

В табл. 1 приведены значения HCS для 20 марок конструкционных сталей, рассчитанные по этому уравнению. Все стали, приведенные в этой таблице, потенциально склонны к горячим трещинам, так как $HCS > 4$. Однако в марочнике сталей [2] свариваемость этих сталей оценивается как хорошая, и они считаются не склонными к горячим трещинам. Практика применения этих сталей в производстве также показывает, что они не склонны к горячим трещинам при сварке.

По европейскому стандарту EN 1011-2:2001 «Рекомендации по сварке металлических материалов» при дуговой сварке ферритных (углеродистых и низколегированных) сталей ре-

комендуется оценивать опасность образования горячих трещин в сварных швах по соотношению [1]:

$$UCS=230C+190S+75P+45Nb-12,3Si-5,4Mn-1.$$

Таблица 1

Показатели сопротивляемости сталей образованию горячих трещин

Сталь	HCS	UCS	C _{эГ} , %
Ст2сп	8,75	39,61	0,31
Ст3сп	10,27	54,9	0,38
8	5,43	28,76	0,26
10	6,19	33,36	0,28
15	8,01	44,86	0,33
20	10,01	56,36	0,38
15Г	5,00	42,02	0,32
15Х	5,098	41,34	0,31
20Х	5,94	52,304	0,36
20Г	6,39	53,52	0,37
15ГС	4,41	28,455	0,35
16ГС	4,89	35,54	0,35
17ГС	4,53	40,285	0,36
15ХФ	4,93	41,34	0,31
18ХГТ	4,39	50,68	0,36
20ХГВ	5,2	53,52	0,37
20ХМ	4,62	18,97	0,38
20ХН	6,54	38,24	0,38
10ХСНД	6,36	57,44	0,38
15ХСНД	7,49	52,84	0,398

Значение UCS<10 соответствует высокой сопротивляемости образованию горячих трещин, а при UCS>30 – низкой сопротивляемости горячим трещинам.

В табл. 1 приведены значения UCS, рассчитанные по этому уравнению для 20 марок сталей. Для большинства сталей UCS>30, т.е. они склонны к горячим трещинам, что не соответствует практике применения этих сталей в производстве.

В работе [3] оценка сопротивляемости конструкционных сталей против образования горячих трещин производится по эквиваленту углерода:

$$C_{эГ}=C+2S+P/3+(Si-0,4)/10+Ni/12+Cu/15.$$

Если C_{эГ} > 0,4%, сталь склонна к горячим трещинам, влияние Si учитываем только при Si > 0,4%.

Результаты расчета по этому уравнению в табл. 1 показывают, что все стали не склонны к горячим трещинам, что хорошо соответствует данным марочника сталей [2] и практике применения этих сталей в производстве.

Сталь Ст4сп склонна к горячим трещинам, так как для нее $C_{gr}=0,428\%>0,4\%$. Сталь 25 при содержании углерода $C=0,25\%$ не склонна к горячим трещинам, так как для неё $C_{gr}=0,377\%<0,4\%$, а при максимальном содержании в ней углерода $C=0,3\%$ становится склонной к горячим трещинам, так как $C_{gr}=0,437\%>0,4\%$. Трубные стали 16ГС, 17ГС, 10ХСНД, 15ХСНД не склонны к горячим трещинам.

Сера образует с никелем более легкоплавкие соединения, чем с железом: сульфид никеля Ni_3S_2 с $T_{пл} = 787^\circ C$ и сульфидную эвтектику $Ni-Ni_3S_2$ с $T_{пл} = 644^\circ C$. Поэтому аустенитные высоконикелевые стали очень склонные к горячим трещинам.

Сопротивляемость высоколегированных сталей, образованию горячих трещин оценивается по соотношению эквивалентов хрома $[Cr]_Э$ и никеля $[Ni]_Э$ [1, 3].

Таблица 2

Оценка сопротивляемости высоколегированных сталей, образованию горячих трещин

Марка стали	$Cr_Э, \%$	$Ni_Э, \%$	$Cr_Э/Ni_Э$
14X17H2	16,85	5,6	3,67
08X17H5Б3	19,6	8,45	2,4
08X17H6T	15,9	9,5	1,81
20X13H4Г9	15,2	12,45	1,59
12X21H5T	22,2	10,4	2,43
08X21H6M2T	29,2	8,8	3,35
08X18Г8H2T	22,7	9,7	2,95
03X22H6M2	27,6	7,9	3,57
37X12H8Г8MФБ	20	25,75	0,84
10X14Г14H4T	17,7	15	1,47
08X17H13M2T	23,4	18,4	1,21
12X18H9T	19,9	14,6	1,44
08X18H10T	19,9	14,4	1,42
12X18H10T	20,9	15,6	1,41
06X18H11	18,9	13,8	1,46
12X18H12T	20,9	16,6	1,32
20X2 3H18	24,2	25	1,05
20X25H20C2	29,5	26,75	1,19
10X11H20T3P	31,3	23,9	1,01
13X11H2B2MФ	17,5	4,59	3,43

Эквивалент хрома рассчитывается по зависимости [3]:

$$[Cr]_Э = Cr + 1,5Si + 2Mo + 5Ti + 2Nb + 1,5W + 2Al + V.$$

Эквивалент никеля рассчитывается по зависимости [3]:

$$[Ni]_Э = Ni + Co + 0,5Mn + 30C + 30N + 0,3Cu.$$

При соотношении $Cr_3/Ni_3 < 1,5$ стали склонны к горячим трещинам, при $Cr_3/Ni_3 > 1,5$ не склонны. В табл. 2 приведены значения эквивалентов хрома и никеля и их соотношение. Стали, для которых $Cr_3/Ni_3 > 1,5$, склонны к горячим трещинам. На рис. 1 приведена диаграмма Шеффлера.

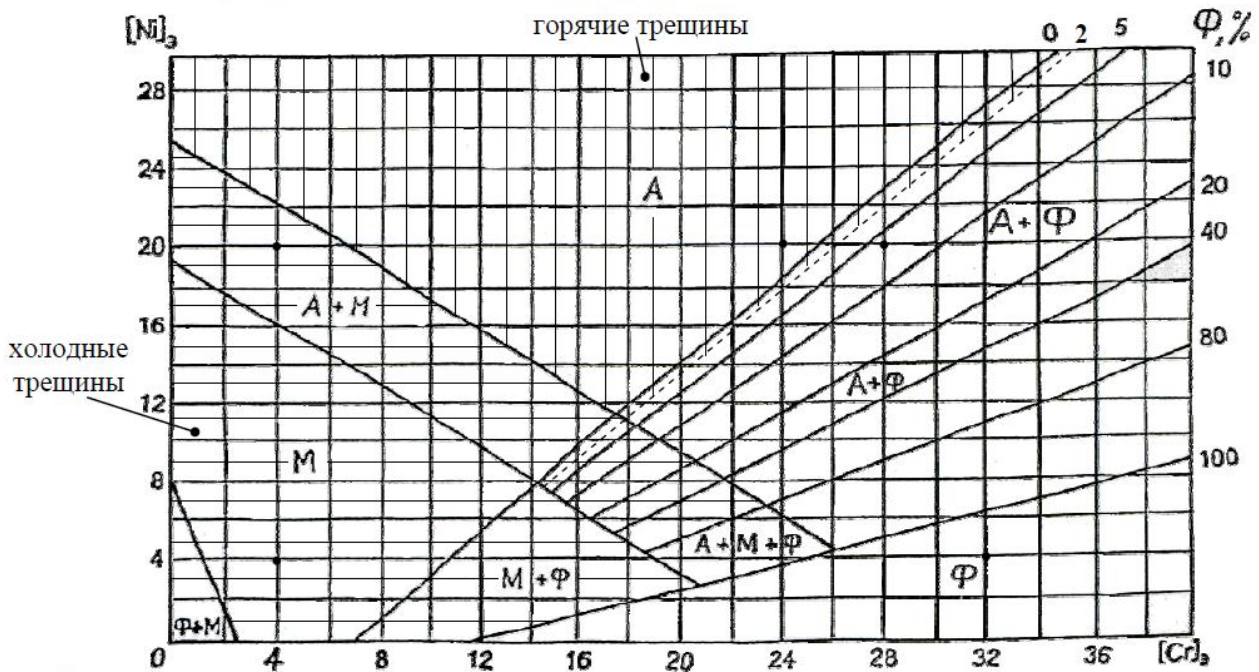


Рис. 1. Диаграмма Шеффлера:
А – аустенит; Ф – феррит; М - мартенсит

По диаграмме Шеффлера может быть ориентировочно установлена структура стали при определенных содержаниях эквивалентов хрома и никеля. К образованию горячих трещин склонны стали, имеющие на диаграмме чисто аустенитную структуру или структуру А+Ф при содержании Φ до 2%.

Высоколегированные стали более подвержены образованию горячих трещин, чем конструкционные стали. Это объясняется более вредным влиянием серы, а также сильно развитой транскристаллитной направленной первичной микроструктурой, увеличенной литейной усадкой кристаллизующего металла, более значительной величиной темпа внутренней деформации. Эффективным способом борьбы с горячими трещинами является легирование металла шва элементами ферритизаторами и получение в шве двухфазной аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита 2–7%.

Библиографический список

1. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2-х т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 624 с.
2. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под общей ред. А.С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Оценка стойкости металла шва против образования горячих трещин при сварке: метод. указания к лаб. работе 11 по курсу «Теория сварочных процессов» для студентов специальностей 150701, 151701 и др. всех форм обучения / НГТУ; сост.: Б.П. Конищев. – Н. Новгород, 2012. – 12 с.

Дата поступления
в редакцию 22.04. 2015

К.В. Konishchev¹, В.Р. Konishchev²

STRUCTURAL AND HIGH-ALLOY STEEL RESISTANCE EVALUATION FOR HOT CRACKING DURING WELDING

“Gazprom VNIIGAZ LLC”, Moscow¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: To examine the impact of chemical structural steels to hot cracking during welding. To examine the negative impact of sulfur, carbon, phosphorus and other elements on the hot cracking during welding of structural steels. To evaluate resistance to hot cracking high-alloy steels by the ratio of equivalents of chromium $[Cr]_e$ and nickel $[Ni]_e$.

Methodology: The comparative assessment of the resilience of some brands of low-carbon and low-alloy structural steels in the parameter Itamura-HCS, UCS-european criterion standard and equivalent carbon (carbon equivalent hot crack).

Findings: It is shown that the most reliable estimate gives the equivalent carbon (carbon equivalent hot crack).

Key words: sulfide eutectic segregation of sulfur zonal heterogeneity, the temperature interval of brittleness, resistance to hot cracking parameter Itamura HCS, European criteria UCS, the equivalent carbon (carbon equivalent hot crack). Chromium and nickel equivalents.

УДК 621.9-114.003.13

Д.С. Пахомов, Т.Н. Гребнева

ОСОБЕННОСТИ НОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен новый подход к нормированию времени операции, выполняемой на станках с ЧПУ. Представлена блок-схема расчета нормы штучного времени.

Ключевые слова: нормирование операций, станки с ЧПУ, время цикла станка, хронограмма, норма штучного времени, вспомогательное время, подготовительно-заключительное время.

В связи с возрастающим парком станков с ЧПУ на отечественных предприятиях необходимо правильно нормировать затраты времени оборудования и оператора при обработке деталей на данных станках. Затраты времени оборудования определяются временем его работы без участия оператора за время цикла и зависят от степени его автоматизации. Затраты времени оператора определяются приемами, которые он выполняет за время цикла. При этом приемы, которые выполняет оператор, могут быть совмещены или выполняться последовательно с автоматической работой станка. Также оператор может обслуживать один или несколько станков с ЧПУ.

На станках с ЧПУ согласно ГОСТ 23004 [1] «Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении», используются и могут совмещаться следующие методы выполнения технологической операции или ее части: кооперированно-ручной метод, автоматизированно-ручной метод, автоматизированный метод, автоматический метод.

Для первых трех из указанных методов *цикл выполнения операции* ($T_{ц}$), состоит из действий станка (ДС) и действий оператора (ДО) и определяется интервалом календарного времени от начала до конца периодически повторяющейся технологической операции независимо от числа одновременно изготавливаемых деталей. Также при нормировании необходимо учитывать, что время цикла станка может быть постоянным и плавающим. *Постоянный цикл* возможен только при полной автоматизации работ по программе, без каких либо изменений и очень высокой надежности процесса. *Плавающий цикл* имеет определенный диапазон колебания из-за непостоянства действий оператора и возможных изменений, которые могут быть внесены в процессе цикла работы станка, а также случайных факторов, приводящих к прерыванию цикла обработки. Поэтому перед началом нормирования необходимо составлять хронограмму цикла обработки детали на станке и только после этого приступать к технологическому нормированию времени операции.

При производстве деталей на станках с ЧПУ устанавливают норму времени на одну деталь. Норма времени на одну деталь в соответствии с ГОСТ 3.1109 [2], состоит из следующих частей:

- нормы штучного времени ($T_{н.шт}$);
- нормы подготовительно-заключительного времени ($T_{н.п.з}$).

Норму подготовительно-заключительного времени составляют время на подготовку средств производства и рабочего к выполнению технологической операции и время на приведение их в первоначальное состояние после окончания технологической операции.

Норма подготовительно-заключительного времени включает:

$$T_{н.п.з} = T_{п.з.орг.} + T_{п.з.н.} + T_{п.з.п.обр.} \quad (1)$$

где $T_{п.з.орг}$ – время на организационную подготовку, которое предусматривает: получение наряда, получение и сдачу (после обработки партии деталей) чертежа, технологической документации, программоносителя, режущего, вспомогательного и контрольно-измерительного инструмента, приспособления, доставку заготовок к станку, ознакомление с выполняемой работой, чертежом, технологической документацией, инструктаж мастера и др.

$T_{п.з.н.}$ – время на наладку станка, которое предусматривает: установку и снятие крепежного приспособления и режущих инструментов; установку программоносителя в считывающее устройство и снятие его; программирование непосредственно на рабочем месте; настройку нулевого положения, режимов обработки и др.

$T_{п.з.п.обр}$ – время на пробную обработку деталей по программе, которое предусматривает: время обработки детали по программе, время на выполнение приемов, связанных с измерением детали, вычислением коррекции, введением величин коррекции в систему ЧПУ, и вспомогательные приемы управления станком и системой ЧПУ и др.

Рассмотренные составляющие времени $T_{н.п.з}$ могут выполняться оператором или наладчиком или могут быть автоматизированными при соответствующем уровне автоматизации работ.

Штучное время – интервал времени, равный отношению цикла технологической операции к числу одновременно изготавливаемых деталей:

$$T_{шт} = T_{ц} / N_{од}, \quad (2)$$

где $N_{од}$ – число одновременно изготавливаемых деталей за время цикла, шт.;

$T_{ц}$ – цикл технологической операции, мин.

Норма штучного времени - норма времени на выполнение объема работы, равной единице нормирования, при выполнении технологической операции.

Норма времени на одну деталь (штуку) с учетом подготовительно-заключительного времени равна:

$$T_{н.шт} = T_{ц} / N_{од} + T_{н.п.з} / N_{п}, \quad (3)$$

где $N_{п}$ – число деталей в партии запуска, шт.

Эту норму времени принято называть штучно-калькуляционное время, однако в ГОСТ 3.1109 [1] нет такого понятия и определения.

При обработке деталей на станках с ЧПУ возможны следующие варианты:

- за время цикла обрабатывается одна деталь;
- за время цикла обрабатывается несколько деталей одновременно;
- за время цикла обрабатывается несколько деталей, установленных в разных приспособлениях (то есть цикл рассчитан на несколько установок детали), но со станка снимается только одна готовая деталь.

При первом и третьем вариантах $N_{од} = 1$ получается, что $T_{шт} = T_{ц}$ и тогда норма времени на одну деталь:

$$T_{н.шт} = T_{шт} + T_{н.п.з} / N_{п}. \quad (4)$$

Норма времени на операционную партию:

$$T_{н. парт} = T_{шт} \cdot N_{п} + T_{н.п.з}. \quad (5)$$

Норма штучного времени согласно ГОСТ 3.1109 [1] состоит из следующих составляющих: t_o – основное время t_v – вспомогательное время $t_{обс}$ – время обслуживания рабочего места, $t_{пот}$ – время на личные потребности.

$$T_{шт} = t_o + t_v + t_{обс} + t_{пот}. \quad (6)$$

Тогда при нескольких одновременно обрабатываемых деталях формула (4) примет вид:

$$T_{\text{н.шт}} = (t_o + t_v + t_{\text{обс}} + t_{\text{пот}}) / N_{\text{од}} + T_{\text{н.п.з}} / N_{\text{п}}. \quad (7)$$

В соответствии с ГОСТ 23004 [1] штучное время состоит из следующих времен: ручного, кооперированно-ручного, неперекрытого ручного, машинно-ручного, полного ручного, неперекрытого машинного, полного машинного управления, периодического управления, непрерывного управления.

Рассмотрим подробнее, из каких затрат времени при обработке детали на станке с ЧПУ состоит каждая из составляющих штучного времени, дифференцируя их на затраты времени работы станка по программе и затраты времени, которые связаны с выполнением приемов оператором. Для этого используем справочную и специальную литературу, определения ГОСТ [1, 2], а также производственные наблюдения, которые выполнялись на участке многооперационных станков с ЧПУ.

Норма основного времени t_o это норма времени на достижение непосредственно цели данной технологической операции или перехода по качественному и (или) количественному изменению предмета труда. Данная норма времени для станков с ЧПУ является **машинным временем** ($t_{\text{о.м.а}}$).

Данное время составляет сумму выполнения различных переходов, которые могут выполняться *последовательно, параллельно, последовательно-параллельно*.

По существу основное время состоит из времени резания и времени движения на рабочей подаче без изменения свойств поверхности:

$$t_{\text{о.м.а}} = \sum_i^I (t_{\text{рези}} + t_{\text{xi}}), \quad (8)$$

где $t_{\text{рези}}$ – время резания i -го инструмента, мин;

t_{xi} – время движения на рабочей подаче i -го инструмента без осуществления процесса резания, мин.

В данном случае есть некоторое отклонение от формулировки ГОСТ[1], так как в течение времени движения на рабочей подаче t_x не осуществляется качественного и количественного изменения предмета труда.

Для станков с ЧПУ это время выполняется по программе, и в соответствии с ГОСТ [1] является *неперекрытым машинным временем*. Но для некоторых типов современных станков с ЧПУ данное время может быть перекрываемым *машинным временем*, например, при обработке деталей на двухшпиндельном станке с ЧПУ с возможностью параллельной работы двумя инструментальными головками.

Вспомогательное время t_v - это часть штучного времени, затрачиваемая на выполнение приемов, необходимых для обеспечения изменения и последующего определения состояния предмета труда. Вспомогательное время может быть *ручным, кооперированно-ручным, машинным, или машинно-ручным*, а также *перекрываемым или неперекрываемым* [2].

Норма вспомогательного времени - норма времени на осуществление действий, создающих возможность выполнения основной работы, являющейся целью технологической операции или перехода.

Разделим это время на время вспомогательной машинной работы станка $t_{\text{в.м}}$ (по программе) и время простоя станка, связанное с действиями оператора $t_{\text{в.оп}}$:

$$t_v = t_{\text{в.м}} + t_{\text{в.оп}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{в.м}}$ – время вспомогательное машинной работы станка, мин;

$t_{\text{в.оп}}$ – время вспомогательное, связанное с действиями оператора за время цикла, мин.

Время машинной вспомогательной работы станка состоит из следующих составляющих:

$$t_{в.м} = \sum t_{уст} + \sum t_{х.х} + \sum t_{зам} + \sum t_{контр} / Z_k + \sum t_{уп}, \quad (10)$$

где $t_{уст}$ – время установки, закрепления и раскрепления, снятия детали, или деталей (это время может быть совмещено со временем обработки, если например, на станке есть сменный стол), мин;

$t_{х.х}$ – время холостых ходов включает: перемещение рабочих органов станка на ускоренной подаче, поворот стола, на котором закреплена заготовка, перемещение спутника на станок, подвод датчика касания и др., мин;

$t_{зам}$ – время, затрачиваемое на замену инструмента из инструментального магазина в шпиндель и обратно, поворот резцедержателя и т.д., мин;

$t_{контр}$ – время, затрачиваемое на контрольные измерения обрабатываемых поверхностей, подлежащих контролю на рабочем месте, мин. Включает: очистку обрабатываемых поверхностей перед измерением, снятие заусенцев, осмотр детали, измерение. Это время может быть включено во время машинной работы станка по программе за счет применения измерительных головок (при активном контроле данное время может быть перекрываемым), или совмещено со временем обработки, если поверхности контролируются после снятия детали со станка. Если измерение производится через определенное число деталей Z_k , то норма времени на деталь будет составлять: $t_{контр} / Z_k$.

$t_{уп}$ – время управления станком (по программе, упорам и т.д.): включение и выключение шпинделя и охлаждения, технологические паузы и т.д.

Вспомогательное время простоя станка, связанное с действиями оператора $t_{в.оп}$ за время цикла, состоит из таких же составляющих, только выполняемых оператором. Вспомогательное время может выполняться полностью автоматически по программе, а может частично совмещать действия, выполняемые оператором, с действиями, выполняемыми программой, что в основном зависит от конструкции и особенностей конкретного станка, степени его автоматизации, количества суппортов или инструментальных головок, рабочих позиций и т.д.

Сумма норм основного и не перекрываемого им вспомогательного времени составляет *норму оперативного времени*. Определение нормы оперативного времени, возможно, только путем составления хронограммы, отражающей неперекрываемые действия оператора $t_{в.оп.н}$ и неперекрываемой машинной работой станка $t_{м.а.н}$, и с учетом времени их перекрытия (t_n) (рис. 1).

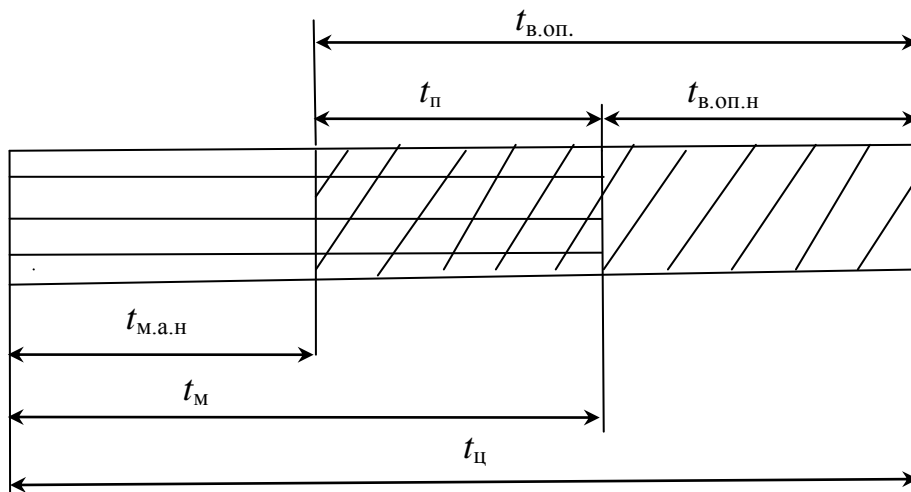


Рис. 1. Пример хронограммы для определения составляющих оперативного времени при перекрытии времени машинной работы и времени затрачиваемого оператором $t_{в.оп}$

Время обслуживания рабочего места $t_{\text{обс}}$ – это часть штучного времени, затрачиваемая исполнителем на поддержание средств технологического оснащения в работоспособном состоянии и уход за ними и рабочим местом. Время $t_{\text{обс}}$ определяется суммой времен

$$t_{\text{обс}} = t_{\text{техн. обс}} + t_{\text{орг. обс}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{техн. обс}}$ – время технического обслуживания, мин;

$t_{\text{орг. обс}}$ – время организационного обслуживания, мин.

Время организационного обслуживания аналогично подготовительно-заключительному времени, но затрачиваемому в течение смены.

Время технического обслуживания можно разложить на следующие составляющие:

$$t_{\text{техн. обс}} = t_{\text{см}} + t_{\text{под}} + t_{\text{струж}}, \quad (12)$$

где $t_{\text{см}}$ – время на смену инструмента вследствие потери им режущих свойств, отнесенное к одной детали, включая и время настройки инструмента на размер, составит: $t_{\text{см}} / Z_{\text{T}}$, где Z_{T} – число деталей, обработанных до замены инструмента, шт.;

$t_{\text{под}}$ – время подналадки режущего инструмента, связанное с износом режущей части, мин. Под *подналадкой* понимается дополнительная регулировка технологического оборудования и (или) технологической оснастки при выполнении технологической операции для восстановления достигнутых при наладке значений параметров. *Время подналадки* включает: осмотр инструмента, подналадку (если инструмент регулируемый) или введение коррекции на размер в устройстве ЧПУ, правку режущей кромки абразивным бруском и др.

Время подналадки, отнесенное к одной детали составит:

$$t_{\text{под}} / Z_{\text{под}}, \text{ или } (t_{\text{под}} / Z_{\text{T}}) \cdot m,$$

где $Z_{\text{под}}$ – число деталей, обработанных до подналадки;

m – число (плановых) подналадок до замены инструмента (если число подналадок не регламентировано, то m – будет величина случайная). Время подналадки включает: осмотр инструмента, подналадку (если инструмент регулируемый) или введение коррекции на размер в устройстве ЧПУ, заправка режущей кромки абразивным бруском и др.;

$t_{\text{струж}}$ – время на сметание и периодическую уборку стружки в процессе работы;

$t_{\text{орг. обс}}$ – время организационного обслуживания, мин. Это время аналогичное подготовительно-заключительному времени, но затраченное в течение смены. Поэтому для его определения необходимо делить его значение на количество деталей, изготавливаемых в течение смены: $t_{\text{орг. об}} / Z_{\text{дет см}}$.

Время организационного обслуживания должно входить в дополнительное время, а время технического обслуживания – во время цикла.

Время на личные потребности $t_{\text{пот}}$ – часть штучного времени, затрачиваемая оператором на личные потребности и, при утомительных работах, на дополнительный отдых. При варианте полной автоматизации работы оборудования составляющую штучного времени $t_{\text{пот}}$ не нормируют.

Нормы времени $t_{\text{орг. обс}}$ и $t_{\text{пот}}$ обычно определяют по нормативам в процентах от оперативного времени, т.е. в этом случае получается, чем больше оперативное время, тем больше необходимо времени на личные потребности и отдых оператору. Поэтому данные времена при расчетах на одну деталь должны рассчитываться по формуле:

$$(t_{\text{орг. обс}} + t_{\text{пот}}) / Z_{\text{дет. в смену}},$$

где $Z_{\text{дет. в смену}}$ – количество деталей обработанных в течение смены, шт.

Цикл обработки на станке с ЧПУ может также включать случайные перерывы в работе $t_{\text{случ}}$.

Случайные перерывы можно разложить на следующие составляющие:

$$t_{\text{случ}} = t_{\text{отказ}} + t_{\text{внеш}} + t'_{\text{см}} + t'_{\text{под}} + t'_{\text{рег}}, \quad (13)$$

где $t_{\text{отказ}}$ – время на устранение отказов устройства ЧПУ и механизмов станка;
 $t_{\text{внеш}}$ – время простоев станка, связанных с внешними факторами: отключение электроэнергии, не выход на работу или отсутствие оператора, организационные простои и т.д.;
 $t'_{\text{см}}$ – время на замену инструмента при случайных отказах режущего инструмента (при организации замены инструмента по фактическому состоянию, выходе инструмента из строя раньше регламентированной замены, поломке в случае сбоя в УЧПУ и др.);
 $t'_{\text{под}}$ – время незапланированных подналадок инструмента;
 $t'_{\text{рег}}$ – регулировка режимов резания или программы.

На рис. 2 приведены две диаграммы, которые показывают, как может изменяться время цикла в течение смены (наблюдения проводились путем хронометража в течение ряда смен на станке 6Т12МФ4). Основными причинами колебания времени цикла ($t_{\text{случ}}$), приведенными на рис.1, являются: отключение электроэнергии (1-я смена, 3-я деталь); изменение режима резания при возникновении вибраций (1-я смена с 5-й детали, 2-я смена с 4-й детали); замена инструмента (2-я смена, 7-я деталь); выход из строя электроавтоматики станка (2-я смена, 9-я деталь); остановки станка, связанные с осмотром инструмента (2-я смена, 2-я и 6-я детали); подналадка станка в связи с получением бракованной детали (2-я смена, 8-я деталь). Из приведенных графиков (рис. 2) видно, что доля, составляющая время случайных факторов в данном производстве, довольно высока.

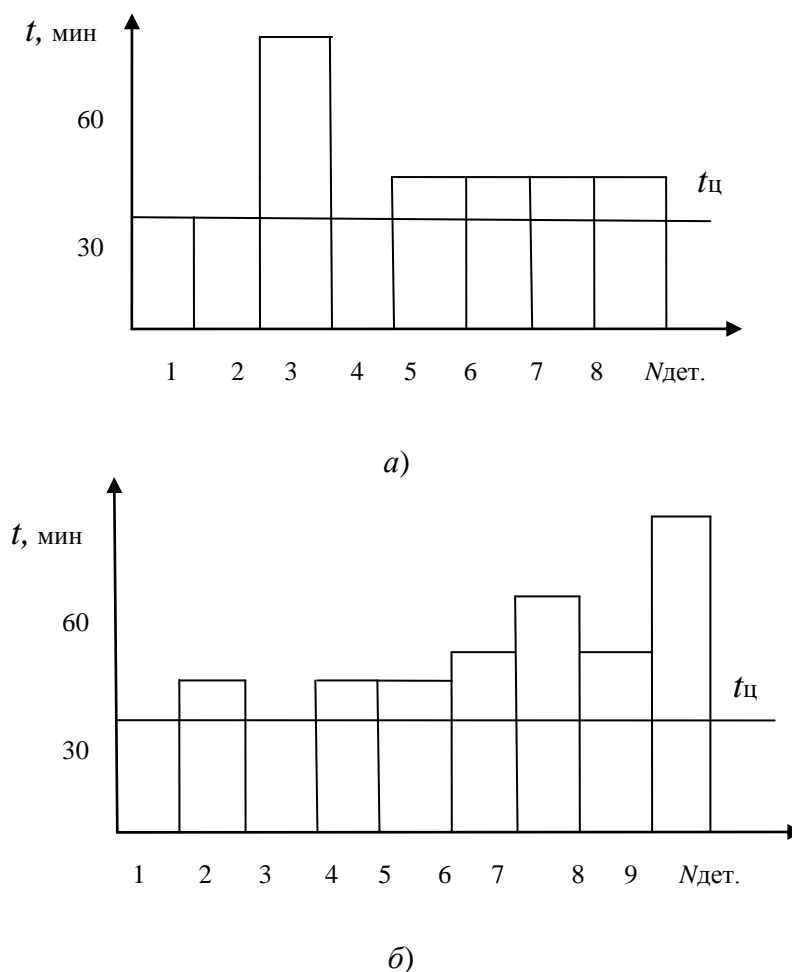


Рис. 2. Изменение времени цикла с учетом случайных факторов при обработке детали на станке 6Т13МФ4:
а – в первую смену; *б* – во вторую смен

Поэтому при определении времени длительности цикла, которое фактически состоит из основного и вспомогательного машинно-автоматического времени, времени вспомогательного неперекрываемого, затраченного оператором, времени технического обслуживания, необходимо также учитывать влияние случайных факторов:

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{о.м.}} + t_{\text{в.м.}} + t_{\text{в.оп.н.}} + t_{\text{техн. обс}} + t_{\text{случ}}. \quad (14)$$

В результате проведенного анализа составляющих норму времени на штуку для станков с ЧПУ, можно записать:

$$T_{\text{н.шт}} = \frac{\sum t_{\text{о.м.}}^* + \sum t_{\text{в.м.}}^* + \sum t_{\text{в.оп.н.}} + \sum t_{\text{тех.обс}} + \sum t_{\text{случ}}}{N_{\text{од}}} + \frac{\sum (t_{\text{орг.обс}} + t_{\text{пот}})}{Z_{\text{дет. см}}} + \frac{T_{\text{п.з}}}{N_{\text{п}}}. \quad (15)$$

* - составляющие нормы времени могут быть перекрываемыми в процессе изготовления деталей на станках с ЧПУ.

Представленная зависимость для расчета нормы времени на штуку может также быть использована при рассмотрении вопросов, связанных с эффективностью изготовления, организацией производства и др.

Время на организационное обслуживание и потребности составляют дополнительные затраты времени, которые необходимо нормировать отдельно на рабочую смену:

$$T_{\text{д}} = t_{\text{орг. об}} + t_{\text{пот}}. \quad (16)$$

При этом в течение времени организационного обслуживания рабочий выполняет действия, которые должны также быть учтены и оплачены.

Если оператор не налаживает станок (налаживает станок наладчик), то норма выработки в смену определяется:

$$N_{\text{в. см}} = (T_{\text{см}} - T_{\text{д}}) / T_{\text{ц}}, \quad (17)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены в мин.

Если оператор налаживает обслуживаемый станок, то норма выработки определяется:

$$N_{\text{в. см}} = [T_{\text{см}} - (T_{\text{д}} + T_{\text{п.з}} / N_{\text{п}})] / T_{\text{ц}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{п.з}} / N_{\text{п}}$ – подготовительно-заключительное время приходящееся на одну деталь (при многостаночном обслуживании данные числителя необходимо умножить на количество обслуживаемых станков – n).

Уровень полного ручного времени, затраченного оператором, тогда составит:

$$d_{\text{оп}} = t_{\text{в.оп}} / T_{\text{ц}}, \quad (19)$$

где $t_{\text{в.оп}}$ – время, затрачиваемое оператором на выполнение приемов в течение цикла.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма действий при расчете $T_{\text{н.шт}}$ и определении трудозатрат оператора на станке с ЧПУ.

Исходными данными для расчета нормы времени на штуку и затрат времени оператора являются:

1. Партия запуска деталей $N_{\text{п}}$.
2. Оборудование и степень автоматизации рабочего места.
3. Разработанный технологический процесс и управляющая программа.
4. Хронограмма работы.

Правильное нормирование затрат времени рабочего позволит обоснованно оплачивать его трудозатраты и при необходимости решать вопрос об обслуживании оператором нескольких станков.

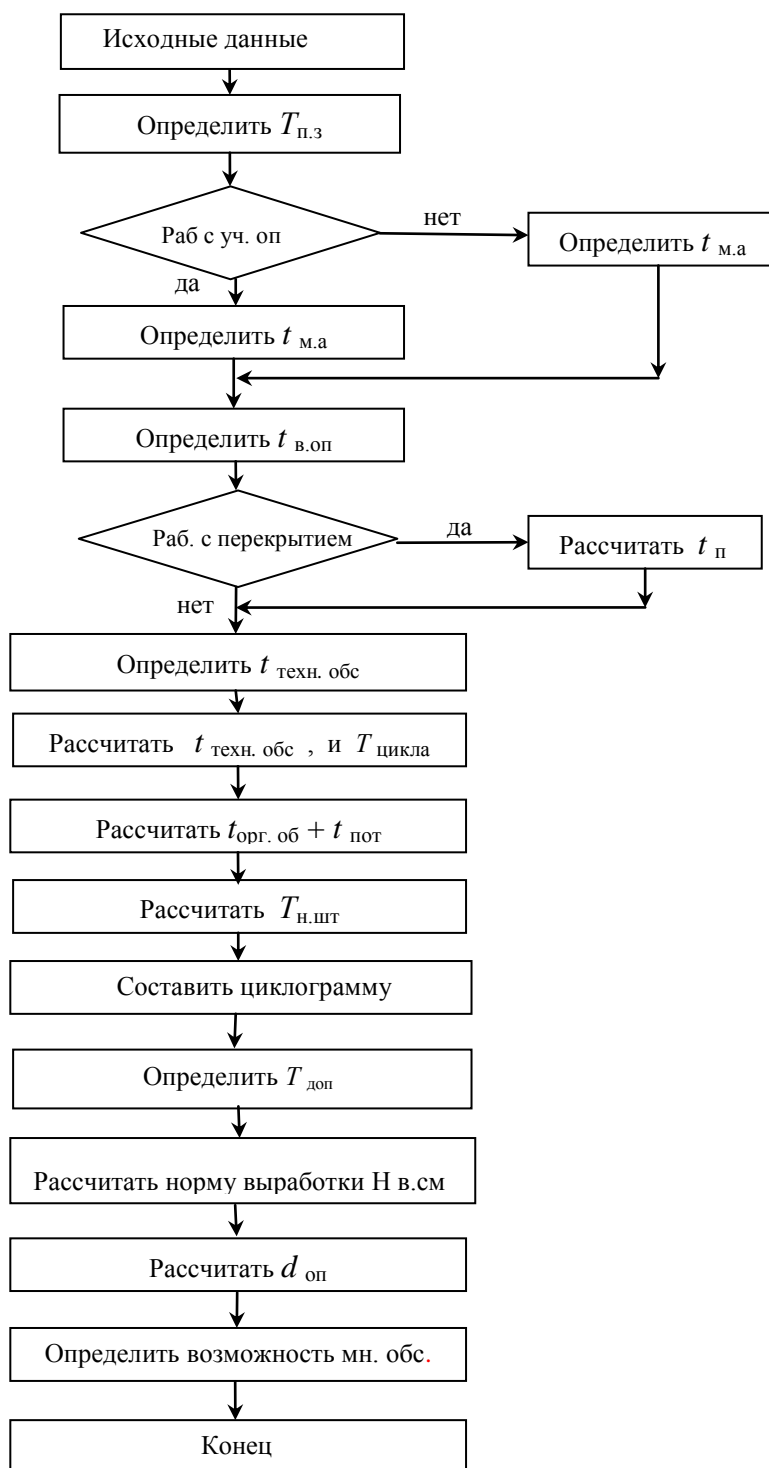


Рис. 3. Алгоритм нормирования времени операции для станков с ЧПУ

Библиографический список

1. ГОСТ 23004-78 Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении. Основные термины, определения и обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1978.

2. **ГОСТ 3.1109-82** Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: Издательство стандартов, 2003.
3. **Справочник нормировщика** / А.В. Ахумов, Б.М. Генкин, Н.Ю. Иванов [и др.]; под общ. ред. А.В. Ахумова. – Л.: Машиностроение, 1987.

*Дата поступления
в редакцию 09.04. 2015*

D.C. Pahomov, T.N. Grebneva

**FEATURES OF SETTING OF NORMS OF OPERATIONS
FOR MACHINE-TOOLS WITH NUMERICAL CONTROL**

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

The new going is offered near setting of norms of time of operation executable on machine-tools with numerical control. It touches also setting of norms of time on organizational service and time on the personal necessities. The flow-chart of calculation of piece time is presented.

Key words: setting of norms of operations, machine-tools with numerical control, time of cycle of machine-tool, piece time, auxiliary time preparatory-final.

УДК 681.5.017

М.Г. Чуркин¹, А.И. Поздышев¹, И.В. Мальцев²**РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ В СИСТЕМЕ SIEMENS NX
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ АГРЕГАТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ПАО «Нижегородский авиастроительный завод «Сокол»²

Рассмотрены вопросы применения САПР для создания твердотельных моделей обрабатываемых деталей, создания процесса обработки, формирования кода управляющей программы, и создания конструкторско-технологической документации.

Ключевые слова: САПР, УП, механическая обработка, летательные аппараты.

Конкурентоспособность авиастроительных предприятий уже невозможно обеспечить без современных многокомпонентных решений по управлению жизненным циклом изделий. Ряд российских компаний, участвующих в создании самолетов и вертолетов, в последние годы взял на вооружение западные PLM-системы.

Изделия авиастроительной отрасли представляют собой сложнейшие технические объекты, состоящие из тысяч деталей. Необходимо не только сконструировать и качественно собрать летательные аппараты, но и оценить спрос на рынке, просчитать специфику эксплуатации на всех этапах. Поэтому так важна роль систем управления жизненным циклом изделия (Product Lifecycle Management, PLM).

«Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАК) уже более 10 лет использует решения Siemens PLM Software и за последние годы они из вспомогательных приобрели статус бизнес-критичных. В 2013 году на их базе велось более полутора десятков программ корпорации. В настоящее время число подобных проектов существенно возрастает.

Основными особенностями системы Siemens NX являются:

- Пакет гибридного моделирования, который дает пользователю полный набор функций работы с твердым телом, поверхностью или каркасной моделью, основанный на полностью ассоциативном, параметрическом дереве построения.
- Мощные средства визуализации, анимации и построения прототипов.
- Широкие возможности по созданию и управлению крупными сборками, содержащими десятки и сотни тысяч компонентов. С их помощью можно построить полную электронную модель таких сложных изделий как автомобиль, самолет или авиационный двигатель.
- Модули высокоскоростной технологической обработки для любых типов оборудования, показывающие свою высокую эффективность в реальных условиях производства.
- Модули инженерного анализа, базирующиеся на встроенных решателях таких известных пакетов как MSC.Nastran, MSC.Adams позволяют проводить оценку различных сценариев поведения разрабатываемых конструкций, а также исследование таких типов задач как линейная статистика, равновесная теплопередача, потеря устойчивости, анализ собственных частот, кинематический анализ и симуляция практически любого 3-х-мерного механизма и т.д. К большинству популярных пакетов инженерного анализа имеются прямые интерфейсы.
- Открытый мощный программный интерфейс дает возможность разрабатывать собственное прикладное программное обеспечение, которое будет полностью интегрировано в Siemens NX.
- Эффективный обмен данными с другими системами даже при плохом качестве вход-

ных данных, полученных из старых систем. Поддержка внешних форматов данных IGES, STEP, DXF и прямых интерфейсов к наиболее известным пакетам.

Начальным этапом подготовки управляющих программ для механической обработки является анализ технического задания на разработку и трехмерной твердотельной сборки конструкции агрегата (рис. 1), выполненной в системе Siemens NX.

В случае если 3D-модель детали отсутствует, прибегают к ее построению по имеющимся чертежам и стандартам, используя модуль Siemens NX «Моделирование» - систему трехмерного гибридного моделирования, предоставляющую инженеру широкий выбор необходимых инструментов для работы с твердым телом, поверхностью и каркасной моделью. Все функции работы с твердым телом и поверхностью отражены в полностью ассоциативном, параметрическом дереве построения. Навигатор наглядно представляет элементы модели и порядок ее построения, позволяет выбрать конструктивные элементы, оперативно менять их и связи между ними. Историю построения модели можно просмотреть пошагово, конструктивные элементы допускается копировать и вставлять в модель. Количество элементов, из которых строится деталь, не ограничено. Используя методы геометрического конструирования, вы можете вносить необходимые изменения, как в параметризованную, так и непараметризованную модель, а также преобразовывать поверхности и твердые тела в типовые элементы и вносить их в конструкторскую базу данных.

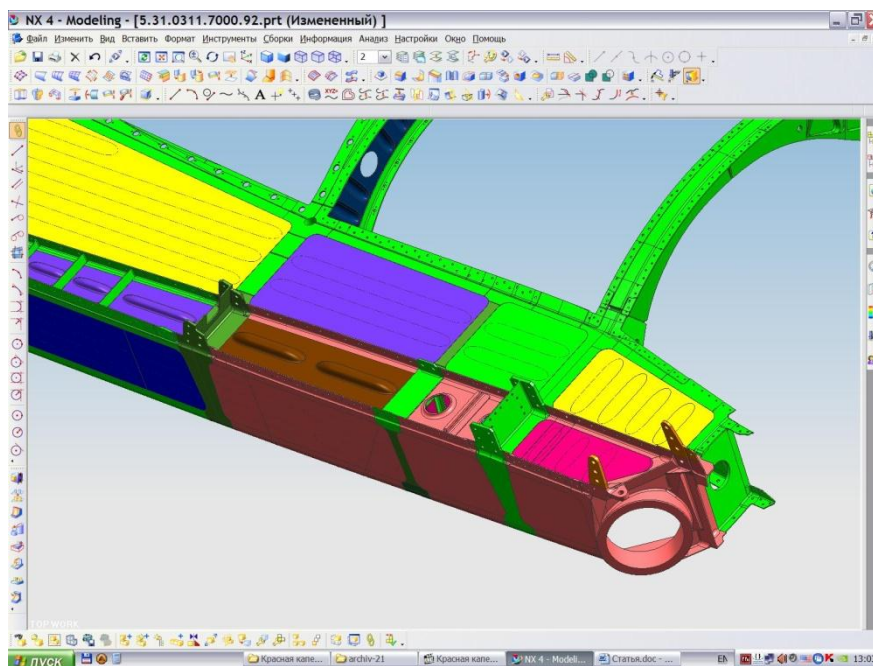


Рис. 1. Трехмерная твердотельная сборка конструкции агрегата

Системное моделирование обеспечивает построение ассоциативной модели любой сложности с возможностью управления глобальными изменениями. Siemens NX предлагает инженерную технологию WAVE (What if Alternative Value Engineering), специально предназначенную для управления глобальными изменениями, проводимыми в больших сборках сложных изделий. Сочетание в системе Siemens NX гибкой параметризации, структуры организации сборок и технологии WAVE позволяет реализовать на уровне CAD/CAE/CAM систем процесс параллельного проектирования изделия. Механизм управления ассоциативной связью между геометрическими моделями дает возможность объединить концептуальное проектирование и детальное конструирование таким образом, чтобы изменения на концептуальном уровне автоматически отражались на уровне не только отдельных деталей, но и технологических моделей. Вы можете создавать «концептуальный шаблон», который принято называть управляющей структурой, определяющей параметры изделия, от которых зависят

его функциональные характеристики. Делая несколько простых изменений на концептуальном уровне описания изделия, вы можете легко получить новое решение в линейке изделий, опираясь на мастер-модель описания всего семейства. Для модели является важным проектирование изделия в соответствии с правилами «электронной увязки» деталей, что позволяет обеспечить отсутствие подгонки и доработки деталей при сборке агрегата. Трехмерная модель большой сборки позволяет технологу-программисту оценить как конфигурацию зон обработки, так и возможность доступа к ним инструментальных блоков с учетом предлагаемого оборудования и оснащения. В результате анализа производится выбор оптимальных стратегий формирования траекторий движения режущего инструмента. Технолог-программист задает в САМ-системе стратегию обработки детали. Siemens NX предоставляет для этого немалое количество готовых решений, в том числе интерактивные меню для задания параметров конкретного вида обработки. Программисту необходимо ввести параметры, а система рассчитывает координаты траектории обработки.

На практике обычно говорят об обработке детали, более правильно было бы говорить об обработке операционной заготовки. Технология обработки операционной заготовки определяется технологом с учетом имеющегося в САМ-системе набора процедур или стратегий обработки. Так, для чернового фрезерования могут быть определены стратегии послойной выборки материала параллельными проходами, по спирали и др.; при чистовом фрезеровании может выполняться обработка контуров или поверхностей с применением различных стратегий. После указания технологом обрабатываемых элементов, выбора режущего инструмента, стратегии обработки и ее параметров, в САМ-системе осуществляется автоматический расчет траектории движения инструмента. Далее, с помощью вызова соответствующего постпроцессора, траектория может быть преобразована в УП для конкретного станка с ЧПУ.

Помимо перечисленных «традиционных» задач, в современных САМ-системах и других специальных средствах автоматизации подготовки УП решаются такие задачи как: оптимизация траектории движения инструмента под конкретные условия обработки, контроль точности перемещений и столкновений в системе «станок - приспособление - инструмент – деталь» и др. Решение этих задач базируется на интегрированном использовании 3D моделей операционной заготовки, режущего и вспомогательного инструмента, приспособлений, а также станка с ЧПУ.

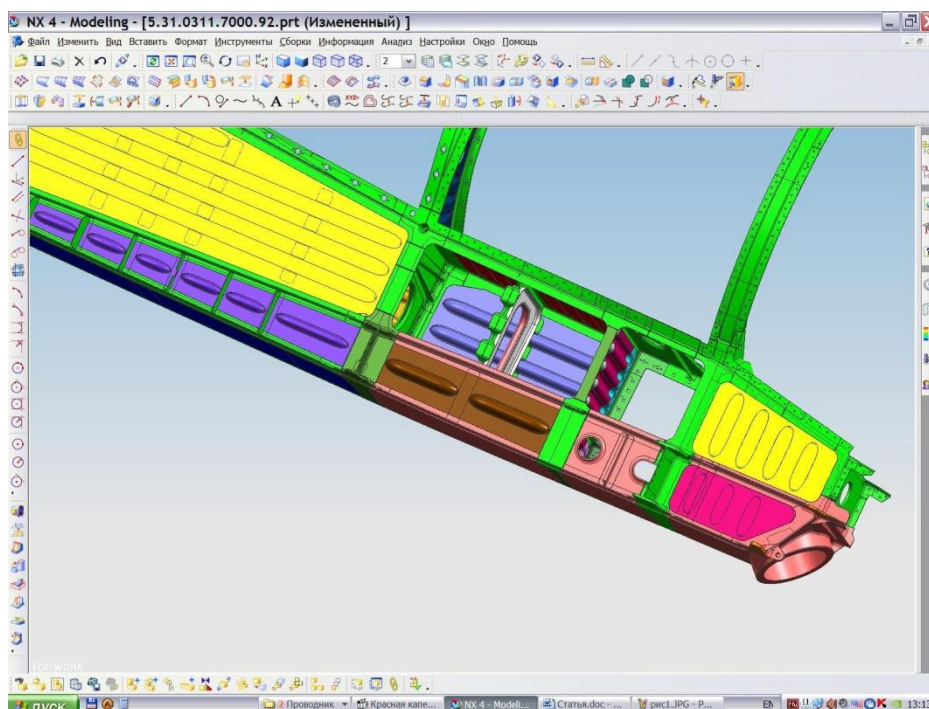


Рис. 2. Проемы в каркасе агрегата под ввариваемые панели

Обрабатываемые поверхности указываются технологом на выходной модели ОЗ, в интерактивном режиме работы с САМ-системой. При запуске команды на расчет траектории движения инструмента эти поверхности аппроксимируются с заданной точностью элементарными плоскими фигурами (например, треугольниками), после чего траектория обработки строится с учетом аппроксимированной модели поверхностей, модели инструмента и выбранной стратегии обработки. Траектория рассчитывается не относительно точки касания, а относительно центра торца фрезы.

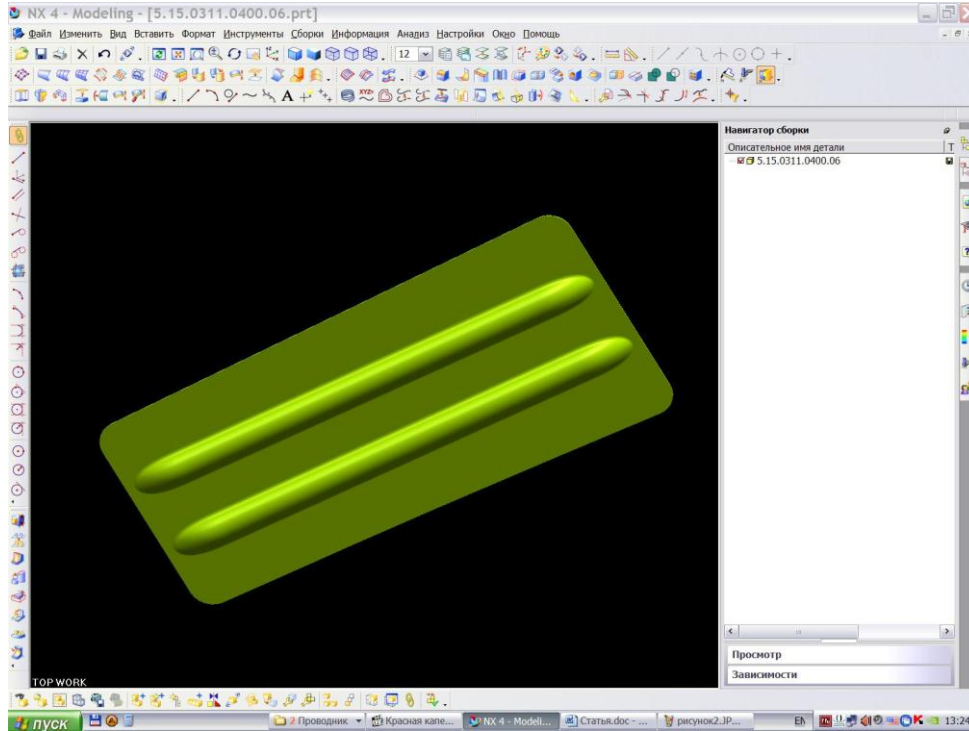


Рис. 3. Панель в проем каркаса агрегата

Например, на станках с ЧПУ производится механическая обработка проемов в каркасе агрегата под ввариваемые панели (рис. 2) и самих панелей (рис. 3).

В первую очередь, по программе производится разметка контура проема при помощи специнструмента - чертилки. Визуально определяется положение будущего проема относительно деталей каркаса и, при необходимости, вводится смещение контура в системе ЧПУ станка по соответствующим смещению осям. Смещение деталей каркаса возможно вследствие короблений и поворотов возникающих при сварке изделия. Далее по программам ведется обработка контуров с учетом припусков на обработку, в соответствии с технологическим процессом. Траектория движения инструмента рассчитана по номинальному размеру, обработка с припусками ведется за счет коррекции на диаметр инструмента, корректный ввод которой предусмотрен в программе. Формирование траекторий может осуществляться как в двух, так и в трех осевой обработке в зависимости от конфигурации обрабатываемого контура (рис. 4).

За основу при разработке управляющих программ на симметричные детали («правая» или «левая») берется разработанная, отработанная на станке и принятая контролером деталь («правая» или «левая»). Максимально используя разработанную программу, преобразуется лишь траектория инструмента, изменяется направление резания с попутного на встречное, а в технологический процесс вводится указание о работе с данной программой со сменой полярности по соответствующей оси.

Ассоциативная связь между исходной параметрической моделью и сформированной траекторией инструмента делает процесс обновления последней при необходимости быстрым и легким.

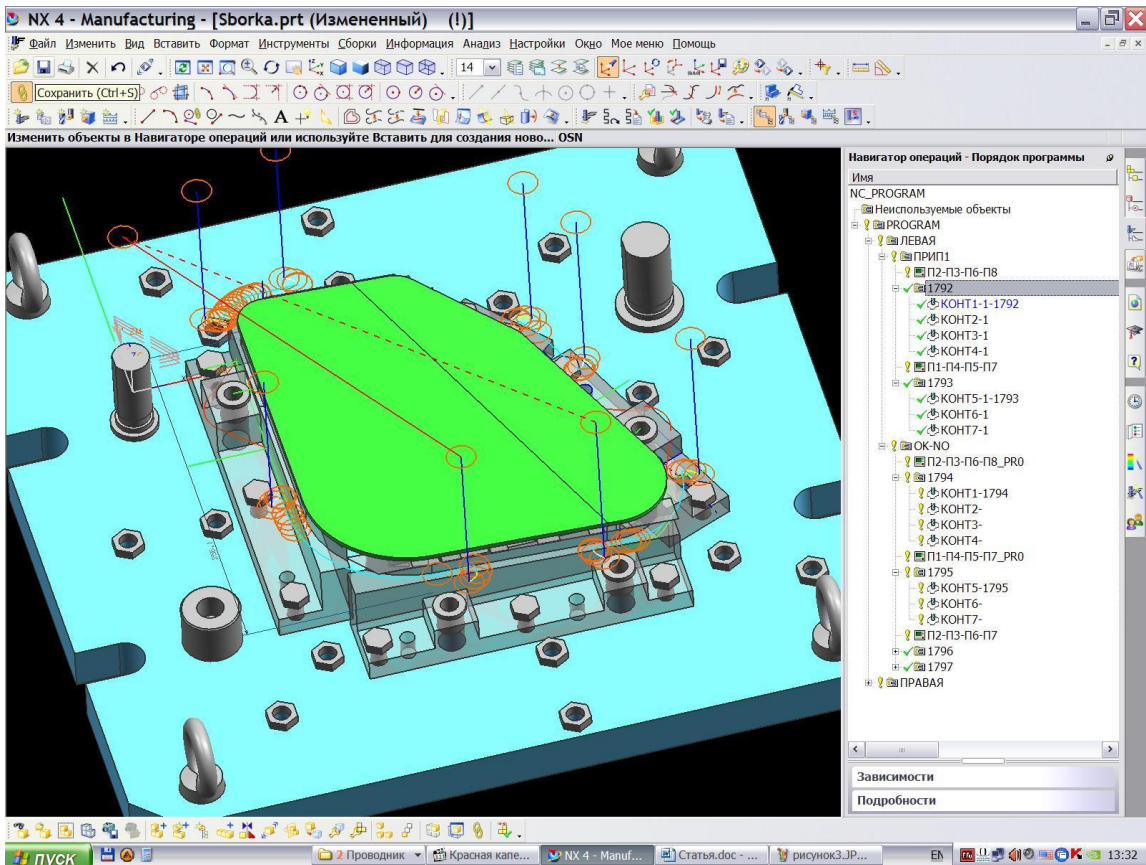


Рис. 4. Обработка панели в спец. приспособлении

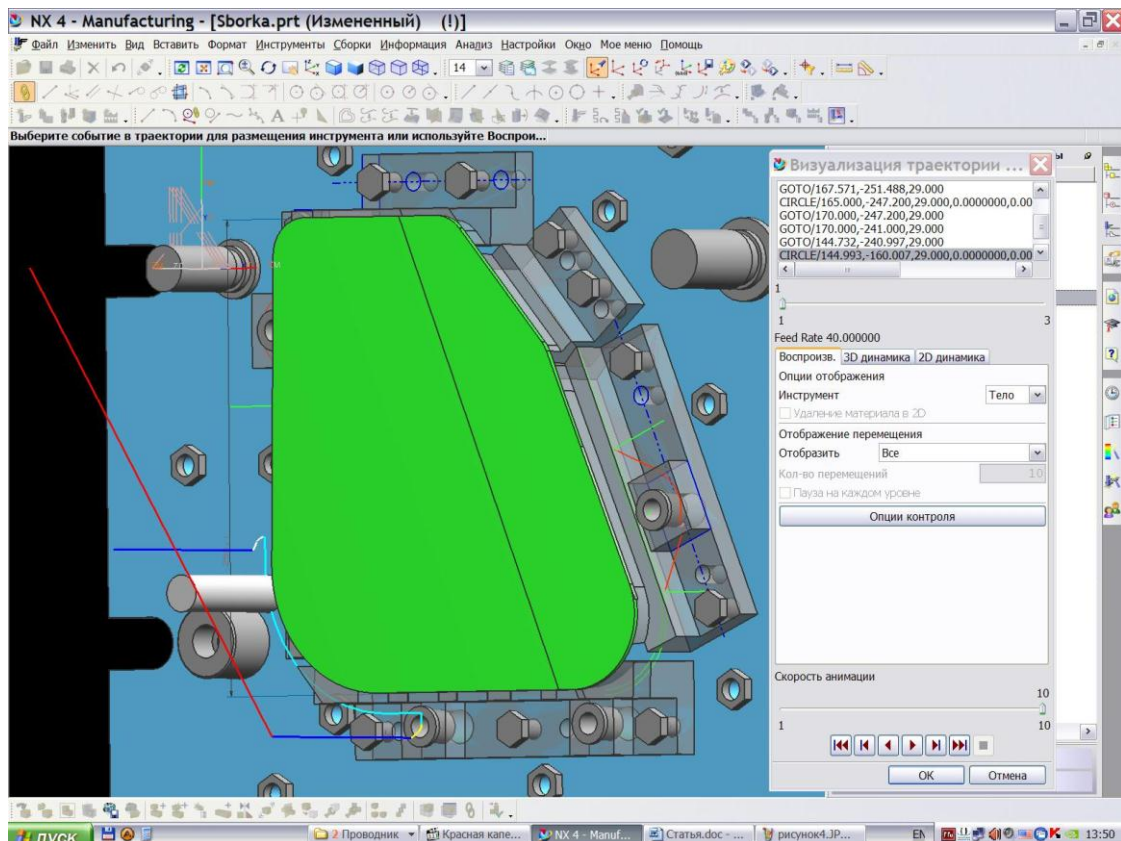


Рис. 5. Контроль траектории движения инструмента

Контроль траекторий в среде Siemens NX осуществляется при помощи специальной функции визуализации, позволяющей наблюдать за инструментом во время его движения по обрабатываемой детали. Доступны три режима просмотра: воспроизведение, динамическое удаление материала и статическое удаление. Полученную траекторию инструмента можно отредактировать в графическом или текстовом режиме, после чего просмотреть изменения в управляющей программе на всей траектории или только на выбранном участке, изменяя скорость и направление визуализации (рис. 5).

Кроме того, для визуализации и контроля процесса механической обработки используется дополнительное программное обеспечение - «VERICAD». Эта программа предусматривает контроль зарезов, показывает недообработку мест в тех случаях, когда нет перекрытия фрезы. Программа контроля «GRAPHIC» - отдельно разработанная система контроля управляющей программы в виде материального файла. С помощью этой программы можно на экране проконтролировать траекторию движения инструмента в плоскости XY, YZ, XZ и в изометрии. Программа обеспечивает возможность просмотра непрерывного или пошагового движения фрезы по траектории обработки детали. При этом высвечиваются координаты положения фрезы в координатных осях станка. Программа позволяет производить масштабирование изображения, то есть можно увеличить на экране отдельные элементы траектории, чтобы убедиться в их правильности. С помощью данной программы можно распечатать на принтере траекторию движения фрезы, а также текстовый файл самой управляющей программы.

Чтобы запустить управляющую программу на определенном станке, ее необходимо переписать в машинных кодах этого станка, т.е. провести постпроцессирование. Постпроцессирование исходной информации Siemens NX в формате «.clc» производится в специально разработанной математиками отдела информационных технологий в машиностроении программе. Помимо записи управляющей траектории в машинных кодах станка, данная программа позволяет осуществить повторный контроль как геометрии, так и функций управления станком в окончательном файле, передаваемом в цех для работы (рис. 6).

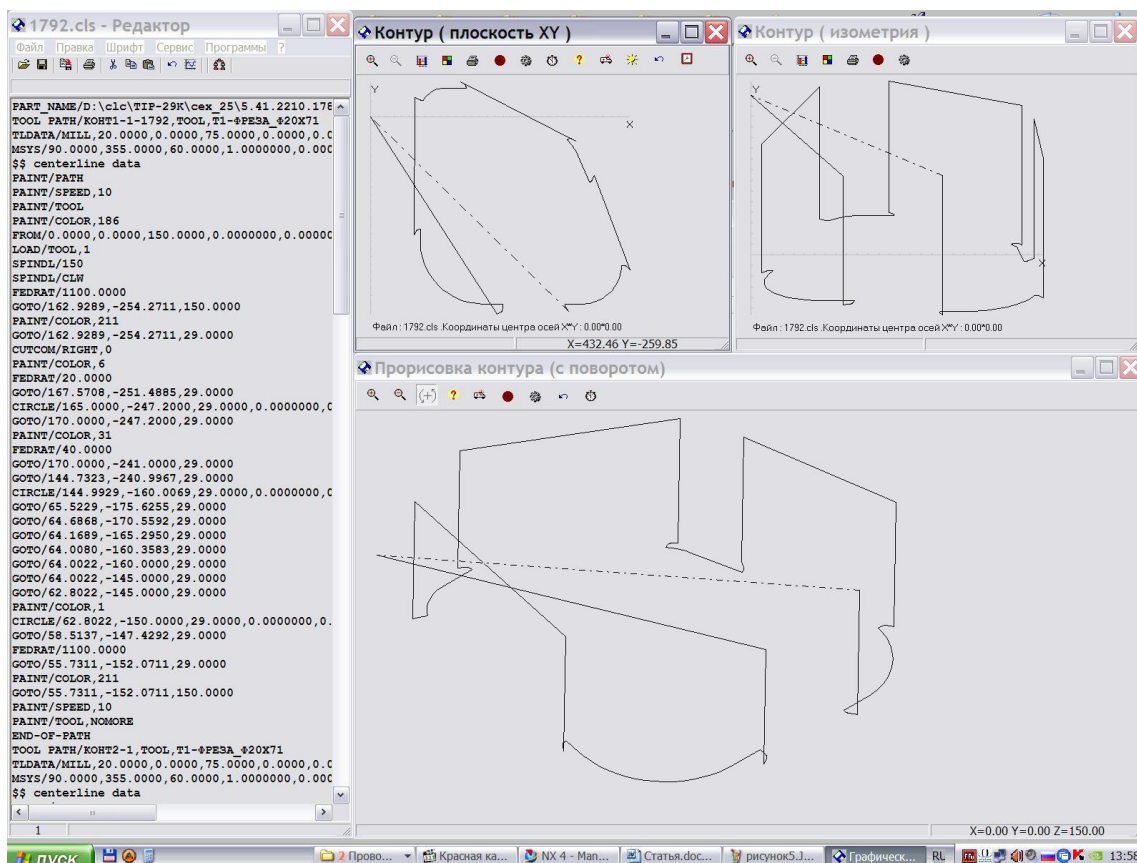


Рис. 6. Постпроцессирование и повторный контроль

Подготовка технологического процесса механической обработки осуществляется в среде подготовки чертежной документации Siemens NX, включающей набор средств (графический интерфейс с широким использованием пиктограмм; возможность использования дополнительных видов с удалением невидимых линий; скрытие или отображение отдельных чертежных объектов согласно заданным условиям; автоматическая простановка размеров). Используя удобные функции задания и редактирования текста на базе существующей трехмерной геометрической модели твердого тела можно создать необходимые карты эскизов и операционные карты (рис. 7). А с помощью специально разработанного математиками отдела модуля для создания текстовых (.doc) файлов технологии с использованием атрибутов операций и инструмента, подготовить уже оформленный в соответствии с требованиями ГОСТ и СТП технологический процесс механической обработки (рис. 8).

Готовый комплект конструкторско-технологической документации передается в цех, где осуществляется внедрение и при необходимости корректировка управляющих программ и технологического процесса. После внедрения технологический процесс и программы признаются годными к эксплуатации.

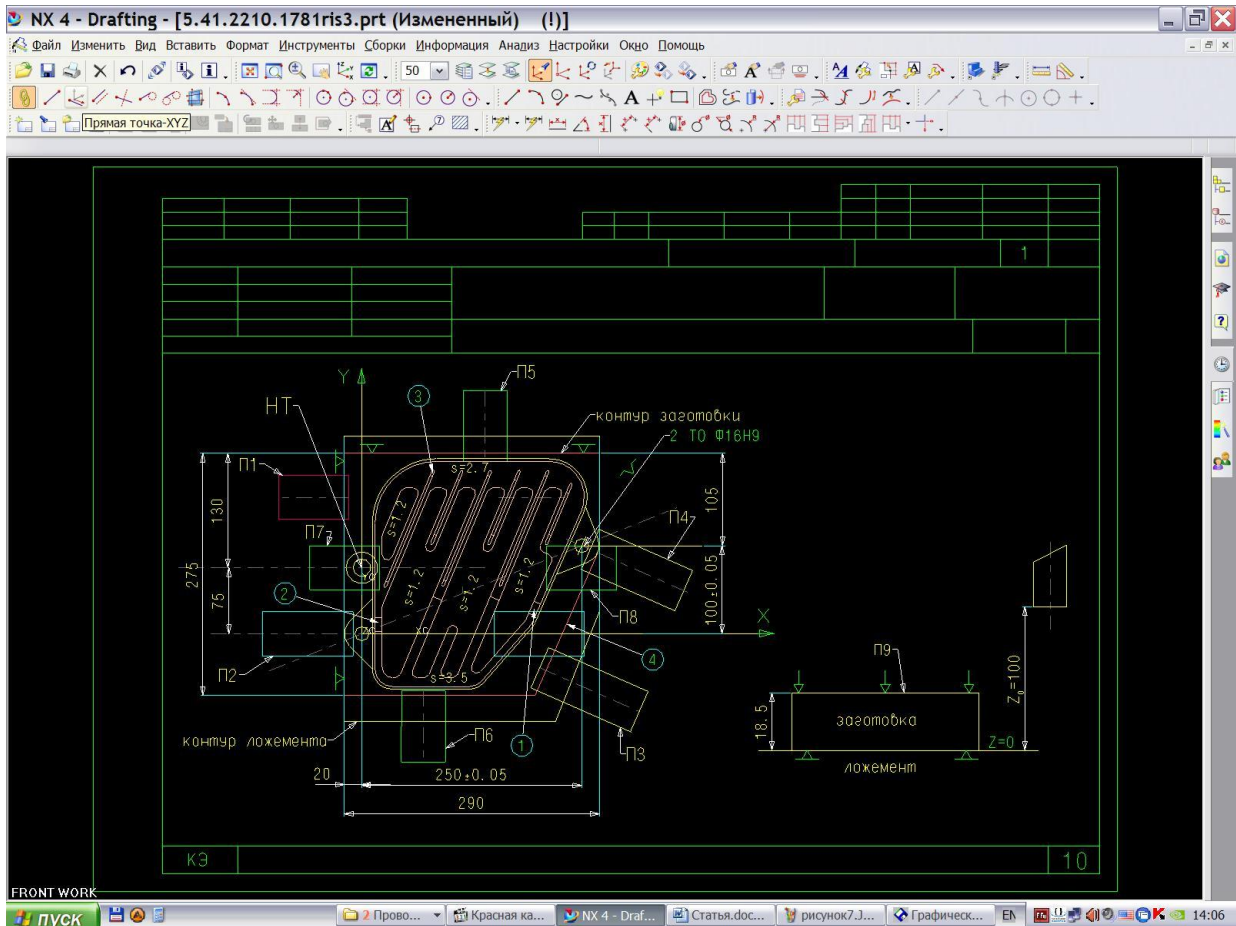


Рис. 7. Подготовка эскизов для технологической документации

Использование системы Siemens NX в комплексе с дополнительными отдельными модулями при разработке управляющих программ для механической обработки на станках с ЧПУ позволяет многократно сократить время, необходимое программисту для формирования программного кода; повысить качество получаемых изделий и снизить процент брака в производстве; объединить в себе работу по проектированию 3D-модели, ее обработке и контролю, а также составлению конструкторско-технологической документации. Все это позволяет рационализировать и унифицировать весь процесс разработки управляющей программы, что положительно влияет на конкурентоспособность как продукции, так и предприятия в целом.

Рис. 8. Запуск модуля создания текстового файла технологии

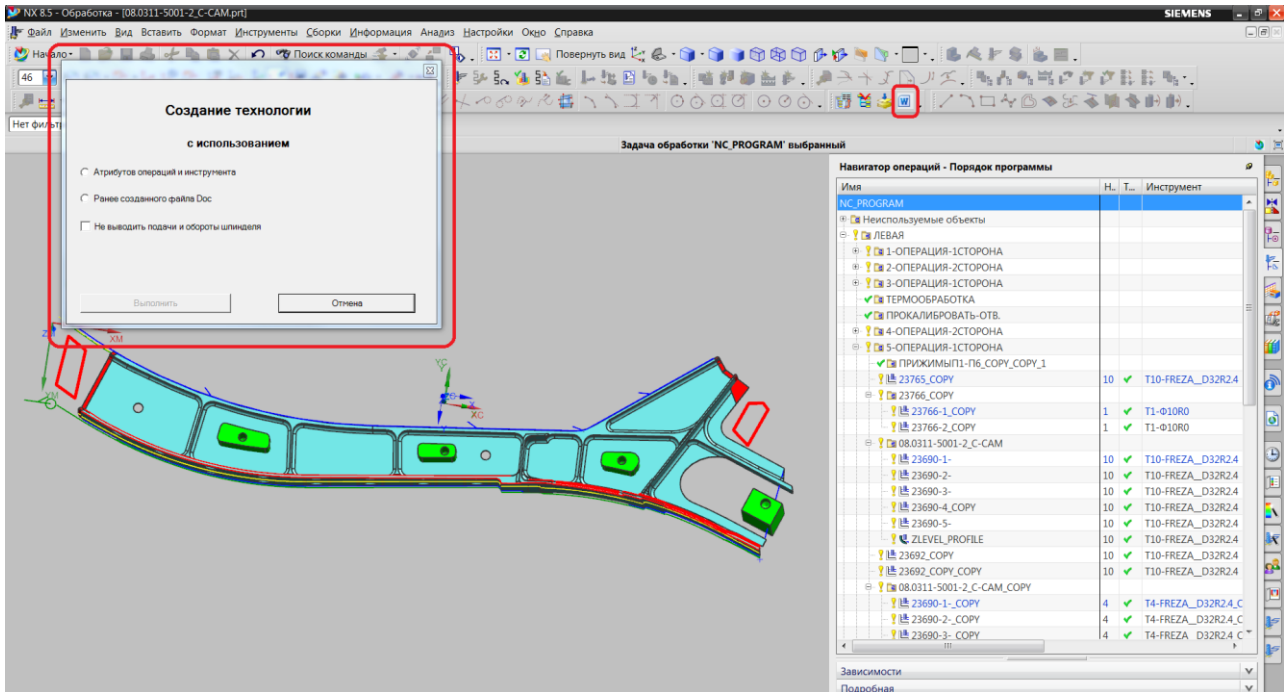
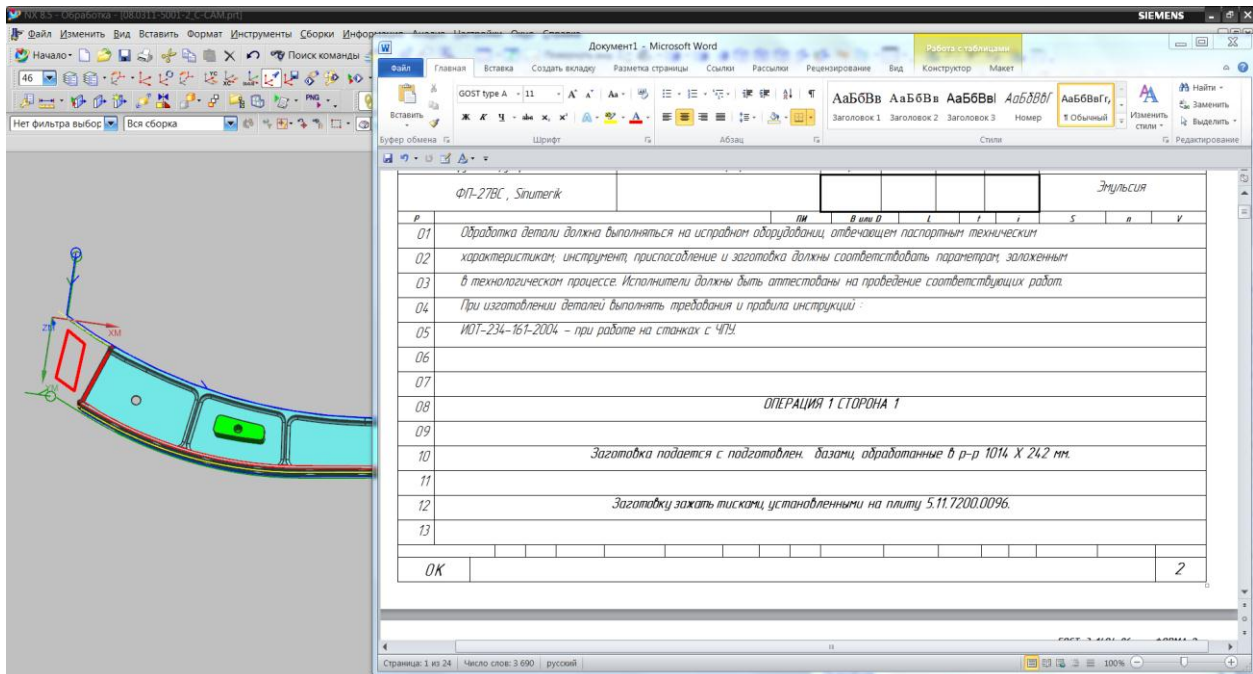


Рис. 9. Готовый текстовый файл технологии



Библиографический список

1. Siemens PLM Software. Siemens NX 8.5 Documentation Russian, 2012.
2. http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru.

*Дата поступления
в редакцию 09.04.2015*

M.G. Tchourkin¹, A.I. Pozdyshev¹, I.V. Malcev²

**DEVELOPMENT OF CONTROL PROGRAMS IN THE SIEMENS NX TO PROCESSING
DIFFICULT DIMENSIONAL CONSTRUCTIONS AIRCRAFT COMPONENTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC "Nizhny Novgorod Aircraft Plant" Sokol "²

Overview of questions CAD application for creating solid models of the workpieces, creating tooling, code generation control program, and the creation of technological documentation.

Key words: CAD system, CAE system, automated design system, control programs, tooling, aircraft.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**В.Е. Бородина, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов,
Е.Н. Полозкова, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин**

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР АЭС «ТЕМЕЛИН» С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ТВСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS. Исследования проводились на аэродинамическом стенде с измерением локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину обтекания дистанционирующих и перемешивающих решеток ТВСА потоком теплоносителя. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов) и детального поэлементного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие и перемешивающие решетки, межкассетное взаимодействие, гидродинамика теплоносителя.

Введение

Актуальной задачей для ГК «Росатом» является увеличение доли присутствия российских компаний на международном рынке. Укрепление позиций невозможно без совершенствования поставляемого оборудования, в том числе оптимизации конструкции тепловыделяющихборок (ТВС).

АО «ОКБМ Африкантов» осуществляет разработку и проектирование ТВС для реакторов типа ВВЭР, расположенных как в России, так и за ее пределами. Одним из партнеров предприятия является чешская АЭС «Темелин», активная зона первого блока которой эксплуатируется с полной загрузкой из ТВСА–Т. Конструкция ТВСА–Т характеризуется применением комбинированных дистанционирующих решеток (КДР), состоящих из ячеистой дистанционирующей решетки (ДР) и пластинчатой перемешивающей решетки (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «закрутка» [1].

В настоящее время произведена частичная замена ТВСА–Т на более совершенную ТВСА–12 PLUS, которая отличается оптимизированным размещением ДР и применением ПР с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [2].

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними кассетами. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения комплекса исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя [3].

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР 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), расходомерное устройство, измерительный комплекс [4].

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя внутри трубного пучка ЭМ заключались в измерении модуля вектора скорости, углов набегания потока и статического давления [5].

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающий в себя сегменты кассет ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т с межкассетным пространством и выполнена с соблюдением полного геометрического подобия. Пояс ПР ТВСА–12 PLUS имеет турбулизирующие дефлекторы, расположенные по схеме «порядная прогонка». Пояс КДР ТВСА–Т снабжен турбулизирующими дефлекторами, расположенными по схеме «закрутка вокруг твэла».

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, ЭВМ с программным обеспечением.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышали 7% от абсолютной скорости. Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$.

Обоснование представительности экспериментальных исследований

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 межкассетного взаимодействия теплоносителя 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 равном 55000, а все исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя проводились при числе Рейнольдса равном 80000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Были определены значения коэффициентов местного гидравлического сопротивления дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток, которые соответствуют значениям сопротивления натуральных ДР, ПР и КДР штатных ТВСА. Также была произведена оценка точности полученных опытных результатов исследований.

Методика проведения исследований

Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА проводились на ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, состоящего из двух сегментов ТВСА–12 PLUS и одного сегмента ТВСА–Т и ЭМ состоящей из трех сегментов ТВСА–12 PLUS.

Экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя

между соседними ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Вектор скорости измерялся в характерной области межкассетного зазора ЭМ с расположением ДР, ПР и КДР, которое соответствует верхнему и нижнему фрагментам твэльного пучка штатных ТВС (рис. 1).

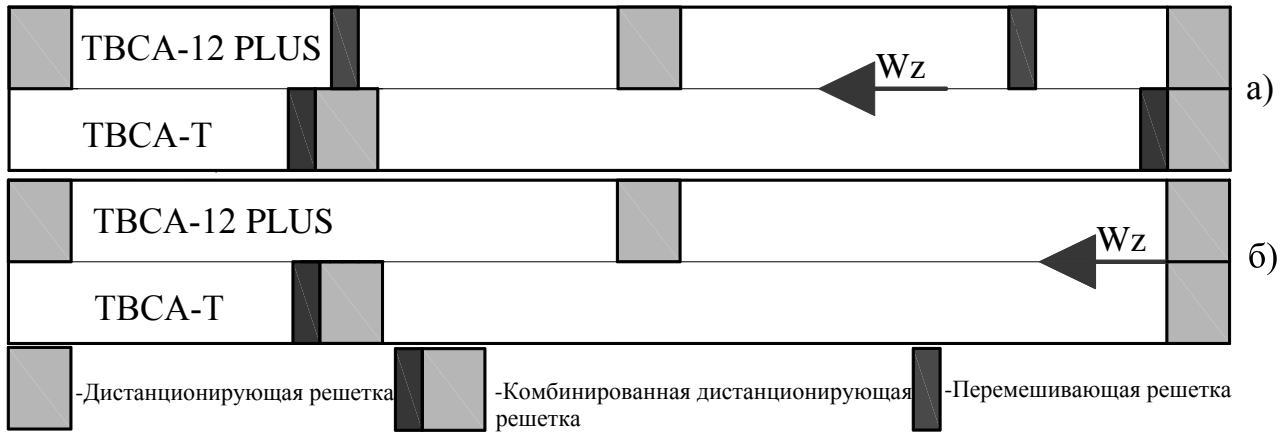


Рис. 1. Схема расположения ПР, ДР и КДР в ЭМ:
 а – верхний фрагмент твэльного пучка ТВСА;
 б – нижний фрагмент твэльного пучка ТВСА

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил заключить:

1. В области межкассетного пространства ЭМ перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Значение поперечной составляющей вектора скорости (W_y / \bar{W}) перед КДР и ДР соответствующих кассет одинаково и составляет 30% от среднерасходной скорости (рис. 2).

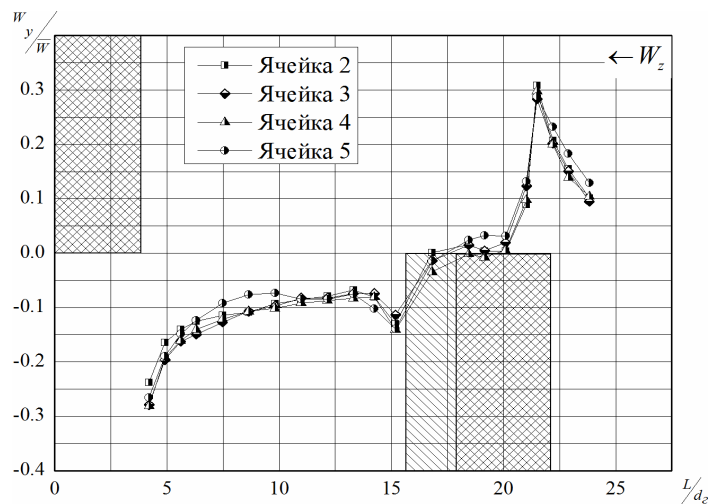


Рис. 2. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

2. В зазорах между твэлами, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется максимальный на данном фрагменте твэльного пучка ТВС поперечный поток теплоносителя. Поперечная составляющая вектора скорости (W_y / \bar{W}) перед КДР и ДР составляет 40% от среднерасходной скорости (рис. 3, а, б).

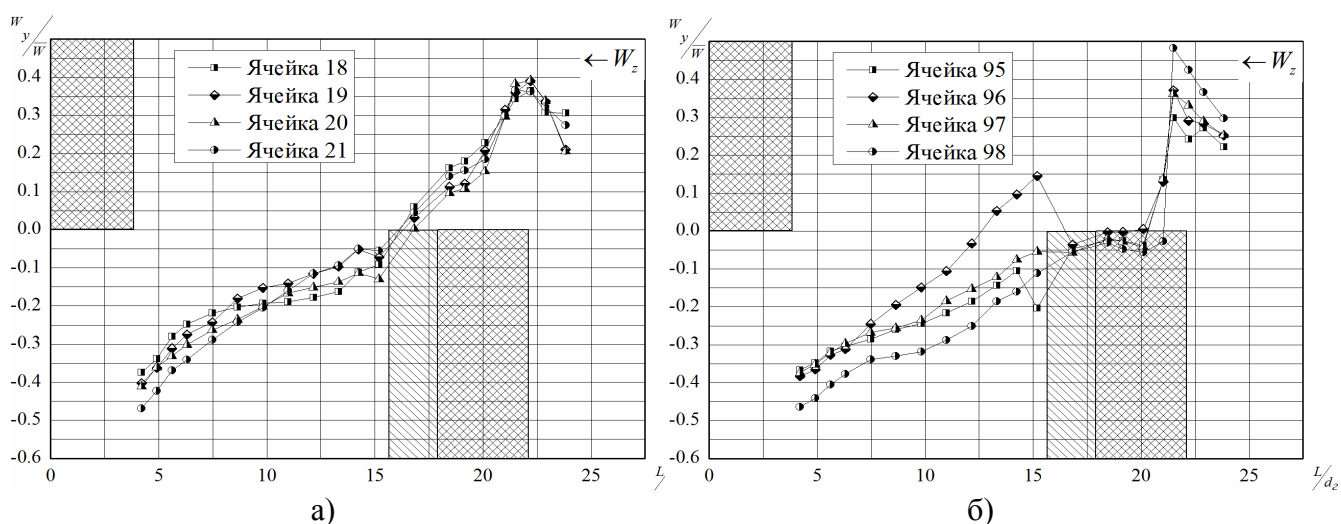


Рис. 3. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов, прилежащем к межкассетному пространству:
а – ТВСА–12 PLUS; *б* – ТВСА–Т

3. Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в кассетах ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS, вызванных обтеканием ДР и КДР, ограничивается твэлами четвертого ряда. Данный факт говорит о том, что интенсивное перераспределение потока между соседними сегментами кассет начинается уже на входе в твэльный пучок модели.

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в верхнем фрагменте твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS

Основным отличием нижнего и верхнего фрагментов твэльного пучка ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т является применение в ТВСА–12 PLUS перемешивающей решетки, конструкция которой предусматривает следующие варианты расположения дефлекторов, представленные на рис. 4.

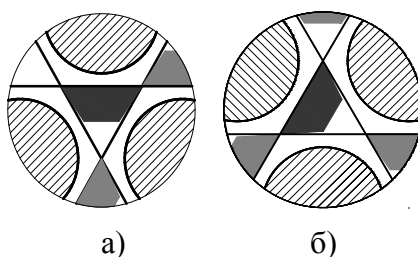


Рис. 4. Расположение дефлектора ПР в ячейке ТВСА–12 PLUS:
а – дефлектор направлен вниз; *б* – дефлектор направлен вбок

Анализ полученных экспериментальных данных позволил выявить влияние перемешивающей решетки на межкассетное взаимодействие теплоносителя и заключить следующее:

1. Перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ПР и ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Значение поперечной составляющей вектора скорости (W_y / \bar{W}) в области межкассетного пространства перед КДР и ПР составляет 30% от средне-расходной скорости (рис. 5).

2. В областях межкассетного пространства, граничащих с ячейками ТВСА–12 PLUS, где дефлектор направлен вниз, значение поперечной составляющей вектора скорости

(W_y / \bar{W}) достигает 30% от среднерасходной скорости, а в областях, граничащих с ячейками, где дефлектор направлен вбок, 15% от среднерасходной скорости (рис. 5).

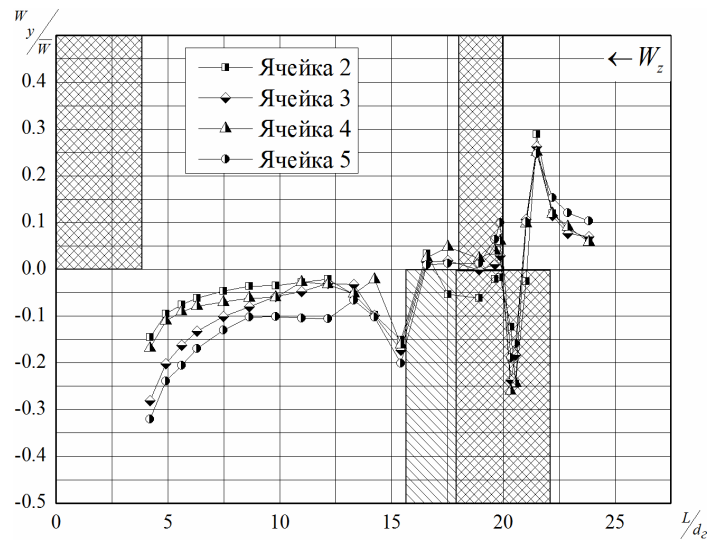


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

3. В зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется поперечный поток теплоносителя, который вызван обтеканием КДР ТВСА–Т. Значение поперечной составляющей вектора скорости (W_y / \bar{W}) перед КДР составляет 50% от среднерасходной скорости (рис. 6, а, б).

4. На формирование потока теплоносителя за ПР ТВСА–12 PLUS, помимо поперечного потока, вызванного обтеканием ДР, оказывает влияние расположение дефлекторов ПР. В зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству, где дефлектор направлен вниз, поперечная составляющая вектора скорости (W_y / \bar{W}) составляет 50% от среднерасходной скорости, а в зазорах между твэлами, где дефлектор направлен вбок, 30% от среднерасходной скорости (рис. 6, а, б).

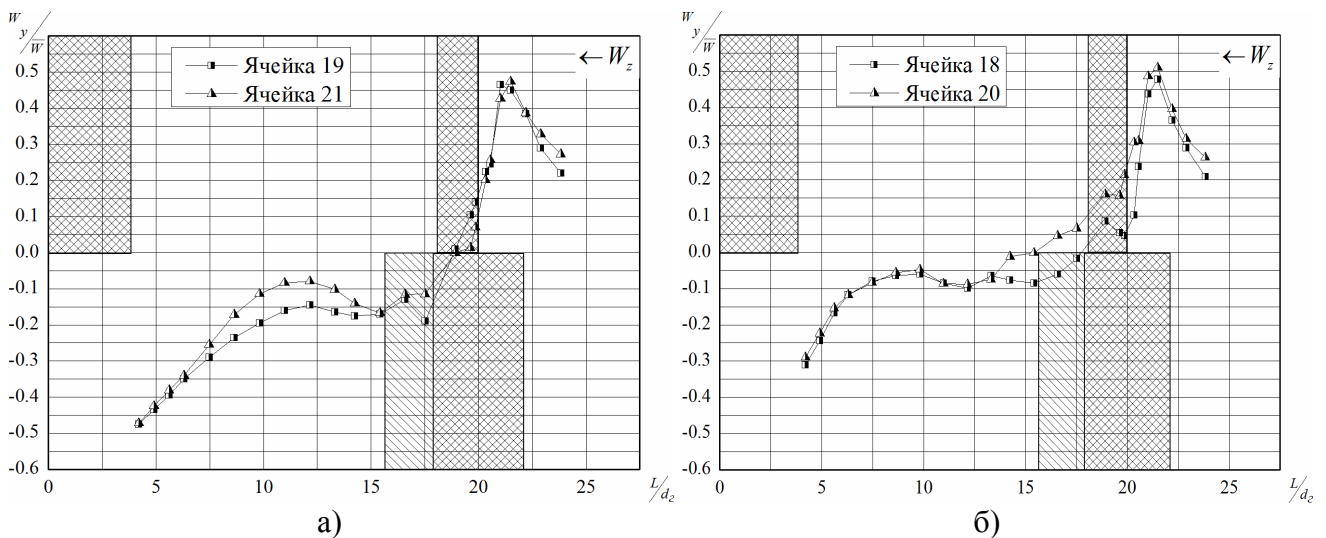


Рис. 6. Распределение относительной поперечной скорости в зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству: а – зазор, где дефлектор направлен вниз; б – зазор, где дефлектор направлен вбок

5. В зазорах между твэлами ТВСА–Т, прилежащими к межкассетному пространству, непосредственно перед КДР реализуется поперечный поток теплоносителя, движущийся в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Поперечная составляющая вектора скорости (W_y / \bar{W}) перед КДР составляет 20% от среднерасходной скорости, а перед ДР – 30% от среднерасходной скорости (рис. 7).

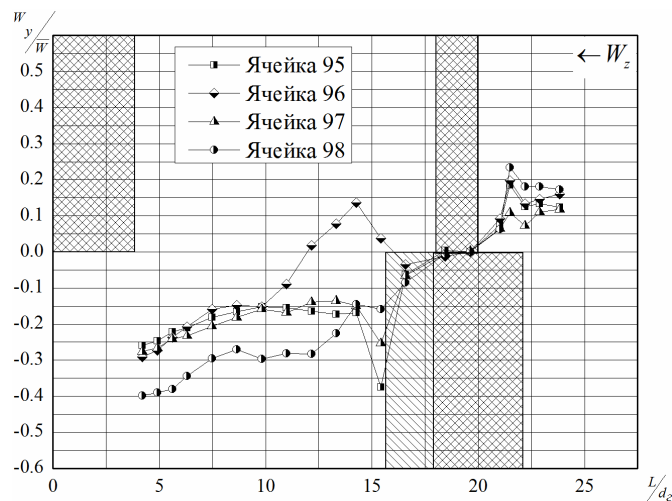


Рис. 7. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов ТВСА–Т, прилежащем к межкассетному пространству

6. Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т, при обтекании КДР, ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов, а при обтекании ДР третьим рядом твэлов каждой из кассет, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии между соседними кассетами ТВСА.

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS сделаны следующие выводы:

1. В области межкассетного пространства нижнего фрагмента твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости составляет 30% от среднерасходной скорости.

2. В зонах межкассетного пространства верхнего фрагмента твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS, граничащих с ячейками ТВСА–12 PLUS, где дефлектор ПР направлен вниз, поперечная составляющая вектора скорости составляет 30% от среднерасходной скорости, а в зонах, граничащих с ячейками, где дефлектор ПР направлен вбок, 15% от среднерасходной скорости.

3. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости в нижнем и верхнем фрагментах твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS реализуется в зазорах между твэлами, прилежащих к межкассетному пространству. Значение поперечной составляющей вектора скорости составляет (40–50) % от среднерасходной скорости.

4. Распространение возмущений потока теплоносителя в нижнем и верхнем фрагментах активной части ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов. Данный факт говорит о высокой интенсивности перераспределения потока теплоносителя между соседними ТВСА.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS приняты для практического использования в АО

«ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов) и детального поячеечного расчета активной зоны реакторов ВВЭР.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС / С.М. Дмитриев [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа. – 2015.
2. **Дмитриев, С.М.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2013.
3. **Баринов, А.А.** К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
4. **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.
5. 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.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2015*

**V.E. Borodina, A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova,
A.N. Pronin, D.N. Solntsev, V.D. Sorokin**

RESEARCHES OF INTERASSEMBLY INTERACTION OF COOLANT IN WWER REACTOR CORE OF ATOMIC POWER STATION “TEMELIN” WITH VARIOUS CONSTRUCTIONS TVSA

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

Purpose: The main aim of research was to expose characteristics of interassembly interaction of coolant flow between neighbouring TVSA-12 PLUS and TVSA-T of WWER reactor core.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of scale cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. The local hydrodynamic characteristics of coolant flow have been conducted into a bunch of fuel rods of model. These researches consisted in measurement of velocity vector module, total pressure and static pressure. Measurement have been carried out by means of fivechannel pneumatic probe. Velocity vector was measured in characteristics zones both of FA and of interassembly gap of a core WWER-1000.

Findings: Experimental researches of heat carrier’s hydrodynamics and mass transfer in the experimental model were organized. The features of interassembly interaction of coolant flow between TVSA-12 PLUS and TVSA-T fuel assemblies were revealed.

Research limitations/implications: The obtained experimental information has been generalized, and a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations for reactor cores with FA has been established. Investigations results are used to specify local hydrodynamics and mass transfer characteristics of coolant flow when assessing heat engineering reliability of WWER reactor core.

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 WWER-1000 reactor active zone.

Key words: core, fuel assembly, spacing grid, mixing grid, interassembly interaction, hydrodynamic of coolant.

УДК 621.039.546

С.М. Дмитриев, А.В. Комаров, В.А. Фарафонов

**ПРИМЕНЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В РЕАКТОРАХ ВВЭР СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной статье приведён теплогидравлический расчёт кольцевого тепловыделяющего элемента при сверхкритических параметрах теплоносителя и сделаны соответствующие выводы об условиях работы этих элементов при заданных параметрах.

Ключевые слова: температура, топливо, теплоноситель, оболочка, сердечник.

Введение

В настоящее время реакторы ВВЭР занимают ведущее место в ядерной энергетике и будут сохранять это положение в ближайшие 20 лет. За предшествующие 50 лет создана технология изготовления оборудования и строительства реакторных установок, накоплен значительный опыт эксплуатации. Но к сожалению из-за особенностей физических свойств воды в докритическом состоянии, а именно - слабой зависимости температуры насыщения от давления в интервале свыше 12 МПа - изменения температуры теплоносителя на выходе из реакторов ВВЭР не столь значительны, от 292 до 325°C. Вследствие низкой температуры выхода из реактора КПД установок ограничен $\approx 33\%$ [1].

Наряду с указанным эволюционным путем развития ВВЭР намечается новое научно-техническое направление - разработка корпусных водоохлаждаемых реакторов со сверхкритическим давлением (ВВЭР СКД). Повышение давления до 25 МПа и температуры теплоносителя на выходе из реактора до 540 °C позволяют повысить КПД установок (до 45%) и снизить экологическое воздействие путем уменьшения потерь тепла в термодинамическом цикле от 67 (ВВЭР-1000) до 55% (ВВЭР СКД)[1].

В реакторах ВВЭР-СКД предлагается применить тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) кольцевого типа в которых теплосъём осуществляется как с наружной, так и с внутренней стороны. При использовании кольцевых ТВЭЛов снижается температура топлива и улучшается его теплопроводность, за счет уменьшения толщины топливного слоя [1]. В качестве материала оболочки ТВЭЛА используется нержавеющая сталь X18H10T аустенитного класса [2].

Расчет кольцевого тепловыделяющего элемента реактора ВВЭР-СКД-И

Основная цель теплогидравлического расчёта кольцевого ТВЭЛ реактора ВВЭР-СКД со сверхкритическими параметрами является определение максимальных температур топливного сердечника и определение условий работы топлива. В качестве прототипа выбрана двухконтурная установка ВВЭР-СКД-И со встроенным парогенератором.

Исходные данные и методика расчета

Все расчетные параметры – тепловые потоки, температуры, параметры теплоносителя – определяются для усредненного по активной зоне и максимально нагруженного тепловыделяющего элемента; последние из таких обозначаются индексом max. Расчет проводится для 9 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. Результаты расчета сведены в таблицы и представлены графически.

Далее приведены основные характеристики реактора используемые в расчете:

1. Активная зона

Тепловая мощность реактора

$$Q_T = 2500 \text{ МВт}$$

Высота активной зоны

$$H_0 = 3,5 \text{ м}$$

Экстраполированная добавка к размерам зоны

$$\delta = 0,08 \text{ м}$$

2. Теплоноситель

Среднее давление в активной зоне

$$p = 24,5 \text{ МПа}$$

Температура воды на входе в реактор

$$t_{\text{вх}} = 390^\circ\text{C}$$

Температура воды на выходе из реактора

$$t_{\text{вых}} = 540^\circ\text{C}$$

3. Тепловыделяющая сборка

Материал оболочки ТВЭЛ

Нержавеющая сталь

Ядерное топливо

Диоксид урана (UO₂)

Расположение ТВЭЛов в решетке (упаковка)

Треугольная

Доля энерговыделения в ТВЭле

$$\kappa = 0,94$$

Количество ТВС:

$$n_{\text{ТВС}} = 163$$

Количество ТВЭЛ:

$$n_{\text{ТВЭЛ}} = 312$$

Наружный диаметр ТВЭЛ:

$$d_2 = 11 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр ТВЭЛ:

$$d_1 = 6,5 \text{ мм}$$

Таблица 1

Параметры теплоносителя на входе и на выходе активной зоны

Параметр		Вход в активную зону	Выход из активной зоны
Температура	$t, ^\circ\text{C}$	390	540
Энтальпия	$i, \text{кДж/кг}$	2449	3312
Удельный объем	$\nu, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	5,119	12,741
Плотность	$\rho, \text{кг/м}^3$	195,314	78,488

Теплогидравлический расчет кольцевого ТВЭЛ для реактора ВВЭР-СКД-И[3], [4]

Геометрические характеристики активной зоны ТВЭЛ и ТВС приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Геометрические характеристики активной зоны

Параметр	Значение
Площадь сечения шестиугольной ячейки $f_{\text{яч}}, \text{м}^2$	0,04742
Эквивалентный диаметр активной зоны $D_0, \text{м}$	3,138
Высота активной зоны с учетом экстраполированной добавки $H, \text{м}$	3,66
Объем активной зоны $V, \text{м}^3$	28,29

Таблица 3

Геометрические характеристики ТВЭЛ и ТВС

Параметр		Наружная сторона ТВЭЛа	Внутренняя сторона ТВЭЛа
Диаметр оболочки твэла	$d_{об}, \text{мм}$	9,6	7,9
Диаметр топливного сердечника твэла	$d_c, \text{мм}$	9,4	8,1
Площадь сечения стержней ТВС	$f_{ст}, \text{м}^2$	0,02168	
Проходное сечение ячейки	$S_{яч}, \text{м}^2$	0,02574	
Гидравлический Периметр ТВС	$\Pi_r, \text{м}^2$	17,907	
Площадь сечения стержней	$f_{ст}, \text{м}^2$	0,03203	
Проходное сечение теплоносителя	$S_{яч}, \text{м}^2$	0,01539	0,1035
Гидравлический периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, \text{м}$	11,536	
Гидравлический диаметр сечения для прохода теплоносителя	$d_r, \text{м}$	0,005335	0,0065
Гидравлический диаметр ТВС	$d_r, \text{м}$	0,05749	
Тепловой периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, \text{м}$	10,7895	6,371
Тепловой периметр оболочки твэла	$\Pi_{об}, \text{м}$	9,410	7,743
Тепловой периметр газового зазора твэла	$\Pi_з, \text{м}$	9,214	7,939
Тепловой диаметр теплоносителя	$d_r, \text{м}$	0,0654	

Расчет тепловых потоков и параметров теплоносителя по высоте активной зоны

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны принят (по стандартному проекту ВВЭР), K_V :

$$K_V = 2,6.$$

Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте

$$K_Z = \frac{\pi H_0}{2H \sin \frac{\pi H_0}{2H}} = \frac{\pi \cdot 3,5}{2 \cdot 3,66 \sin \frac{\pi \cdot 3,5}{2 \cdot 3,66}} = 1,51. \quad (1)$$

Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора приходящийся на одну ТВС:
Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на средненагруженный твэл $q_{l,0}$, кВт/м

$$q_{l,0} = \frac{Q_T}{NH_0} \cdot K_Z = \frac{25000000 \cdot 10^3}{163 \cdot 3,5} \cdot 1,51 = 6617. \quad (2)$$

Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на максимально нагруженный ТВЭЛ $q_{l,0}^{\max}$, кВт/м

$$q_{l,0}^{\max} = \frac{Q_T}{NH_0} \cdot K_V = \frac{250000000 \cdot 10^3}{163 \cdot 3,5} \cdot 2,6 = 11394. \quad (3)$$

Расход теплоносителя через активную зону G , кг/с

$$G = \frac{Q}{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}} = \frac{2500}{3312 - 2449} = 2897. \quad (4)$$

Средний расход теплоносителя через одну ТВС $G_{\text{ТВС}}$, кг/с

$$G_{\text{ТВС}} = \frac{G_{\text{корп}}}{n_{\text{ТВС}}} = \frac{2897}{163} = 17.775. \quad (5)$$

Расход теплоносителя в расчете на один ТВЭЛ $G_{\text{ТВ}}$, кг/с

$$G_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{G_{\text{ТВС}}}{n_{\text{ТВЭЛ}}} = \frac{17.775}{312} = 0.057. \quad (6)$$

Значения линейных тепловых потоков в расчетных точках по высоте активной зоны определяются по следующим формулам:

$$q_l(z) = q_{l,0} \cos \frac{\pi z}{H}; \quad q_l^{\max}(z) = q_{l,0}^{\max} \cos \frac{\pi z}{H}. \quad (7)$$

Распределение тепловой нагрузки на единицу поверхности ТВЭла:

$$q_s(z) = \kappa \cdot \frac{q_l(z)}{\pi(d_1 + d_2)}; \quad q_s^{\max}(z) = \kappa \cdot \frac{q_l^{\max}(z)}{\pi(d_1 + d_2)}. \quad (8)$$

В таблице 4 приведены численные значения тепловых потоков, приходящихся на одну ТВС и ТВЭЛ усреднённые по высоте:

Таблица 4
Значения тепловых потоков для ТВЭла и тепловыделяющей сборки

z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
q_l , кВт/м	454	1849	4325	6017	6617	6017	4325	1849	454
q_l^{\max} , кВт/м	783	3192	7465	10384	11419	10384	7465	3192	783

Расчет расходов теплоносителя, омывающего наружную и внутреннюю сторону ТВЭла

Так как теплоноситель поступает во внутренний и внешний каналы из общего объёма и выходит в общий объём, то распределение расходов G_1 и G_2 находим из уравнения равенства перепадов давления:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2. \quad (9)$$

Следует иметь в виду, что перепад давления ΔP в свою очередь зависит от температуры, особенно при значительном подогреве теплоносителя. При использовании водного теплоносителя, подогрев сравнительно невелик, влиянием температуры можно пренебречь, в этом случае:

$$\Delta p = (\xi_m + \xi_{\text{тр}} \frac{H_0}{d_2}) \cdot \frac{\bar{p} \cdot w^2}{2}. \quad (10)$$

Для приближенных расчётов принимаем $\xi_{\text{тр}} = 0,016$.

Коэффициент местного сопротивления для теплоносителя, омывающего наружную сторону твэла, складывается из сопротивлений 15 дистанционирующих решёток, коэффициент местного сопротивления которых равен 0,6, поэтому $\xi_m = 9$.

Коэффициент местного сопротивления для теплоносителя, омывающего внутреннюю сторону твэла, складывается из сопротивлений на входе во внутренний канал (внезапное сужение) и из сопротивления на выходе из внутреннего канала (внезапное расширение), поэтому $\xi_{m1} = 1,5$.

Тогда

$$\Delta p_1 = (\xi_m + \xi_{тр}) \frac{H_0}{d_{r1}} \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot w_1^2}{2}, \quad (11)$$

$$\Delta p_2 = (\xi_m + \xi_{тр}) \frac{H_0}{d_{r2}} \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot w_2^2}{2}. \quad (12)$$

Плотность в этих выражениях $\rho = 584,954$ берётся при средней температуре теплоносителя.

Расходы теплоносителя, охлаждающего внутреннюю и наружную сторону твэла, соответственно равны:

$$G_1 = w_1 \cdot \bar{\rho} \cdot S_{яч1}, \quad (13)$$

$$G_2 = w_2 \cdot \bar{\rho} \cdot S_{яч2}. \quad (14)$$

Дополнив эти уравнения очевидным неравенством $G = G_1 + G_2$, получим систему уравнений, из которой находим

$$G_1 = 8,542 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad G_2 = 9,233 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad w_1 = 6,346 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad w_2 = 4,782 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Расчет среднего коэффициента теплоотдачи

Средние значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha(z)$ на участках вокруг расчетных точек могут быть рассчитаны по формулам

$$\text{Nu}(z) = A \cdot (\text{Re}(z))^{0,8} (\text{Pr}(z))^{0,4}. \quad (15)$$

$$\text{Nu}(z)^{\max} = A \cdot (\text{Re}^{\max}(z))^{0,8} (\text{Pr}^{\max}(z))^{0,4}.$$

где A – коэффициент, зависящий от способа упаковки твэлов в ТВС;

$\text{Nu}(z)$, $\text{Nu}^{\max}(z)$ – средние на расчетных участках значения чисел Нуссельта;

$\text{Re}(z)$, $\text{Re}^{\max}(z)$ – на расчетных участках средние числа Рейнольдса.

При треугольной упаковке твэлов A рассчитывается по формуле

$$A = 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91\chi - 2) \cdot \chi, \quad \chi = 0,15 = 0,0278 \quad (16)$$

Для чисел Нуссельта и Рейнольдса имеют место соотношения:

$$\text{Nu}(z) = \frac{\alpha(z) \cdot d_z}{\lambda(z)}; \quad \text{Nu}^{\max} = \frac{\alpha^{\max}(z) \cdot d_r}{\lambda^{\max}(z)} \quad (17)$$

$$\text{Re}(z) = \frac{w(z) \cdot d_r}{\nu(z)}; \quad \text{Re}^{\max} = \frac{w^{\max}(z) \cdot d_r}{\nu^{\max}(z)} \quad (18)$$

$$w(z) = \frac{G_i}{s_{яч} \cdot \rho(z)}; \quad w^{\max}(z) = \frac{G_i}{s_{яч} \cdot \rho^{\max}(z)}. \quad (19)$$

где $w(z)$ и $w^{\max}(z)$ – скорость теплоносителя в расчетных точках в ячейке со средненагруженным и максимально нагруженным твэлами соответственно.

Значения коэффициентов теплоотдачи, определяемые по формулам:

$$\alpha(z) = \frac{\lambda(z)}{d_r} \cdot \text{Nu}(z), \quad (20)$$

$$\alpha^{\max}(z) = \frac{\lambda^{\max}(z)}{d_r} \cdot \text{Nu}^{\max}(z) \quad (21)$$

Расчет температурного поля твэлов

На рис. 1 представлен разрез твэла и распределение поля температур в нем

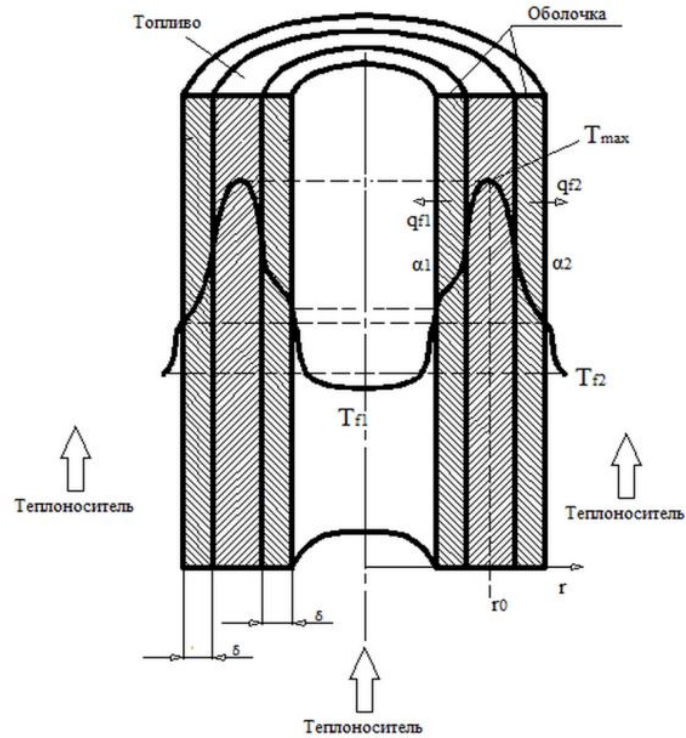


Рис. 1. Распределение температур в кольцевом твэле

Теплоноситель общим расходом G поступает на вход в канал с температурой T_1 , омывает кольцевой твэл как внутри, так и снаружи и на выходе из твэла после смещения имеет температуру T_2 . Поскольку теплоотвод идёт в обе стороны, внутри топливного сердечника устанавливается нейтральная поверхность, представляющая собой для любого сечения окружность радиусом r_0 , на которой температура сердечника T_c максимальна. При этом тепловой поток разделяется на два $q_{li}(x)$ -направленный внутрь и $q_{li2}(x)$ -направленный наружу.

В общем случае нейтральный радиус r_0 зависит от z . На входе в твэл $T_{T1}(x) = T_{T2}(x) = T_1$, соответственно известны теплофизические параметры теплоносителя для этого сечения. По известным данным можно найти в конечном итоге коэффициенты теплоотдачи от стенки к теплоносителю во внутреннем и наружном каналах.

Распределение температуры наружной поверхности оболочки твэла по высоте активной зоны

$$t_{об}^H(z) = t_{Ti}(z) + \kappa \cdot \frac{q_{li}(z)}{\prod_{Ti} \alpha(z) \cdot c_{pi}}, \quad (22)$$

$$\left(t_{обi}^H\right)^{\max}(z) = t_{Ti}^{\max}(z) + \kappa \cdot \frac{q_l^{\max}(z)}{\prod_{Ti} \alpha^{\max}(z) \cdot c_{pi}^{\max}}. \quad (23)$$

По среднему значению температуры наружной поверхности оболочки твэла, равному примерно 600°C , из таблиц теплофизических свойств циркония определяем теплопроводность оболочки твэла: $\lambda_{об} = 24,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Температура внутренней поверхности оболочки ТВЭЛа

$$t_{об}^{BH}(z) = t_{об}^H(z) + \kappa \cdot \frac{q_{li}(z)\delta_{об}}{\Pi_{об} \lambda_{об}}, \quad (24)$$

$$(t_{об}^{BH})^{max}(z) = (t_{об}^H)^{max}(z) + \kappa \cdot \frac{q_l^{max}(z)\delta_{об}}{\Pi_{об} \lambda_{об}}. \quad (25)$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для внутренней стороны ТВЭЛа:

$$\begin{aligned} \delta_{заз}/d_{вн1} &= 0,0127, \\ \alpha_{заз1} &= f(\delta_{заз}/d_{вн1}) = 3 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для наружной стороны ТВЭЛа:

$$\begin{aligned} \delta_{заз}/d_{вн2} &= 0,0104, \\ \alpha_{заз2} &= f(\delta_{заз}/d_{вн2}) = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Температура наружной поверхности топливного сердечника

$$t_c^H(z) = t_{об}^{BH}(z) + \kappa \cdot \frac{q_l(z)}{\Pi_3 \alpha_{заз}}, \quad (26)$$

$$(t_c^H)^{max}(z) = (t_{об}^{BH})^{max}(z) + \kappa \cdot \frac{q_l^{max}(z)}{\Pi_3 \alpha_{заз}}. \quad (27)$$

Для определения температуры внутренней поверхности топливного сердечника в расчетных точках необходимо знать теплопроводность топливного сердечника. Так как теплопроводность диоксида урана обратно пропорциональна температуре топлива, то теплопроводность будем рассчитывать по максимальной температуре, которая устанавливается на нейтральной поверхности, расположенной на радиусе r_0 , так как теплопроводность при этой температуре будет наименьшая.

Теплопроводность топливного сердечника при температуре t_c рассчитывается по зависимости:

$$\lambda_c(t_c) = \frac{4 \cdot 10^3}{130 + (t_c + 273)} + 3,4 \cdot 10^{-14} \cdot (t_c + 273)^4. \quad (28)$$

Температура топливного сердечника с наружной стороны

$$t_{c2}(z) = t_{c2}^H(z) + \kappa \cdot \frac{q_{l2}(z)}{4\pi\lambda_c(z)} \cdot \left(1 - \frac{2r_0^2(z)}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - r_0^2(z)} \cdot \ln \frac{\frac{d_2}{2}}{r_0(z)} \right). \quad (29)$$

Максимальная температура топливного сердечника с наружной стороны:

$$(t_{c2})^{max}(z) = (t_{c2}^H)^{max}(z) + \kappa \cdot \frac{q_{l2}^{max}(z)}{4\pi\lambda_c^{max}(z)} \cdot \left(1 - \frac{2r_{0max}^2(z)}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - r_{0max}^2(z)} \cdot \ln \frac{\frac{d_2}{2}}{r_{0max}(z)} \right). \quad (30)$$

Температура топливного сердечника с внутренней стороны:

$$t_{c1}(z) = t_{c1}^H(z) + \kappa \cdot \frac{q_{l1}(z)}{4\pi\lambda_c(z)} \cdot \left(\frac{2r_0^2(z)}{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + r_0^2(z)} \cdot \ln \frac{r_0(z)}{\frac{d_1}{2}} - 1 \right). \quad (31)$$

Максимальная температура топливного сердечника с внутренней стороны:

$$(t_{c1})^{\max}(z) = (t_{c1}^H)^{\max}(z) + \kappa \cdot \frac{q_{l2}^{\max}(z)}{4\pi\lambda_c^{\max}(z)} \cdot \left(\frac{2r_{0\max}^2(z)}{-(\frac{d_2}{2})^2 + r_{0\max}^2(z)} \cdot \ln \frac{r_{0\max}(z)}{\frac{d_1}{2}} \right). \quad (32)$$

Очевидно, что температура топливного сердечника одна, и не важно с какой стороны мы будем её находить, поэтому можно записать очевидное равенство:

$$T_{c1}(z) = T_{c1}(z), \quad (33)$$

$$(T_{c1}(z))^{\max} = (T_{c2}(z))^{\max}.$$

Вполне очевидно, что сумма тепловых потоков $q_{l1}(z)$ и $q_{l2}(z)$ равна общему тепловому потоку $q_l(z)$

$$q_l(z) = q_{l1}(z) + q_{l2}(z), \quad (34)$$

$$q_l(z)_{\max} = q_{l1}(z)_{\max} + q_{l2}(z)_{\max}.$$

Если предположить, что объёмное тепловыделение по сечению кольцевого ТВЭЛ постоянно, то получаем:

$$q_{l1}(z) = q_l(z) \cdot \left(\frac{r_0^2(z) - (\frac{d_1}{2})^2}{(\frac{d_2}{2})^2 - (\frac{d_1}{2})^2} \right) \quad q_{l1}^{\max}(z) = q_l^{\max}(z) \cdot \left(\frac{r_{0\max}^2(z) - (\frac{d_1}{2})^2}{(\frac{d_2}{2})^2 - (\frac{d_1}{2})^2} \right) \quad (35)$$

$$q_{l2}(z) = q_l(z) \cdot \left(\frac{-r_0^2(z) + (\frac{d_2}{2})^2}{(\frac{d_2}{2})^2 - (\frac{d_1}{2})^2} \right) \quad q_{l2}^{\max}(z) = q_l(z) \cdot \left(\frac{-r_{0\max}^2(z) + (\frac{d_2}{2})^2}{(\frac{d_2}{2})^2 - (\frac{d_1}{2})^2} \right)$$

Решая систему уравнений, в конечном итоге находим $q_{l1}(z)$ и $q_{l2}(z)$. Далее находим энтальпию теплоносителя в следующей точке по уравнениям

$$h(z) = h_{1\text{ВХ}} + \frac{q_{l1} \cdot \Delta z}{G_1} \quad h(z)^{\max} = h_{1\text{ВХ}}^{\max} + \frac{q_{l1}^{\max} \cdot \Delta z}{G_1} \quad (36)$$

$$h(z) = h_{2\text{ВХ}} + \frac{q_{l2} \cdot \Delta z}{G_2} \quad h(z)^{\max} = h_{2\text{ВХ}}^{\max} + \frac{q_{l2}^{\max} \cdot \Delta z}{G_2}.$$

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку ТВЭЛ, приведены в табл. 5:

Таблица 5

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку ТВЭЛ

Координата рас- четной точки	z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
Энтальпия	h_1 , кДж/кг	2449	2476	2599	2771	2960	3131	3255	3308	3315
	h_1^{\max} , кДж/кг	2449	2540	2753	3050	3372	3668	3880	3971	3982
Температура	t_{T1} , °C	389,8	391,1	399,2	417,7	449,6	489	522,9	538,7	540,6
	t_{T1}^{\max} , °C	389,8	394,8	415,3	468,7	558,4	659,2	737,4	771,6	775,8

Окончание табл. 5

Координата расчетной точки	z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
Удельный объем	$v_l, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	5,12	5,316	6,287	7,743	9,449	11,05	12,21	12,7	12,77
	$v_l^{\text{max}}, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	5,12	5,814	7,585	10,27	13,33	16,01	17,89	18,68	18,78
Плотность	$\rho_l, \text{ кг}/\text{м}^3$	195,3	188,1	159,1	129,1	105,8	90,5	81,9	78,71	78,34
	$\rho_l^{\text{max}}, \text{ кг}/\text{м}^3$	195,3	172,1	131,8	97,35	75,21	62,46	55,88	53,53	53,25
Изобарная теплоемкость	$c_{p1}, \text{ кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	22,63	19,97	12,21	7,364	4,976	3,891	3,433	3,29	3,275
	$c_{p1}^{\text{max}}, \text{ кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	22,63	15,15	7,414	4,334	3,151	2,783	2,675	2,649	2,647
Теплопроводность	$\lambda_1, \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	0,2027	0,1921	0,1533	0,1216	0,1044	0,0984	0,0976	0,0980	0,0980
	$\lambda_1^{\text{max}}, \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	0,2027	0,1697	0,124	0,1005	0,0988	0,1068	0,115	0,1192	0,1197
Динамическая вязкость	$\mu_1, 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$	3,036	2,997	2,871	2,818	2,88	3,014	3,142	3,203	3,211
	$\mu_1^{\text{max}}, 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$	3,036	2,921	2,818	2,942	3,28	3,672	3,967	4,093	4,108
Кинематическая вязкость	$\nu_1, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	1,555	1,593	1,805	2,182	2,721	3,333	3,837	4,07	4,099
	$\nu_1^{\text{max}}, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	1,555	1,698	2,137	3,022	4,362	5,879	7,099	7,647	7,715
Число Прандтля	Pr_1	3,39	3,117	2,286	1,707	1,372	1,191	1,104	1,075	1,072
	Pr_1^{max}	3,39	2,606	1,753	1,269	1,046	0,9572	0,9214	0,91	0,9088

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла

Координата расчетной точки	z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
Энтальпия	$h_2, \text{ кДж}/\text{кг}$	2449	2501	2620	2727	2970	3137	3257	3308	3315
	$h_2^{\text{max}}, \text{ кДж}/\text{кг}$	2449	2538	2745	3034	3351	3640	3847	3936	3947
Температура	$t_{t2}, ^\circ\text{C}$	389,8	392,4	400,9	419,9	451,8	490,3	523,4	538,6	540,6
	$t_{t2}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	389,8	394,7	414,4	465,3	551,9	649,3	725,1	758,3	762,4
Удельный объем	$v_2, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	5,12	5,506	6,455	7,88	9,542	11,1	12,22	12,7	12,76
	$v_2^{\text{max}}, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	5,12	5,797	7,519	10,13	13,11	15,76	17,61	18,83	18,47
Плотность	$\rho_2, \text{ кг}/\text{м}^3$	195,3	181,6	154,9	126,9	104,8	90,12	81,81	78,72	78,35
	$\rho_2^{\text{max}}, \text{ кг}/\text{м}^3$	195,3	172,1	131,8	97,35	75,21	62,46	55,88	53,53	53,25
Изобарная теплоемкость	$c_{p2}, \text{ кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	22,63	17,86	11,41	7,085	4,893	3,868	3,429	3,291	3,275
	$c_{p2}^{\text{max}}, \text{ кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	22,63	15,28	7,869	4,428	3,192	2,804	2,687	2,658	2,655

Окончание табл. 6

Координата расчетной точки	z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
Теплопроводность	λ_2 , Вт/м·К	0,2027	0,1828	0,1484	0,1196	0,1039	0,0985	0,0978	0,098	0,0987
	λ_2^{\max} , Вт/м·К	0,2027	0,1704	0,1251	0,101	0,0981	0,1058	0,1138	0,117	0,1181
Динамическая вязкость	μ_2 , 10^{-6} Па·с	3,036	2,965	2,858	2,819	2,886	3,019	3,144	3,203	3,211
	μ_2^{\max} , 10^{-6} Па·с	3,036	2,923	2,818	2,93	3,255	3,634	3,921	4,044	4,059
Кинематическая вязкость	ν_2 , 10^{-6} м ² /с	1,555	1,632	1,845	2,221	2,754	3,35	3,843	4,069	4,098
	ν_2^{\max} , 10^{-6} м ² /с	1,555	1,694	2,119	2,969	4,267	5,727	6,904	7,433	7,499
Число Прандтля	Pr_2	3,39	2,895	2,198	1,671	1,359	1,187	1,104	1,076	1,072
	Pr_2^{\max}	3,39	2,621	1,773	1,285	1,055	0,9632	0,926	0,914	0,9129

Расчётные скорости теплоносителя, числа Рейнольдса, числа Нуссельта, а также коэффициент теплоотдачи занесём в табл. 7.

Таблица 7

Сводная таблица

z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
w_1 , м/с	4,147	4,305	5,090	6,273	7,655	8,949	9,888	10,289	10,3378
w_1^{\max} , м/с	4,147	4,706	6,145	8,319	10,768	12,966	14,492	15,1289	15,208
w_2 , м/с	3,0718	3,304	3,873	4,728	5,724	6,657	7,333	7,621	7,657
w_2^{\max} , м/с	3,0718	3,486	4,552	6,163	7,977	9,605	10,736	11,207	11,2663
Re_1 , 10^5	1,747	1,770	1,847	1,883	1,843	1,759	1,688	1,656	1,652
Re_1^{\max} , 10^5	1,747	1,815	1,883	1,803	1,617	1,445	1,337	1,296	1,291
Re_2 , 10^5	1,053	1,079	1,119	1,135	1,108	1,059	1,017	0,998	0,996
Nu_1	707,779	691,791	632,232	571,258	514,439	468,318	439,674	428,378	427,083
Nu_1^{\max}	707,779	657,020	577,432	490,054	415,726	366,640	339,453	329,389	328,267
Nu_2	472,111	451,961	416,757	377,653	341,144	311,744	293,168	285,875	284,904
Nu_2^{\max}	472,111	440,090	389,544	333,207	283,199	250,365	231,990	225,174	224,399
α_1 , кВт/м ² К	21,903	20,289	14,797	10,605	8,200	7,038	6,558	6,410	6,396
α_1^{\max} , кВт/м ² К	21,903	17,022	10,932	7,519	6,272	5,978	5,960	5,994	5,999
α_2 , кВт/м ² К	17,954	15,501	11,604	8,474	6,650	5,752	5,372	5,257	5,242
α_2^{\max} , кВт/м ² К	17,954	14,070	9,143	6,314	5,234	4,970	4,953	4,968	4,972

Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках по высоте активной зоны даны в табл. 8.

Таблица 8

Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках

z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
q_{l1} , кВт/м	221,5	902,4	2110,6	2935,6	3228,8	2935,6	2110,6	902,4	221,5
q_{l1}^{\max} , кВт/м	381,5	1553,8	3634,1	5055,3	5559,5	5055,3	3634,1	1553,8	381,5
q_{l2} , кВт/м	232,5	947,0	2214,8	3080,9	3388,2	3080,9	2214,8	947,0	232,5
q_{l2}^{\max} , кВт/м	402,1	1637,8	3830,6	5328,5	5860,0	5328,5	3830,6	1637,8	402,1
t_{o61}^H , °C	389,800	391,100	399,202	417,706	449,612	489,016	522,914	538,706	540,602
$(t_{o61}^H)^{\max}$, °C	389,800	394,801	415,307	468,723	558,442	659,245	737,434	771,614	775,804
t_{o62}^H , °C	389,800	392,400	400,901	419,904	451,809	490,312	523,410	538,605	540,601
$(t_{o62}^H)^{\max}$, °C	389,800	394,701	414,405	465,317	551,931	649,333	725,125	758,311	762,403
t_{o61}^{BH} , °C	390,566	394,221	406,501	427,858	460,778	499,168	530,213	541,827	541,368
$(t_{o61}^{BH})^{\max}$, °C	390,220	396,509	419,303	474,282	564,555	664,804	741,430	773,323	776,223
t_{o62}^{BH} , °C	390,461	395,092	407,197	428,662	461,440	499,070	529,706	541,296	541,262
$(t_{o62}^{BH})^{\max}$, °C	390,943	399,356	425,293	480,463	568,588	664,480	736,013	762,966	763,546
t_{c1}^H , °C	399,342	429,967	490,106	544,142	588,678	615,452	613,819	577,573	550,144
$(t_{c1}^H)^{\max}$, °C	405,275	457,834	562,733	673,802	783,975	864,324	884,860	834,648	791,278
t_{c2}^H , °C	402,973	446,057	526,397	594,476	643,792	664,884	648,906	592,261	553,774
$(t_{c2}^H)^{\max}$, °C	409,588	475,303	602,924	727,558	840,328	911,575	913,645	838,914	782,191
λ_c , Вт/м·К	4,969	4,718	4,291	3,980	3,784	3,712	3,784	4,020	4,193
λ_c^{\max} , Вт/м·К	4,916	4,503	3,848	3,369	3,058	2,922	2,960	3,186	3,367
t_c , °C	403,204	446,473	532,427	607,409	661,765	683,244	661,597	596,798	554,673
t_c^{\max} , °C	411,992	487,497	643,505	801,648	938,645	1011,60	989,554	876,258	801,003

Выводы

1. Температурный уровень теплоносителя и твэлов, а также тепловые нагрузки лежат в пределах допустимых величин. Максимальная температура топливного сердечника твэла в наиболее энергонапряженном твэле не превышает 1011°C; следовательно в реакторе существует запас по температуре топлива. Сравнивая с тем же параметром для стержневого твэла, можно сделать вывод что топливо в кольцевом твэле работает в более благоприятных условиях, что значительно улучшает его свойства.

2. Снижение температуры топлива способствует уменьшению температурных градиентов в топливе и увеличению теплопроводности.

3. Кольцевые твэлы могут быть эффективно использованы в реакторных установках со сверхкритическими параметрами, однако требуется экспериментально проверить корро-

зионную стойкость данной оболочки при высоких температурах теплоносителя. Также рекомендуется оребрение ТВЭЛ и-за высоких скоростей на выходе из активной зоны реактора.

Библиографический список

1. **Кириллов, П.Л.** Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР-СКД) // Водо-водяные энергетические реакторы сверхкритического давления. 2006. С. 16–27.
2. **Герасимов, В.В.** Материалы ядерной техники: учебник для вузов / В.В.Герасимов, А.С. Монахов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 288 с.
3. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчётам / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
4. **Дмитриев, С.М.** Краткий курс тепломассообмена: учеб. пособие / С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2008. –144 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2015*

S. M. Dmitriev, A. V. Komarov, V. A. Farafonov

THE USE OF ANNULAR FUEL ELEMENTS IN VVER REACTORS WITH SUPERCRITICAL PARAMETERS

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

Purpose: The main purpose of the thermal-hydraulic calculation of reactors with supercritical parameters is to set the heat flux and temperature on the reactor core, to find the maximum fuel temperature to confirm the impossibility of melting in the fuel elements with high thermal load.

Design/methodology/approach: All the thermal-hydraulic parameters - heat flow, temperature, coolant parameters, hydraulic resistance - are determined for the average over the active zone and the maximally loaded fuel element (cell). The calculation is carried out for 9 points on the core height coordinates $z = -1,75; -1,50; -1,00; -0,50; 0,00; 0,50; 1,00; 1,50; 1,75$ m. Calculation results are summarized in the table.

Findings: The resulting temperature field of fuel rods suggests that thermal loads are within acceptable limits.

Research limitations/implications: Annular fuel elements can be effectively used in the reactor units with supercritical parameters but require experimental verification of the high corrosion resistance of the membranes at high water temperatures.

Originality/value: The originality of this article is to identify the benefits of the annular fuel rods in VVER reactors with supercritical parameters. Also, the working conditions of these fuel rods are determined for the given parameters.

Key words: temperature, fuel, coolant, shell core.

УДК 621.039

А.А. Баринов¹, С.М. Дмитриев¹, Е.Д. Игнатов¹, А.А. Табекин¹,
А.А. Хлюнев², А.Е. Хробостов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «ВЗОР»², г. Н. Новгород

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов течения среды в каналах с помощью метода матричной кондуктометрии. Выявлены оптимальные параметры работы измерительной схем. Получены основные гидродинамические характеристики турбулентного потока среды в канале круглого сечения. Проведен анализ полученных результатов на предмет применимости метода матричной кондуктометрии к исследованию гидродинамических процессов.

Ключевые слова: ядерный реактор, гидродинамика, турбулентные пульсации, кондуктометрия, сетчатый датчик.

Введение

Гидродинамические процессы, происходящие при движении теплоносителя, оказывают существенное влияние на работу оборудования ядерных энергетических установок. В этой связи возникает необходимость проведения комплекса экспериментальных исследований по выявлению закономерностей и особенностей течения среды в элементах ЯЭУ [1]. Ввиду сложности протекающих процессов подобные исследования требуют использования методов, обеспечивающих высокое пространственное и временное разрешение. Этим требованиям удовлетворяет метод матричной кондуктометрии. Отработку данного метода целесообразно выполнять на каналах простой геометрии ввиду наличия точных и представительных результатов предыдущих исследований.

Экспериментальный стенд

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан экспериментальный стенд для исследования теплообменных процессов в каналах различной формы, представляющий собой два независимых гидравлических контура, через которые прокачивается специально подготовленная вода. Основными элементами гидравлического контура являются: экспериментальная модель (ЭМ); сетчатый датчик; ресивер; насосы; питательные баки, дренажный бак, трубопроводы и арматура. В состав стенда также входят: измерительный комплекс; блок управления. Схема стенда приведена на рис. 1.

Принудительная циркуляция среды в обоих контурах обеспечивается вихревыми центробежными насосами. Значение максимального расхода по основному потоку выбрано из условия обеспечения турбулентного режима движения среды в модели. Для удаления механических загрязнений в каждой ветке трубопровода установлены фильтры грубой очистки.

Существует возможность организовать следующие режимы циркуляции:

- 1) циркуляция через модель со сливом в дренажный бак;
- 2) циркуляция через модель с возвратом в питательный бак запаса пресной воды;
- 3) циркуляция через модель с возвратом в питательный бак запаса соленой воды;
- 4) циркуляция с возвратом в питательные баки по байпасной ветке, минуя модель (режим используется в пуско-наладочных работах, при ремонте-обслуживании).

Расход среды в основном потоке контролируется с помощью крыльчатого расходомера

ра, частота вращения которого однозначно связана с расходом среды. Регулировка и контроль расхода трассера осуществлялись с помощью малорасходного ротаметра с верхним пределом измерений 0,0025 л/ч.

Питательные баки расположены на определенной высоте для обеспечения необходимого геометрического подпора насосов.

Контроль параметров сред основного потока и трассера осуществлялся с помощью двуканального кондуктометра, позволяющего одновременно измерять проводимость и температуру. Измерительные датчики закреплены на трубопроводе вблизи от места подачи сред в экспериментальную модель.

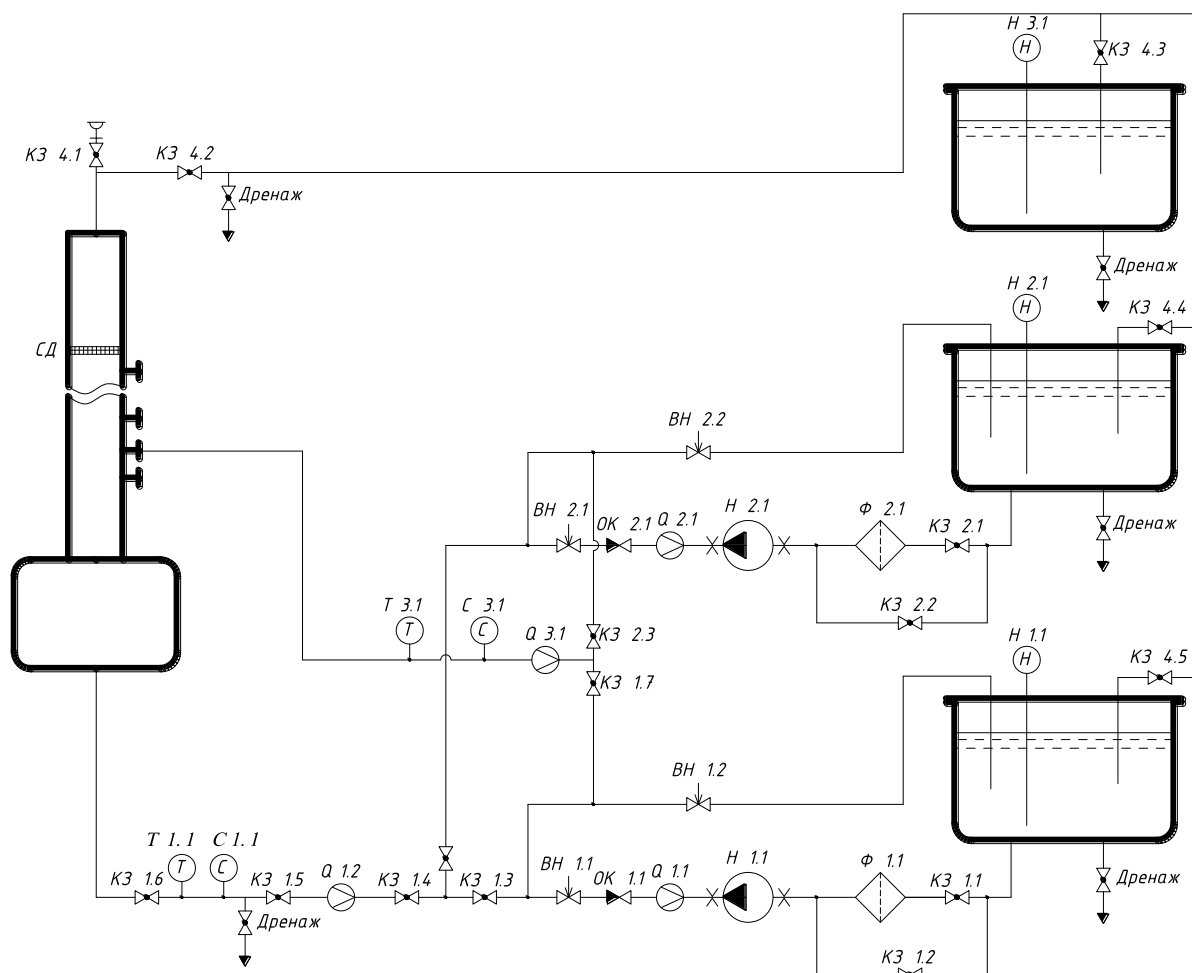


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда

Экспериментальная модель представляет собой канал круглого поперечного сечения, с внутренним диаметром 60 мм. Длина модели выбрана с учетом протяженности участка гидродинамической стабилизации потока. Предусмотрена возможность подачи трассера на различных расстояниях от плоскости сетчатого датчика. Крепление модели к ресиверу и сетчатому датчику осуществляется с помощью фланцевого соединения с резиновым уплотнением. В верхней крышки модели предусмотрен штуцер воздухоудаления.

Сетчатый датчик состоит из двух групп проволочных электродов, лежащих в параллельных плоскостях. Слои электродов разнесены на определенное расстояние и повернуты друг относительно друга на угол 90° . Первая группа проволочных электродов является возбудителями (генераторами опорных сигналов), а вторая – приемниками сигнала. Область, расположенная между генерирующим и приемным электродом в месте их видимого пересечения, образует электрохимическую ячейку. Электрические параметры этой ячейки зависят от таких факторов, как: материал проволочных электродов, геометрия ячейки, характери-

ки заполняющей ячейку среды и параметры измерительного сигнала. Измерительная область сетчатого датчика формируется совокупностью электрохимических ячеек, образованных парой электродов генератор-приемник. Изображение датчика приведено на рис. 2.

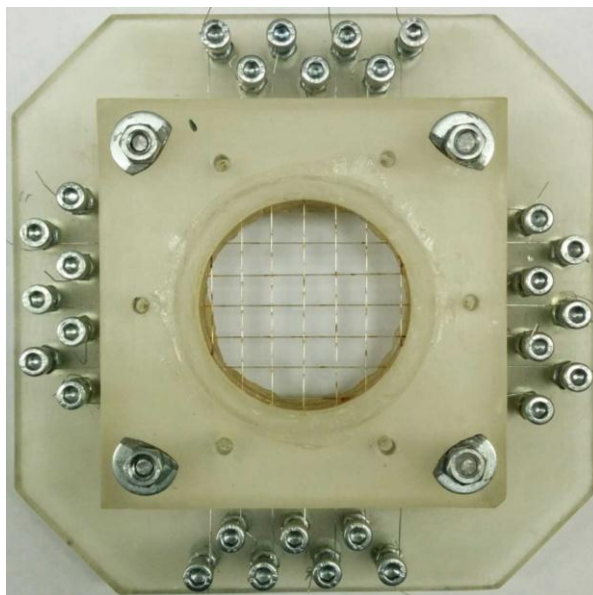


Рис. 2. Сетчатый датчик

При эмпирическом исследовании гидродинамических процессов удобно использовать двухкомпонентные среды, в которых изменение некоторого характерного параметра, вызванное конвективным и диффузионным обменами вещества, будет определять тепломассообмен. Таким характерным показателем может выступать температура, концентрация, электропроводность [2].

Работа сетчатого датчика связана с измерением электрических параметров среды, а именно, составляющих полной комплексной проводимости. Эквивалентную схему замещения измерительной ячейки можно представить в виде параллельно соединенных емкости и сопротивления (рис. 3).

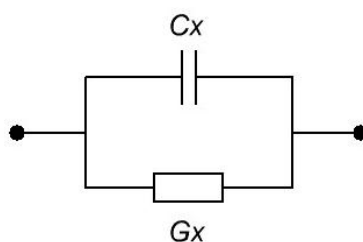


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения

При исследовании однофазного потока определяемой величиной является удельная электрическая проводимость λ , которая однозначно связана с солесодержанием в среде, заполняющей ячейку датчика. При этом используется измерительный сигнал частотой порядка десятков кГц, что делает вклад емкостной составляющей проводимости пренебрежимо малым. Проводимость ячейки в таком случае целиком определяется активной составляющей, связанной с удельной электрической проводимостью среды представленным соотношением.

$$G_x = \lambda / k_r, \quad (1)$$

где k_r [1/см] – геометрический фактор ячейки.

Измеряемой величиной являлся уровень напряжения сигнала, снимаемого с приемных электродов сетчатого датчика, который затем пересчитывался в удельную электрическую проводимость среды. Стоит отметить, что при одинаковой удельной проводимости среды в

сечении сетчатого датчика значения напряжения для разных измерительных ячеек существенно различаются. По этой причине возникает необходимость получения калибровочных зависимостей для пересчета измеренных значений напряжения в удельную проводимость среды для каждой измерительной ячейки.

В состав измерительного комплекса входят генератор измерительного сигнала, универсальный блок коммутации и измерений Agilent 34980A, осциллограф, плата нормирующих преобразователей, ЭВМ с программным обеспечением.

Использовался синусоидальный измерительный сигнал частотой 40 кГц, амплитудой 1 В. Данные параметры являются оптимальными с точки зрения работы измерительной системы. Контроль значений параметров измерительного сигнала осуществлялся с помощью осциллографа.

В состав Agilent 34980A входит базовый блок с 8 гнездами для установки сменных измерительных или коммутационных модулей, встроенный 6,5 разрядный мультиметр, позволяющий выполнять 11 видов измерений со скоростью до 2000 отсчетов в секунду. Одновременно в Agilent 34980A может быть установлено до 8 различных сменных модулей, каждый из которых может быть индивидуально сконфигурирован. Кроме того, существует возможность индивидуального конфигурирования каждого канала в пределах измерительного модуля. Взаимодействие блока измерения с ЭВМ осуществлялось с помощью стандартного интерфейса Ethernet.

Плата нормирующих преобразователей предназначена для согласования работы датчика с блоком коммутации и измерений. Архитектура платы выполнена на основе операционных усилителей.

Разработанный программный комплекс «Кондуктометрия» представляет собой компьютерный интерфейс для управления и постоянного мониторинга данных, получаемых с сетчатого датчика. В программном комплексе реализованы возможности построения распределения измеряемого сигнала, записи значений в файл, построение энергетических спектров, расчет автокорреляционных функций.

Методика исследований

Метод матричной кондуктометрии основан на отслеживании динамики переноса и распространения электрически контрастного трассера. В качестве трассера используется водный раствор соли NaCl, его кинематическая вязкость и плотность слабо зависят от соледержания в широком диапазоне температур. Этот факт дает возможность считать влияние эффекта плавучести пренебрежимо малым, что положительно сказывается на точности результатов.

Сильное размытие среды в поперечном сечении турбулентного потока обуславливает необходимость использования высокопроводящих растворов в качестве трассера [3]. Из условий обеспечения необходимой чувствительности измерительной системы были выбраны следующие значения удельной электрической проводимости сред: для основного потока – 450 мкСм/см; для трассера – 20 000 мкСм/см.

Методика проведения исследований гидродинамических процессов течения среды заключалась в следующем: солевой трассер через инъекционный капилляр изокинетически подавался в центр канала соосно направлению потока. С помощью сетчатого датчика проводился замер уровня напряжения в каждой измерительной ячейке в характерных сечениях (рис.4) по длине экспериментальной модели.

В качестве величины, характеризующей концентрацию среды-трассера в ячейках датчика, удобно использовать безразмерную относительную концентрацию - измерительный скаляр $\varphi_{i,j}$ [4]:

$$\varphi_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{\text{фон}i,j}}{\frac{\lambda_{\text{трассер}}}{\lambda_{\text{опорн}}} * U_{\text{опорн}i,j} - U_{\text{фон}i,j}} \quad (2)$$

где $U_{i,j}$ – измеряемый сигнал ячейки i, j ; $U_{\text{фон}i,j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, за-

полненного средой основного потока с некоторым балансным (фоновым) солесодержанием; $\lambda_{\text{трассер}}$ – удельная проводимость трассера; $\lambda_{\text{опорн}}$ – удельная проводимость калибровочного (опорного) раствора; $U_{\text{опорн},j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, заполненного калибровочным раствором. В результате калибровки находятся значения; $U_{\text{опорн},j}$ для всех ячеек датчика.

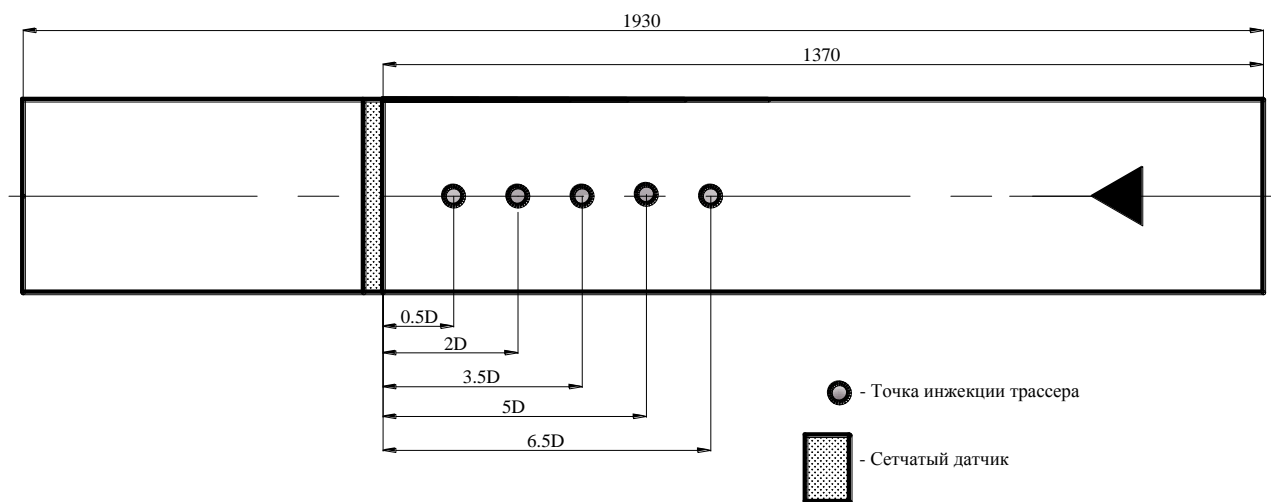


Рис. 4. Продольное сечение ЭМ

На основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости радиального распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

Турбулентное движение жидкости сопровождается возникновением неупорядоченных турбулентных структур – вихрей. Такого рода процессы наиболее эффективно описываются статистически. Важнейшими статистическими характеристиками турбулентности являются средние масштабы вихревых структур и интенсивность турбулентных пульсаций [5]. Для их определения использовался частотно-энергетический спектр пульсаций, который был построен на основе колебаний значений концентрации трассера. С целью определения характерных размеров вихрей, полученные значения энергетического спектра умножались на соответствующие значения волновых чисел.

Результаты исследования гидродинамических процессов течения среды

На основе анализа экспериментальных данных были получены следующие результаты:

1. Определена зависимость измерительного скаляра от времени (рис. 5) для центральной ячейки датчика (расстояние от инъекционного капилляра до сечения датчика $3,5D$).

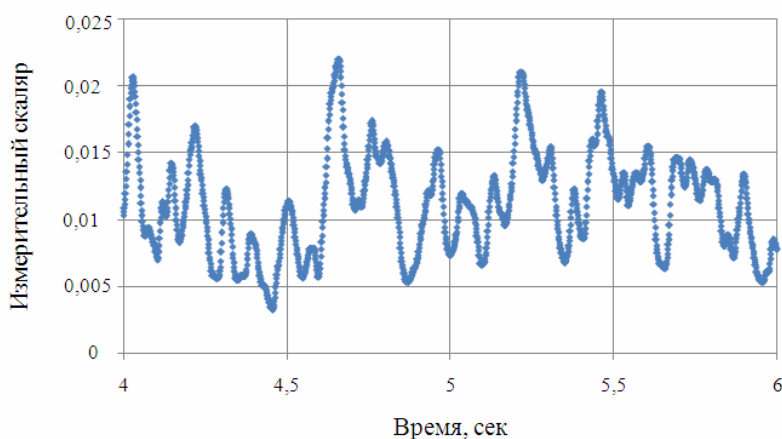


Рис. 5. Зависимость измерительного скаляра от времени

Из полученных зависимостей определялись средние по времени значения, а также пульсационные составляющие измерительного скаляра для каждой ячейки сетчатого датчика. Усредненные значения использовались для построения распределения измерительного скаляра, а на основе пульсационных составляющих строился частотно-энергетический спектр.

2. Получено распределение измерительного скаляра по сечению ЭМ при различных положениях инжекционного капилляра (рис. 6).

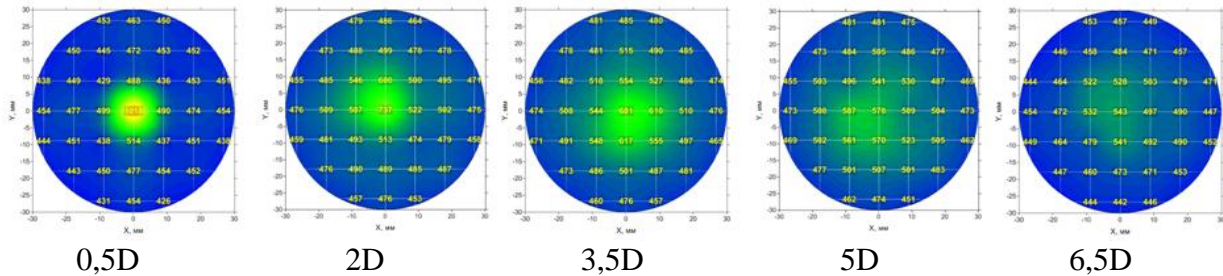


Рис. 6. Картограммы распределения измерительного скаляра по сечению ЭМ

Наблюдается характерное для турбулентного потока размытие трассера с увеличением расстояния от точки подачи.

3. Построены графики радиальной дисперсии трассера для характерных сечений ЭМ (рис.7). Наилучшим образом полученные результаты аппроксимируются кривой, близкой по форме к графику функции Гаусса вида:

$$\varphi(r) = A * e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} + B, \quad (3)$$

где φ – безразмерный измерительный скаляр, r – относительное расстояние, A , B – коэффициенты, значения которых зависят от условий эксперимента.

Форма графика согласуется с теорией Тейлора, согласно которой распределение частиц трассера в турбулентном потоке подчиняется модели «случайного блуждания» [6].

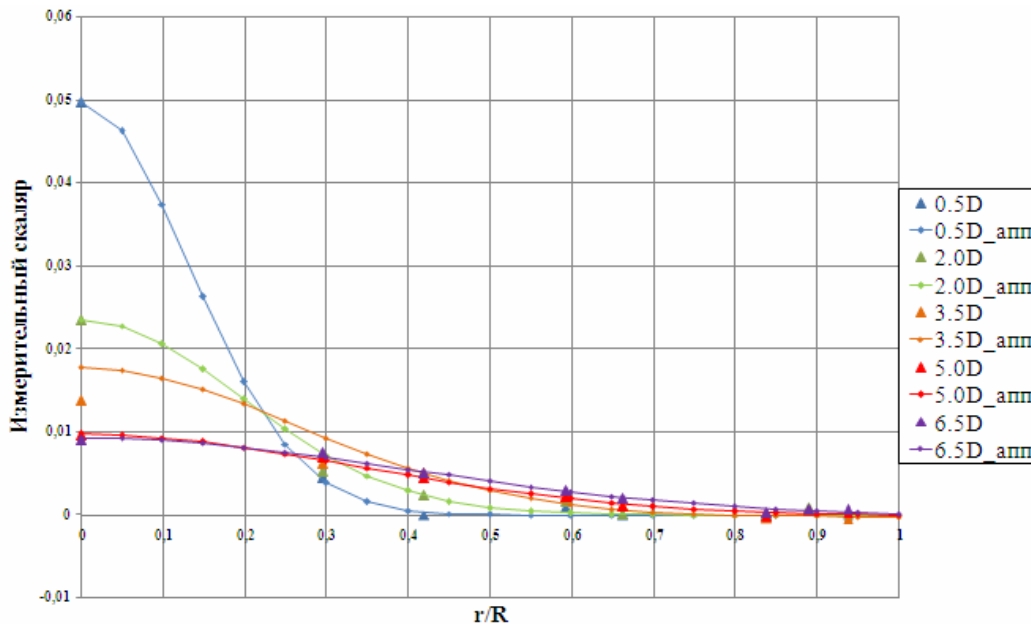


Рис. 7. Радиальная дисперсия трассера для характерных сечений ЭМ

4. В области центральной ячейки происходит снижение концентрации трассера с увеличением расстояния от места подачи до плоскости датчика. В периферийных ячейках наблюдается, соответственно, увеличение концентрации трассера (рис. 8).

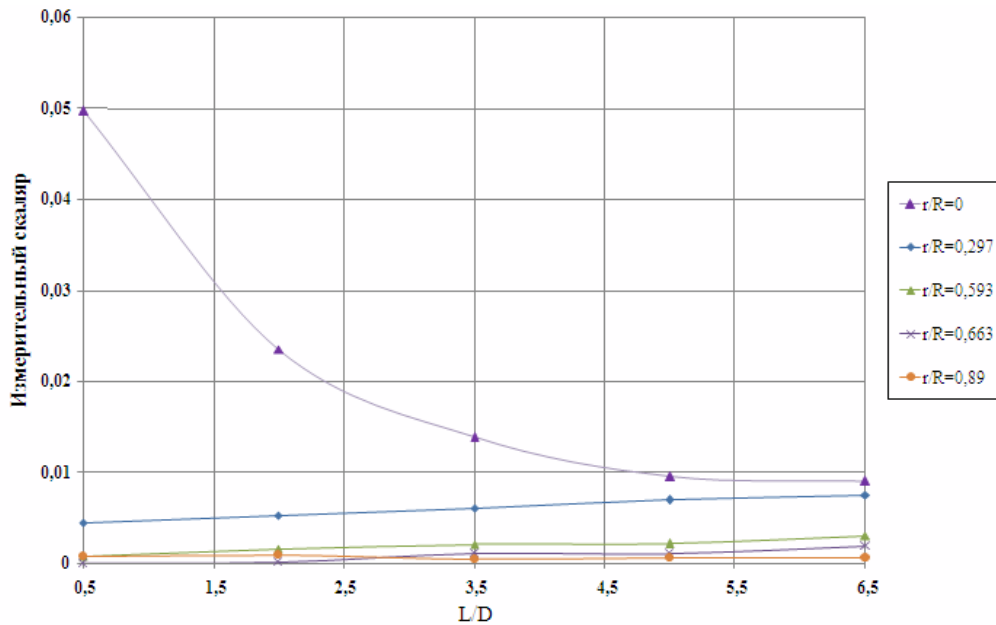


Рис. 8. Распределение безразмерной концентрации трассера по длине модели

4. Построен частотно-энергетический спектр пульсаций трассера (рис. 9) в центральной измерительной ячейке. Анализ графика позволяет выделить диапазон волновых чисел основных энергонесущих вихрей: $k = 20 \dots 75 \text{ м}^{-1}$ (что соответствует характерным размерам 13-50 мм). Полученная оценка размера крупных вихрей в потоке соответствует диаметру гидравлического канала. Частота основных энергосодержащих вихрей находится в диапазоне от 3 до 10 Гц.

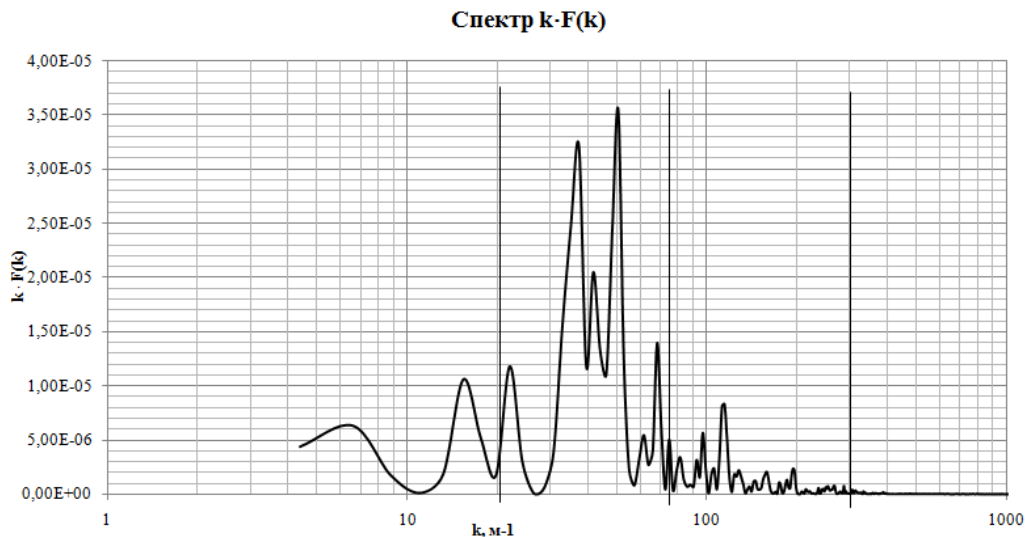


Рис. 9. Частотно-энергетический спектр (центральная ячейка, сечение 5D, Re=10000)

Выводы

Использование метода матричной кондуктометрии для исследования гидродинамических процессов движения потока жидкости позволяет получить результаты с высоким пространственным и временным разрешением.

В ходе исследований был доработан лабораторный стенд, установлены оптимальные условия и параметры работы измерительной схемы, оптимизирована конструкция сетчатого

датчика. Определено наиболее благоприятное, с точки зрения необходимой чувствительности, соотношение между проводимостью пресной воды и раствора.

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамических процессов течения среды сделаны следующие выводы:

1. Радиальная дисперсия трассера при турбулентном движении среды имеет вид функции Гаусса.

2. В области центральной ячейки происходит снижение концентрации трассера с увеличением расстояния от места подачи до плоскости датчика, в периферийных ячейках наблюдается обратный процесс.

3. Диапазон линейных масштабов основных энергонесущих вихрей составляет от 13 до 50 мм.

4. Частоты основных энергосодержащих вихрей заключены в диапазоне от 3 до 10 Гц.

Полученные результаты по исследованию гидродинамических процессов течения среды хорошо коррелируют с известными теоретическими зависимостями для канала круглого сечения.

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 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013. – 540 с.
2. **Баринов, А.А.** Внедрение метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. №1. С. 139–145.
3. **Ylonen, A.T.** High-resolution flow structure measurements in a rod bundle / A.T. YLONEN. - Lappeenranta University of Technology, 173, 2013.
4. **Bulk, F.P.** An Experimental Study on Cross-Flow Mixing in a Rod-Bundle Geometry using a Wire-Mesh/ F.P. Bulk. - Delft University of Technology, 77, 2012.
5. Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В.С. Боровков. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 286 с.
6. **Taylor, G.** The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe / G. Taylor. - Proceedings of the Royal Society of London, 223:446–468, 1954.

*Дата поступления
в редакцию: 29.04.2015*

**A.A. Barinov¹, S.M. Dmitriev¹, E.D. Ignatov¹, A.A. Tabekin¹,
A.A. Hljunev², A.E. Khrobostov¹**

RESEARCH OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN TURBULENT FLOW USING THE METHOD OF MATRIX CONDUCTOMETRY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC «Vzor»², Nizhny Novgorod

Purpose: Use of the method of the matrix conductometry for studying of hydrodynamic processes.

Methodology/approach: Wire-mesh sensor enables to measure the concentration field of the salt solution in the flow, due to the difference of electric conductivity. The analysis of these distributions enables to make a conclusion about the intensity of heat exchange processes.

Originality/value: The method of a matrix conductometry allows to conduct researches with high spatial and time resolution.

Key words: nuclear reactor, hydrodynamics, turbulent pulsations, conductometry, wire-mesh sensor.

УДК 537.87

Т.М. Заборонкова, Н.Ф. Яшина

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА АНИЗОТРОПНЫХ ПЛОСКИХ СТРУКТУРАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе рассматривается прохождение электромагнитных волн сквозь плоские слои анизотропных и би-анизотропных композитных сред при наличии у слоев диэлектрических стенок конечной толщины. На основании полученных выражений для коэффициентов отражения и прохождения обсуждается возможность диагностики свойств композитных материалов.

Ключевые слова: коэффициенты отражения и прохождения, анизотропные среды, би-анизотропные среды.

Целью работы является выявление особенностей прохождения плоских электромагнитных волн сквозь композитные слои различной геометрии с последующим применением результатов для диагностики электродинамических свойств искусственных композитных материалов [1–2].

Рассмотрим нормальное падение электромагнитной волны на плоский неограниченно протяженный вдоль осей Oy и Oz анизотропный слой ширины d_1 (рис. 1). Слой расположен в вакууме и с обеих сторон ограничен параллельными диэлектрическими стенками конечной толщины d_2 с проницаемостью ε . Будем рассматривать два случая ориентации оси гиротропии по отношению к границам слоя: продольную и поперечную.

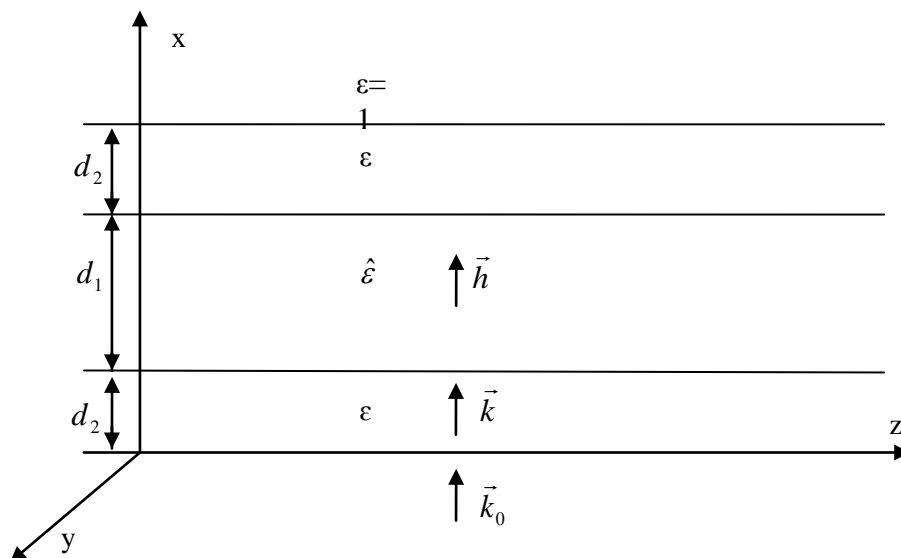


Рис. 1. Анизотропный слой с диэлектрическими стенками

Рассмотрим сначала продольную ориентацию оси гиротропии, т.е. ось параллельна стенкам слоя (рис. 1). Анизотропная среда внутри слоя описывается тензором диэлектрической проницаемости вида

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & -ig & 0 \\ ig & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

магнитная проницаемость в слое $\mu = 1$.

Пусть на слой нормально падает электромагнитная волна E-поляризации:

$$\vec{E} = \bar{z}_0 E_0 \exp i(\omega t - k_0 x), \quad \vec{H} = -\bar{y}_0 \frac{k_0}{\omega \mu_0} E_0 \exp i(\omega t - k_0 x), \text{ где } k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}.$$

В гиротропном слое компоненты поля волны записываются следующим образом

$$\vec{E}_{1,2} = \bar{z}_0 E_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_E x), \quad \vec{H}_{1,2} = -\bar{y}_0 \frac{h}{\omega \mu_0} E_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_E x), \text{ где } h_E = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \eta}.$$

Выражения для коэффициентов отражения и прохождения имеют вид

$$R_E = \frac{iA_1(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, \eta, d_{1,2})}{\Delta_1(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, \eta, d_{1,2})},$$

$$T_E = e^{ik_0(d_1+2d_2)} \frac{2\varepsilon\sqrt{\eta}}{\Delta_1(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, \eta, d_{1,2})}, \quad (2)$$

где $A_1 = (\varepsilon(1-\eta) \cos^2 kd_2 - (\eta - \varepsilon^2) \sin^2 kd_2) \sinh_E d_1 + \sqrt{\varepsilon\eta} (1-\varepsilon) \sin 2kd_2 \cosh_E d_1$, $k = k_0 \sqrt{\varepsilon}$, $\Delta_1 = [2\varepsilon\sqrt{\eta} \cos 2kd_2 \cosh_E d_1 - (\varepsilon + \eta)\sqrt{\varepsilon} \sin 2kd_2 \sinh_E d_1] + i\{\sqrt{\varepsilon\eta} (\varepsilon + 1) \sin 2kd_2 \cosh_E d_1 + [\varepsilon(1 + \eta) \cos^2 kd_2 - (\varepsilon^2 + \eta) \sin^2 kd_2] \sin^2 h_E d_1\}$.

При нормальном падении на слой электромагнитной волны H- поляризации:

$$\vec{H} = \bar{z}_0 H_0 \exp i(\omega t - k_0 x), \quad \vec{E} = \bar{y}_0 \frac{k_0}{\omega \varepsilon_0} H_0 \exp i(\omega t - k_0 x),$$

составляющие электрического и магнитного поля в слое запишутся следующим образом:

$$\vec{H}_{1,2} = \bar{z}_0 H_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_H x),$$

$$\vec{E}_{1,2} = \bar{x}_0 \frac{igh_H}{\omega \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)} H_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_H x), \quad \vec{E}_{1,2} = \bar{y}_0 \frac{\varepsilon_{\perp} h_H}{\omega \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)} H_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_H x),$$

$$\text{где } h_H = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \frac{(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)}{\varepsilon_{\perp}}}.$$

При той же ориентации оси гиротропии выражения для коэффициентов отражения и прохождения соответственно имеют вид:

$$R_H = \frac{iA_2(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, g, \eta, d_{1,2})}{\Delta_2(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, g, \eta, d_{1,2})},$$

$$T_H = e^{ik_0(d_1+2d_2)} \frac{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon_{\perp}(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)}}{\Delta_2(\varepsilon, \varepsilon_{\perp}, g, \eta, d_{1,2})}, \quad (3)$$

где

$$A_2 = (\varepsilon_{\perp}^2 - n^2 - \varepsilon_{\perp} \varepsilon^2) \sin^2 kd_2 \sinh_H d_1 + \varepsilon(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2 - \varepsilon_{\perp}) \cos^2 kd_2 \sinh_H d_1 + \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)} (\varepsilon - 1) \sin 2kd_2 \cosh_H d_1,$$

$$\Delta_2 = 2\varepsilon\sqrt{\varepsilon_{\perp}(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)} \cos 2kd_2 \cosh_H d_1 - \sqrt{\varepsilon}(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2 + \varepsilon_{\perp} \varepsilon) \sin 2kd_2 \sinh_H d_1 + i\{\varepsilon(\varepsilon_{\perp}^2 - g^2 + \varepsilon_{\perp}) \cos^2 kd_2 \sinh_H d_1 - (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2 + \varepsilon_{\perp} \varepsilon^2) \sin^2 kd_2 \sinh_E d_1 + \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon (\varepsilon_{\perp}^2 - g^2)} (\varepsilon + 1) \sin 2kd_2 \cosh_H d_1\}.$$

Отметим, что для продольной оси гиротропии в случае Е- поляризованной волны функции A_1 и Δ_1 не зависят от параметра гиротропии g .

Далее рассмотрим нормальное падение волн обеих поляризаций на гиротропный слой с диэлектрическими стенками в случае, когда ось гиротропии ориентирована нормально к границам слоя (тогда волновой вектор падающей волны в вакууме будет параллелен оси гиротропии).

Коэффициенты отражения и прохождения Е- поляризованной волны определяются выражениями:

$$R'_E = \frac{A_3(\varepsilon, \varepsilon_\perp, g, \eta, d_{1,2})}{\Delta_3(\varepsilon, \varepsilon_\perp, g, \eta, d_{1,2})}, \quad T_E = \frac{A_4(\varepsilon, \varepsilon_\perp, g, \eta, d_{1,2})}{\Delta_4(\varepsilon, \varepsilon_\perp, g, \eta, d_{1,2})}. \quad (4)$$

Для Н- поляризованной волны соответствующие коэффициенты несложно получить в результате замены: $R'_H = -R'_E$ и $T'_H = T'_E$. Следовательно, для поперечной оси гиротропии в рассматриваемом случае коэффициенты отражения и прохождения не зависят от типа поляризации волны. При конечной толщине стенок выражения для функций $A_{3,4}$ и $\Delta_{3,4}$ имеют громоздкий вид и здесь не приводятся.

Приведенные ранее соотношения позволяют исследовать еще один практически важный случай геометрии задачи. Далее рассмотрим гиротропный слой, расположенный в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ε . Коэффициенты отражения и прохождения волн могут быть получены из соотношений (2)–(4) при условии $k_0\sqrt{\varepsilon}d_2 \rightarrow \infty$ (т.е. анизотропный слой, ограниченный «толстыми» диэлектрическими стенками). В результате указанного предельного перехода для случая продольной ориентации оси гиротропии могут быть получены следующие выражения для коэффициентов $R_{E,H}$ и $T_{E,H}$:

1) при нормальном падении электромагнитной волны Е-поляризации

$$R_E = \frac{i(\varepsilon - \eta)\sinh_E d}{2\sqrt{\varepsilon\eta}\cosh_E d + i(\varepsilon + \eta)\sinh_E d},$$

$$T_E = \frac{2\sqrt{\varepsilon\eta}\exp(ikd)}{2\sqrt{\varepsilon\eta}\cosh_E d + i(\varepsilon + \eta)\sinh_E d}; \quad (5)$$

2) при нормальном падении Н-поляризованной волны

$$R_H = \frac{i(\varepsilon_\perp^2 - g^2 - \varepsilon_\perp)\sinh_H d}{2\sqrt{\varepsilon_\perp(\varepsilon_\perp^2 - g^2)}\cosh_H d + i(\varepsilon_\perp + \varepsilon_\perp^2 - g^2)\sinh_H d},$$

$$T_H = \frac{2\sqrt{\varepsilon_\perp(\varepsilon_\perp^2 - g^2)}\exp(ikd)}{2\sqrt{\varepsilon_\perp(\varepsilon_\perp^2 - g^2)}\cosh_H d + i(\varepsilon_\perp + \varepsilon_\perp^2 - g^2)\sinh_H d}. \quad (6)$$

В соотношениях (5), (6) введены обозначения $d = d_1$, $h_E = k_0\sqrt{\eta}$, $h_H = k_0\sqrt{(\varepsilon_\perp^2 - g^2)\varepsilon_\perp^{-1}}$.

В случае поперечного направления оси гиротропии в слое получаем следующие соотношения для коэффициентов отражения и прохождения:

$$R'_E = \frac{A_3}{\Delta_3}, \quad T'_E = \frac{A_4}{\Delta_3} e^{ikd}; \quad R'_H = -R'_E, \quad T'_H = T'_E. \quad (7)$$

Выражения для функций $A_{3,4}$ и $\Delta_{3,4}$, входящие в соотношения для $R'_{E,H}$ и $T'_{E,H}$ записываются в виде

$$A_3 = (h_1 h_2 - k^2) \left[(h_1 h_2 + k^2) (1 - \cos(h_1 + h_2)d) - ik(h_1 + h_2) \sin(h_1 + h_2)d \right],$$

$$A_4 = k \left[2k(k_0^2 \varepsilon_\perp + h_1 h_2) (\cosh h_1 d + \cosh h_2 d) + i(h_1 + h_2) (h_1 h_2 + k^2) (\sinh h_1 d + \sinh h_2 d) \right],$$

$$\Delta_3 = \Delta_4 = 2 \left(k(h_1 + h_2) \cos(h_1 + h_2)d + i(h_1 h_2 + k^2) \sin(h_1 + h_2)d \right)^2,$$

где $h_{1,2} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{\perp} \mp g}$ – постоянные распространения волн в слое.

Рассмотрим область частот, где постоянные распространения $h_{E,H}$ и $h_{1,2}$ являются действительными величинами. Из выражений для коэффициентов отражения не сложно получить следующие условия безотражательного режима. Для случая продольной и поперечной ориентации оси гиротропии соответственно получаем

$$\sinh h_{E,H} d = 0; \sin(h_1 + h_2) d = 0.$$

При условии малости гиротропии ($|g| \ll |\varepsilon_{\perp}|$) для тонкого анизотропного слоя ($h_{E,H} d \ll 1$), выражения для коэффициентов $R_{E,H}$ и $T_{E,H}$ существенно упрощаются. В случаях продольной и поперечной ориентациях оси гиротропии из представленных выше выражений (5)–(7) нетрудно получить соотношения между коэффициентами отражения Е- и Н- поляризованных волн:

$$\frac{R_E}{R_H} \approx \frac{(\varepsilon - \eta)}{(\varepsilon - \varepsilon_{\perp})}, \frac{R'_E}{R'_H} \approx -1. \quad (8)$$

Таким образом, проводя измерение коэффициентов отражения для двух типов поляризованных волн (Е- и Н-), на основании соотношений между коэффициентами отражения (8) можно определить тип ориентации оси гиротропии в композитном слое. В случае продольной оси (при известном значении ε) формула (8) позволяет оценить соотношение между значениями диагональных компонент тензора (ε_{\perp} и η).

Ниже исследуем случай композитного би-анизотропного слоя, расположенного в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ε . Би-анизотропная среда внутри слоя описывается тензорами диэлектрической и магнитной проницаемости с ненулевыми диагональными компонентами [3]

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}, \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\parallel} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Компоненты электромагнитного поля в слое представляются в виде:

$$\vec{E}_{1,2} = \vec{z}_0 E_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_E x), \vec{H}_{1,2} = -\vec{y}_0 \frac{h_E}{\omega \mu_0 \mu_{\perp}} E_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_E x) \quad \text{— при падении волны Е-поляризации,}$$

$$\vec{E}_{1,2} = \vec{y}_0 \frac{h_H}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\perp}} H_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_H x), \vec{H}_{1,2} = \vec{z}_0 H_{1,2} \exp i(\omega t \mp h_H x) \quad \text{— при падении волны Н-поляризации.}$$

Выражения для коэффициентов отражения и преломления $R''_{E,H}$ и $T''_{E,H}$ представляются

в виде:

1) при падении на слой Е-поляризованной волны $\hat{\varepsilon}$ коэффициенты имеют вид

$$R''_E = \frac{i \left(\varepsilon - \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}} \right) \sinh h_E d}{\sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}}} 2 \cosh h_E d + i \left(\varepsilon + \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}} \right) \sinh h_E d} \hat{\mu},$$

$$T''_E = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}}} 2 \exp(ikd)}{\sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}}} 2 \cosh h_E d + i \left(\varepsilon + \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\mu_{\perp}} \right) \sinh h_E d} \quad (10)$$

2) при падении на слой Н- поляризованной волны ($\vec{H} = \vec{z}_0 E_0 \exp i(\omega t - k_0 x)$) коэффициенты записываются следующим образом

$$R_H'' = \frac{i \left(1 - \frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} \right) \sinh h_H'' d}{\sqrt{\frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} 2 \cosh h_H'' d + i \left(1 + \frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} \right) \sinh h_H'' d}},$$

$$T_H'' = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} 2 \exp(ikd)}}{\sqrt{\frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} 2 \cosh h_H'' d + i \left(1 + \frac{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} \right) \sinh h_H'' d}}, \quad (11)$$

где $h_E'' = k_0 \sqrt{\mu_{\perp} \epsilon_{\parallel}}$ и $h_H'' = k_0 \sqrt{\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel}}$ постоянные распространения в композитном слое. В случае би-анизотропного слоя также возможен безотражательный режим прохождения электромагнитной волны, который реализуется при условии:

$$\sinh h_{E,H}'' d = 0.$$

В приближении тонкого слоя ($h_{E,H}'' d \ll 1$) можно получить следующее соотношение между коэффициентами отражения R_E'' и R_H'' :

$$\frac{R_E''}{R_H''} \approx \frac{(\epsilon_{\perp} \mu_{\parallel} - \epsilon_{\parallel})}{(\epsilon_{\perp} - \epsilon_{\parallel} \mu_{\parallel})}. \quad (12)$$

Следовательно, в случае тонкого анизотропного слоя ($h_{E,H}'' d \ll 1$), заключенного между электрически «толстыми» стенками ($k_0 \sqrt{\epsilon} d_2 \gg 1$) при известном значении величины диэлектрической проницаемости стенок (слоя по результатам измерения коэффициентов отражения R_E'' и R_H'' для двух поляризаций волн (Е- и Н-) можно заключить является ли среда би-анизотропной. Кроме того, выражение (12) позволяет оценить соотношения между компонентами тензоров, описывающих композитную среду: 1) при больших значениях ϵ – между компонентами магнитного тензора $\mu_{\perp}, \mu_{\parallel}$; 2) при малых ϵ – между компонентами диэлектрического тензора $\epsilon_{\perp}, \epsilon_{\parallel}$.

Полученные соотношения для коэффициентов отражения были применены для оценки компонент тензора диэлектрической проницаемости графеносодержащего углекомпозитного материала [4]. Было определено направление оси гиротропии, а также соотношение между диагональными элементами тензора. Показано, что величины продольной и поперечной проводимостей материала зависит от концентрации в нем графеновых структур. Результаты расчетов были подтверждены данными экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. **Третьяков, С.А.** Электродинамика композитных сред; киральных, биизотропных и некоторых бианизотропных сред // Журнал радиотехники и электроники. 1994. Т. 39. С. 1457–1468.
2. **Неганов, В.А.** Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами / В.А. Неганов, Осипов О.В. – М.: Радио и связь, 2006. – 277 с.
3. **Ilin, N.V.** Features of surface modes in metamaterial layers / N.V. Ilin, A.V. Smirnov, I.G. Kondrat'ev // Metamaterials. 2009. Vol. 3. P. 82–89.

4. **Zaboronkova, T.M.** Microwave horn antenna made of a grapheme-containing carbon composite material / T. Zaboronkova., N. Dugin, E. Myasnikov // Proceeding of EuCAP 9th European Conference on Antennas and Propagation. Lisbon. Portugal. 2015. P. 160.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2015*

T.M. Zaboronkova, N.F. Yashina

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY ANISOTROPIC PLANE STRUCTURES

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

Purpose: It is the purpose of the present paper to discuss the main properties of reflection and transmission coefficients of the plane electromagnetic waves in the case of the scattering of electromagnetic waves by layer of anisotropic composite medium.

Method/approach: We consider the anisotropic layer which may be described by both the permittivity and permeability tensors. The direction of girotropic axis of the layer is parallel or perpendicular to the layer walls. We analyze two types of polarization of incident waves, which are H- and E- waves. The treatment given here is restricted to what is necessary for the problem at hand.

Results: We obtained the expressions for reflection and transmission coefficients for different cases of anisotropic composite layers and estimated the influence of widths of the layer walls of the scattering fields. Our study has showed the possibilities to apply the theoretical calculations to the estimation of the tensor elements which are described the composite medium.

Range of application: The present study has been already applied for estimation of conductivity of grapheme-containing carbon composite material and provides a starting-point for future research.

Key words: reflection and transmission coefficients, anisotropic media, bianisotropic media.

УДК 537.87

N.F. Yashina, T.M. Zaboronkova

NONLINEAR INTERACTION OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC WAVES GUIDED BY THE ANISOTROPIC COMPOSITE CYLINDER

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

A study is made of the linear stage of the parametric instability of electromagnetic surface waves guided by bi-anisotropic composite cylinder surrounded by uniform dielectric space. A three-wave interaction between an external time-harmonic magnetic field and the guided waves is investigated. The expression of instability increment of the surface waves propagating in the opposite directions is obtained. For the some practically interesting cases numerical results are discussed.

Key words: composite media, parametric instability, nonlinear interaction, instability increment.

Introduction

Electromagnetic wave propagation in composite media has been studied extensively for a long time because of many applications. In particular, the anisotropic composite material can be used in the antenna techniques for manufacturing the structural elements, microwave waveguides [1, 2] and so on. As it is known the boundary between metal and bianisotropic composite medium is able to support the surface waves. The instability of such waves has been analyzed in [3]. Propagation and excitation of electromagnetic waves in cylindrical plasma structures aligned with an external dc magnetic field have received much careful study [4]. Radiation of electromagnetic waves by given sources in a cylindrically stratified gyrotropic medium described by permittivity tensor $\hat{\varepsilon}$ and permeability tensor $\hat{\mu}$ has been considered in [5]. The parametric instability of whistler waves guided by an axially magnetized plasma column in a dielectric space has been analyzed in [6].

Here we consider the linear stage of parametric instability of electromagnetic waves guided by the bianisotropic composite cylinder surrounded by uniform dielectric space. The composite material is described by the permittivity tensor $\hat{\varepsilon}$ and permeability tensor $\hat{\mu}$ with nonzero off-diagonal elements. The axis of a cylinder is parallel to the gyrotropic axis of the medium. We analyzed the dispersion characteristics of the waves guided by a cylinder. It has been shown that bianisotropic cylinder is able to support surface waves if one of diagonal elements of any tensors $\hat{\varepsilon}$ or $\hat{\mu}$ (as well as both of them) are negative. A three wave interaction can occur if the space-time condition between the external electromagnetic field and the guided waves is fulfilled [3]. The expression of the instability increment of guided surface waves propagating in opposite directions is obtained.

Basic formulations

We take cylinder coordinate system (ρ, φ, z) with z axis is parallel to the medium gyrotropic axis. The axis of composite cylinder with radius a is parallel to the z axis. We consider the anisotropic medium which is described by the permittivity tensor $\hat{\varepsilon}$ and permeability tensor $\hat{\mu}$ in the following form

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & i\varepsilon_2 & 0 \\ -i\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}, \quad \hat{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_1 & i\mu_2 & 0 \\ -i\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where $\varepsilon_2 = \chi\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}}$, $\mu_2 = -\chi\sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$, χ is known parameter, which depends on the medium properties and can be measure [1, 2]. The cylinder is surrounded by the uniform dielectric space with permittivity ε .

We analyze the linear stage of parametric instability of waves, which appears in the presence of time – harmonic magnetic field at the frequency 2ω , which can be written in the region $0 < \rho < a$ as

$$\vec{H} = \vec{z}_0 H_0 \exp(i2\omega t).$$

It can be shown that there are two types of axisymmetric surface waves are guided by the cylinder. They are H -waves (with the components $H_\varphi, H_\rho, E_z, E_\rho$), and E -waves (with the components $E_\varphi, E_\rho, H_z, H_\rho$). The field components of the H - waves in the linear approximation (when the external magnetic field is absent, i.e. $H_0 = 0$) can be written in the form:

$$\begin{aligned} & \rho \leq a \\ H_\varphi^{(1,2)} &= C^{(1,2)} \frac{K_1(s_H a)}{J_1(\beta_H a)} J_1(\beta_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ H_\rho^{(1,2)} &= \pm \frac{i\chi}{\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}} C^{(1,2)} \frac{K_1(s_H a)}{J_1(\beta_H a)} J_1(\beta_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ E_\rho^{(1,2)} &= \pm \frac{h_H}{k_0 \varepsilon_1} C^{(1,2)} \frac{K_1(s_H a)}{J_1(\beta_H a)} J_1(\beta_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ E_z^{(1,2)} &= \frac{-i\beta_H}{k_0 \varepsilon_3} C^{(1,2)} \frac{K_1(s_H a)}{J_1(\beta_H a)} J_0(\beta_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ & \rho \geq a \\ H_\varphi^{(1,2)} &= C^{(1,2)} K_1(s_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ E_\rho^{(1,2)} &= \pm \frac{h_H}{k_0 \varepsilon} C^{(1,2)} K_1(s_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z) \\ E_z^{(1,2)} &= \frac{is_H}{k_0 \varepsilon} C^{(1,2)} K_0(s_H \rho) \exp i(\omega t \mp h_H z), \end{aligned}$$

here $J_m(\xi)$ is the m th-order Bessel function of the first kind, $K_m(\xi)$ is the m th-order modified Bessel function of the second kind, $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ is the wave number of free space, β_H and s_H are transverse wave numbers referring to the composite and dielectric medium respectively

$$\beta_H^2 = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} (k_0^2 (\varepsilon_1 \mu_1 - \chi^2) - h_H^2), \quad s_H^2 = h_H^2 - k_0^2 \varepsilon.$$

The longitudinal propagation constant h_H of H -waves can be obtained from the dispersion equation

$$s_H \varepsilon_3 J_1(\beta_H a) K_0(s_H a) + \beta_H \varepsilon J_0(\beta_H a) K_1(s_H a) = 0. \tag{2}$$

The field components of the E - waves in the linear approximation can be written as $\rho \leq a$

$$E_\varphi^{(1,2)} = D^{(1,2)} \frac{K_1(s_E a)}{J_1(\beta_E a)} J_1(\beta_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z)$$

$$\begin{aligned}
E_\rho^{(1,2)} &= \frac{\mp i\chi}{\sqrt{\mu_1\varepsilon_1}} D^{(1,2)} \frac{K_1(s_E a)}{J_1(\beta_E a)} J_1(\beta_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z) \\
H_\rho^{(1,2)} &= \frac{\mp h_E}{k_0 \mu_1} D^{(1,2)} \frac{K_1(s_E a)}{J_1(\beta_E a)} J_1(\beta_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z) \\
H_z^{(1,2)} &= \frac{i\beta_E}{k_0 \mu_3} D^{(1,2)} \frac{K_1(s_E a)}{J_1(\beta_E a)} J_0(\beta_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z) \\
&\quad \rho \geq a \\
E_\phi^{(1,2)} &= D^{(1,2)} K_1(s_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z) \\
H_\rho^{(1,2)} &= \frac{\mp h_E}{k_0} D^{(1,2)} K_1(s_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z) \\
H_z^{(1,2)} &= \frac{-is_E}{k_0} D^{(1,2)} K_0(s_E \rho) \exp i(\omega t \mp h_E z),
\end{aligned}$$

here β_E and s_E are given by

$$\beta_E^2 = \frac{\mu_3}{\mu_1} (k_0^2 (\varepsilon_1 \mu_1 - \chi^2) - h_E^2), \quad s_E^2 = h_E^2 - k_0^2 \varepsilon.$$

The longitudinal propagation constant h_E of E -waves can be found from following dispersion equation

$$s_E \mu_3 I_1(\beta_E a) K_0(s_E a) + \beta_E I_0(\beta_E a) K_1(s_E a) = 0. \quad (3)$$

The investigation of the dispersion questions (2) and (3) have shown that

- in the case $\mu_3 = -\mu_1, \varepsilon_3 = -\varepsilon_1$, the composite cylinder can support H - and E - surface waves,
- in the case $\mu_3 = -\mu_1, \varepsilon_3 = \varepsilon_1$, composite cylinder is able to support E - surface waves.
- in the case $\mu_3 = \mu_1, \varepsilon_3 = -\varepsilon_1$, composite cylinder can guide H - surface waves.

Nonlinear interaction of surface waves

The nonlinear interaction of the surface waves at the frequency $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ guided by the cylinder and propagating in the opposite directions of the z axis ($\vec{h}_1 = -\vec{h}_2$) may observe in the presence of the external time-harmonic magnetic field at the frequency 2ω . A three wave interaction can occur if $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega$. To discuss the parametric instability of surface waves we start from the Maxwell's equations

$$\begin{aligned}
\text{rot} \vec{H}^{(1,2)} &= \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \frac{\partial \vec{E}^{(1,2)}}{\partial t}, \\
\text{rot} \vec{E}^{(1,2)} &= -\mu_0 \hat{\mu}(H_0) \frac{\partial \vec{H}^{(1,2)}}{\partial t},
\end{aligned} \quad (4)$$

here H_0 is the amplitude of the external magnetic field. As it is known the external magnetic field may influence on the material parameters of a composite medium. For the first approximation we assume that the tensor of magnetic permeability can be written in the following form

$$\hat{\mu}(H_0) = \begin{pmatrix} \mu_1 + \alpha H_0 & i\mu_2 & 0 \\ -i\mu_2 & \mu_1 + \alpha H_0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 + \alpha H_0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

where α is the small parameter. Below we consider the case when the following relation takes place $|\mu_1| = |\mu_3|$.

In the approximation of a weak nonlinearity the Maxwell's equations can be rewritten in the form

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}^{(1,2)} &= \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \frac{\partial \vec{E}^{(1,2)}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{E}^{(1,2)} &= -\mu_0 \hat{\mu}(0) \frac{\partial \vec{H}^{(1,2)}}{\partial t} - \mu_0 \alpha H_0 \frac{\partial \vec{H}^{(1,2)*}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (6)$$

The using the standard procedure [3] we can obtain the following equations for the amplitude of the surface waves:

$$\frac{\partial A_{1,2}}{\partial z} + \frac{1}{v_{1,2}^g} \frac{\partial A_{1,2}}{\partial t} = \frac{1}{N_{1,2}} \int_0^\infty \left(-\mu_0 \alpha H_0 \frac{\partial \vec{H}^{(2,1)*}}{\partial t} \vec{H}_T^{(1,2)} \right) 2\pi \rho d\rho = \sigma_{1,2} A_{2,1}^* H_0. \quad (7)$$

Here $N_{1,2}$ are the norm of the surface wave and $\vec{H}_T^{(1,2)}$ is the magnetic field of the surface waves in the medium described by the transposed tensors, $A_{1,2}$ is the amplitude either E -surface waves or H -surface waves, $v_{1,2}^g$ is the group velocity of the waves, $\sigma_{1,2}$ are the coefficients of the nonlinear interaction.

The norm of the H -surface waves has the form

$$\begin{aligned} N_H^{1,2} &= \pm 2\pi \frac{h_H a^2}{k_0} \left\{ K_1^2(s_H a) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2K_1^2(s_H a)}{a} \left(\frac{1}{\varepsilon_1 \beta_H} \frac{J_0(\beta_H a)}{J_1(\beta_H a)} - \frac{1}{\varepsilon s_H} \frac{K_0(s_H a)}{K_1(s_H a)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + K_1^2(s_H a) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \frac{J_0^2(\beta_H a)}{J_1^2(\beta_H a)} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{K_0^2(s_H a)}{K_1^2(s_H a)} \right) \right\}. \end{aligned}$$

The norm of the E -surface waves is given by

$$\begin{aligned} N_E^{1,2} &= \mp 2\pi \frac{h_E a^2}{k_0} \left\{ K_1^2(s_E a) \left(\frac{1}{\mu_1} - 1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2K_1^2(s_E a)}{a} \left(\frac{1}{\mu_1 \beta_E} \frac{J_0(\beta_E a)}{J_1(\beta_E a)} - \frac{1}{s_E} \frac{K_0(s_E a)}{K_1(s_E a)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + K_1^2(s_E a) \left(\frac{1}{\mu_1} \frac{J_0^2(\beta_E a)}{J_1^2(\beta_E a)} - \frac{K_0^2(s_E a)}{K_1^2(s_E a)} \right) \right\}. \end{aligned}$$

The group velocity can be written as

$$\left(v_{1,2}^g \right)_{H,E} = \pm c \frac{h_{H,E}}{k_0} V_{H,E},$$

here functions $V^{H,E}$ are

$$\begin{aligned} V_H &= \varepsilon^{-1} \left\{ \varepsilon_1 \beta_H J_1(\beta_H a) K_0(s_H a) - \varepsilon s_H J_0(\beta_H a) K_1(s_H a) \right\} \times \\ &\quad \times \left\{ \varepsilon_1 \beta_H J_1(\beta_H a) K_0(s_H a) - s_H (\mu_1 \varepsilon_1 - \chi^2) J_0(\beta_H a) K_1(s_H a) \right\}^{-1}, \\ V_E &= \left\{ \mu_1 \beta_E J_1(\beta_E a) K_0(s_E a) - s_E J_0(\beta_E a) K_1(s_E a) \right\} \times \\ &\quad \times \left\{ \mu_1 \beta_E J_1(\beta_E a) K_0(s_E a) - s_E (\mu_1 \varepsilon_1 - \chi^2) J_0(\beta_E a) K_1(s_E a) \right\}^{-1}. \end{aligned}$$

The coefficients of the nonlinear interaction $\sigma_{1,2}$ can be expressed as

$$\sigma_H^{1,2} = \frac{i\pi\alpha\mu_0\omega a^2}{N_H^{1,2}} \left(1 + \frac{\chi^2}{\mu_1\varepsilon_1}\right) \frac{K_1^2(s_H a)}{J_1^2(\beta_H a)} \left[J_1^2(\beta_H a) + J_0^2(\beta_H a) - \frac{2}{\beta_H a} J_0(\beta_H a) J_1(\beta_H a) \right],$$

$$\sigma_E^{1,2} = \frac{i\pi\alpha\mu_0\omega a}{k_0^2 N_H^{1,2}} \frac{K_1^2(s_E a)}{J_1^2(\beta_E a)} \left[\left(\frac{h_E^2}{\mu_1^2} + \frac{\beta_E^2}{\mu_3^2} \right) (J_1^2(\beta_E a) + J_0^2(\beta_E a)) - \frac{2h_E^2}{\mu_1^2 \beta_E a} J_0(\beta_E a) J_1(\beta_E a) \right].$$

For the homogeneous case ($\frac{\partial}{\partial z} = 0$) the expression of instability increment of the surface waves of H - and E - polarization is given in the form

$$\gamma_{1,2} = \sqrt{\sigma_{1,2} \sigma_{2,1}^* \nu_{1,2}^g \nu_{2,1}^g} |H_0|.$$

The parametric instability is observed if the following condition takes please $\sigma_{1,2} \sigma_{2,1}^* \nu_{1,2}^g \nu_{2,1}^g > 0$.

Numerical results and discussion

We now present the numerical results for the instability increments of the surface waves performed for medium parameters given in [1]: $\mu_1 = 5$, $\varepsilon_1 = 1$, $\chi = 0.1$. The numerical calculations performed for the waves with the frequency $\omega = 2\pi \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$. For this set of parameters and for the radius of cylinder $a = 0.03 \text{ m}$ the values of longitudinal propagation constant h and transverse wave numbers β of the surface mode with the least magnitude of β are: $h_H = 3.12k_0$, $s_H = 2.96k_0$, $\beta_H = 2.18k_0$ (if $\mu_3 = \pm\mu_1$ and $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$); $h_E = 6.8k_0$, $s_E = 6.74k_0$, $\beta_E = 6.44k_0$ (if $\mu_3 = -\mu_1$ and $\varepsilon_3 = \pm\varepsilon_1$).

Numerical calculation has shown, that for chosen set of parameters, the condition $\sigma_{1,2} \sigma_{2,1}^* \nu_{1,2}^g \nu_{2,1}^g > 0$ takes please, and the parametric instability of surface waves can be observed.

The numerical results of normalized instability increment $\tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{\alpha H_0 \omega}$ of the surface waves

as function of mode number n are presented in Figs. 1, 2. We number the modes of a cylinder in the order of an increase of their transverse wave number β starting with the minimum value of β and using the numbers $n=1,2,3,\dots$. Normalized instability increment $\tilde{\gamma}$ is presented for the anisotropic cylinder with radius $a = 0.03 \text{ m}$. Figs.1, 2 show the instability increment of axisymmetric E - and H -surface waves with different number of modes n respectively.

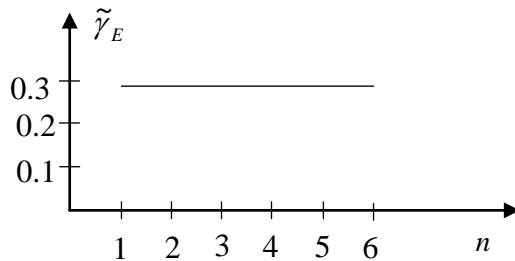


Fig. 1. The instability increment of the E - surface waves versus n , $a = 0.03 \text{ m}$

One can observe from Fig. 1, 2 that an increment $\tilde{\gamma}$ weekly depends on the mode number.

Fig. 3 shows the instability increment $\tilde{\gamma}_E$ of the first mode of surface waves as a function of cylinder radius. The behavior of the instability increment $\tilde{\gamma}_H$ is similar to $\tilde{\gamma}_E$ and we do not give it here.

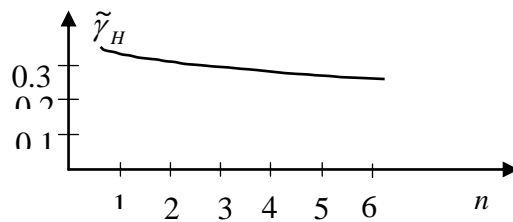


Fig. 2 The instability increment of the H - surface waves versus n , $a = 0.03m$

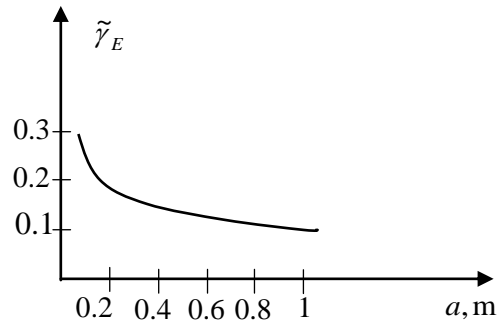


Fig. 3. The instability increment $\tilde{\gamma}_E$ of the surface waves with $n=1$ as versus cylinder radius a

One can see that increment $\tilde{\gamma}_E$ decreases rather rapidly with an increasing the cylinder radius.

Conclusion

Thus, we consider the parametric instability of the surface waves guided by the composite cylinder in the presence of time-harmonic external magnetic field. The instability growth rate is analyzed. The results obtained can be useful for creating microwave devices made of composite material.

References

1. **Neganov, V.A.** Reflected, wave guided and radiated structures with the chiral elements / V.A. Neganov, O.V. Ocipov. – M.: Radio and com, 2006. – 277 p.
2. **Tretyakov, S.A.** Electrodynamics of complex media; chiral, biisotropic and some bianisotropic medium / S.A. Tretyakov // Journal of Communication Technology and Electronics. 1994. Vol. 39. P. 1457–1468.
3. **Yashina, N.F.** Electrodynamics surface waves guided by the metal–composite medium boundary/ T.M. Zaboronkova, N.F. Yashina // Proc. of the International Conference “Days on Diffraction`2007”, May 29 – June 1, St. Petersburg. 2007. P. 156–159.
4. **Kondrat’ev, I.V.** Electrodynamics of Density Ducts in Magnetized Plasmas / I.G. Kondrat’ev, A.V. Kudrin, T.M. Zaboronkova - Amsterdam.: Gordon and Breach. 1999. – 289 p.
5. **Kudrin, A.V.** Electromagnetic radiation from sources embedded in a cylindrically stratified unbounded gyrotropic medium / A.V. Kudrin, E.Yu. Petrov, G.A. Kyriacu, T.M. Zaboronkova // Progress In Electromagnetics Research. B. 2009. Vol. 12. P. 297–331.
6. **Yashina, N.F.** Instability of the electromagnetic surface waves supported by the plasma column./ N.F. Yashina, T.M. Zaboronkova // Proc. of the International Conference “Days on Diffraction`2009”, May 26 – 29, St. Petersburg. 2009. P. 202–205.

T.M. Zaboronkova, N.F. Yashina

NONLINEAR INTERACTION OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC WAVES GUIDED BY THE ANISOTROPIC COMPOSITE CYLINDER

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

Subject: The study of parametric instability of electromagnetic surface waves guided by the composite cylinder surrounded by uniform dielectric space is made. The composite medium inside the cylinder is described by permittivity and permeability tensors with nonzero off-diagonal elements.

Method/approach: The dispersion characteristics of waves supported by the composite cylinder are analyzed. It was shown that parametric instability of surface waves propagating in the opposite directions can arise in the presence of time-harmonic external magnetic field aligned with the axis of the cylinder. The instability of waves can occur if the space-time condition between the external field and guided waves is fulfilled. In the approximation of weak nonlinearity the equations for the amplitudes of the surface waves are derived.

Results: We consider the parametric instability of surface waves guided by bianisotropic cylinder in the presence of external magnetic field. An expression of instability increment of guided waves has been obtained and analyzed as a function of the cylinder parameters. For the some practically interesting cases numerical analyses have been performed.

Range of application: Over the past decade, there has been shown a substantial degree of interest in composite material. The composite material can be used for manufacturing of microwave waveguides, antenna systems, the structural elements of microwave devices and so on. It should be taken into account that the instability of waves guided by the boundary of the antenna structures can influence on the operating of antenna systems.

Key words: composite media, parametric instability, nonlinear interaction, instability increment.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

А.В. Михеев, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, З.А. Кострова

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСА, ОСНАЩЕННОГО НЕПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНОЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Приведены результаты компьютерного моделирования вертикального статического нагружения само-несущей непневматической шины взаимодействующей с твердым, ровным основанием. Были созданы компьютерные 3d-модель и конечно-элементная модель непневматической шины и стального диска.

Получены значения деформаций и эквивалентных напряжений возникающих в модели колеса при данном виде нагружения. Определен характер деформации упругих элементов шины. Построена зависимость вертикальной нагрузки на колесе от вертикального перемещения. Определена вертикальная жесткость колеса.

Ключевые слова: колесный движитель, непневматическая шина, моделирование статического нагружения шины, деформации, эквивалентные напряжения.

Для приведения транспортного средства в движение необходим движитель, который, в свою очередь, преобразует подведенную к нему мощность двигателя в работу по передвижению. Одной из важных возможностей движителя является его проходимость, которая обеспечивается за счет оптимальной конструкции.

Наиболее распространенным и приемлемым движителем является колесо, за счет простоты конструкции, надежности и приспособляемости к условиям движения. Как правило, на колесе используется пневматическая шина, она и является самым слабым звеном в его конструкции. При неправильном давлении или при его полном отсутствии такой движитель практически полностью лишает транспортное средство возможности движения или значительно затрудняет его. Особенно это очень важно для военной техники в боевых условиях, обездвиживание транспортного средства может привести к весьма трагичным последствиям. Другими недостатками пневматической шины являются сложность технологических процессов ее изготовления и большие расходы на их утилизацию.

Таким образом, становится разумным применение колес с упругими элементами из эластомерного материала, таких как натурального или синтетического каучука, полиуретана, вспененного каучука и вспененного полиуретана, сегментированных сополиэфиров и блок-сополимеров, нейлона. Упругость шины определяет сечение и конструкции упругих элементов.

Компания Bridgestone представила конструкцию непневматической шины [16] (рис. 1, д) и назвала ее *AirFree*. Колесо состоит из металлического диска, на котором находится шина. Шина, в свою очередь, представляет собой два кольца, соединенных упругими элементами. Они состоят из двух разнонаправленных рядов спиц, которые находятся по определенным углом к нормали контактируемой поверхности, что и обеспечивает деформацию шины под нагрузкой. Главной проблемой этой конструкции является то, что она рассчитана только на скорости до 60 км/ч и для автомобилей с малым весом.

Параллельно компании *Bridgestone* компания *Michelin* разработала иную конструкцию

непневматической шины под названием *TWEEL* (рис. 1, в, г). Конструкция шины *TWEEL* [16] состоит из жесткой ступицы, соединенной с протектором посредством гибких деформируемых спиц из полиуретана, и функционирует как единое целое. Шина разработана на базе традиционной радиальной технологии. Так как потеря давления исключена, сокращается время простоя техники из-за спуска шин, что имеет место при использовании классических шин.



а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Конструкции непневматических шин

Ранее для исключения этого недостатка многие компании, эксплуатирующие спецтехнику, вынуждены прибегать к альтернативным беспрокольным технологиям, которые приводят к уменьшению тяги, экономичности и ухудшению управляемости, комфорта. Так как в новинке *Michelin X Tweel* не используется сжатый воздух, она не боится проколов и порезов, которые иногда возникают в процессе работ в сферах благоустройства территории, строительства, переработки отходов и сельского хозяйства. Также не требуется постоянный контроль давления воздуха, эта шина просто монтируется, она стойкая к повреждениям, обеспечивает повышенный комфорт для водителя-оператора спецтехники, и имеет значительно больший ресурс в сравнении с пневматическими шинами.

В одном ряду с описанными конструкциями стоит шина (рис. 1 *е*), разработанная **Resilient Technologies**, именуемая NTP [16]. Данная шина разработана специально для военных автомобилей. Она способна выдерживать статическую нагрузку до 1746 кг и не лишает автомобиль возможности двигаться даже при 30%-ном разрушении. Упругие элементы в данной конструкции выполнены в виде пчелиных сот, что обеспечивает хорошую несущую способность шины.

Совершенно другой формат шин (рис. 1 *а, б*) представила корейская компания *Hankook* [17]. Шина и обод данной модели – это одно целое. *I-Flex* на 95% состоит из вторично переработанного материала. Представленные на Франкфуртской выставке безвоздушные шины имели радиус в 14 дюймов и оригинальный дизайн. Многим понравился дизайн моделей, выполненный в оранжевых и синих оттенках. Компания уже планирует установить такие колеса на малолитражные автомобили *Volkswagen Up*.

Создание вспомогательной геометрии непневматической шины производилось в *AutoCAD*, все внешние габаритные размеры и присоединительные размеры шины близки к традиционным резино-кордовым пневматическим шинам. Полученная геометрия импортировалась в препроцессор для создания конечно-элементной модели, задания материала и граничных условий моделирования. В результате была построена конечно-элементная модель (рис. 2, *б, з*) которая насчитывает 54 000 элементов. Геометрия упругого элемента (рис. 2, *а, в*) выполнена в виде шестиугольника соединяющего внешнее кольцо шины с внутренним. Данная модель состоит из 16 таких секторов, распределенных по круговому массиву и работающих как единое целое. Данная форма была выбрана, так как она обеспечивает требуемую грузоподъемность и достаточные демпфирующие свойства шины по сравнению с пневматической. Данная модель имеет следующие размеры: толщина внутреннего кольца 24 мм, толщина тонкостенных перегородок 4 мм, толщина наружного кольца 31 мм, радиус колеса в свободном состоянии равняется 370 мм; толщина диска колеса 5 мм. Диск выполнен из стали и имеет следующие характеристики: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\rho = 7850$ кг/м³, $\nu = 0,3$. Материал шины имеет близкие характеристики с резиной: $E = 100$ МПа, $\rho = 1200$ кг/м³, $\nu = 0,4$. Исходя из выбранного материала и геометрии модели, масса диска равна 16,5 кг, масса шины 34,8 кг. Полная масса колеса в сборе составляет 51,3 кг.

Для оценки несущей способности шины была приложена вертикальная статическая нагрузка, равная приходящейся нагрузки на одно колесо транспортного средства снаряженной массой 1600 кг нагрузка при этом составляет 400 кг (3924 Н). Задав все необходимые параметры и свойства для расчета, модель экспортируется в файл необходимый для процессора (LS - Duana). После расчета и отладки модели импортируем файл обратно в препроцессор для просмотра результатов.

При нагружении статический радиус колеса (рис. 3, *б*) равен 354 мм, что на 16 мм меньше свободного радиуса. Произошло значительное деформирование упругих элементов в зоне пятна контакта (рис. 3, *а*) с опорной поверхностью, в остальной части шины совершенно не изменили своей формы. Так мы видим, что даже при сильной деформации тонкостенные перегородки, изменив свою форму, не соприкасаются с соседними перегородками, что является значительным плюсом данной конструкции шины. Максимальные напряжения в шине (рис. 3, *в, з*) составляют 8 МПа, что является допустимым при данном виде нагруже-

ния. Самые нагруженные элементы шины – это две перегородки соединяющие шестиугольник с внешним кольцом шины, они также имеют наибольшую деформацию по сравнению с другими элементами.

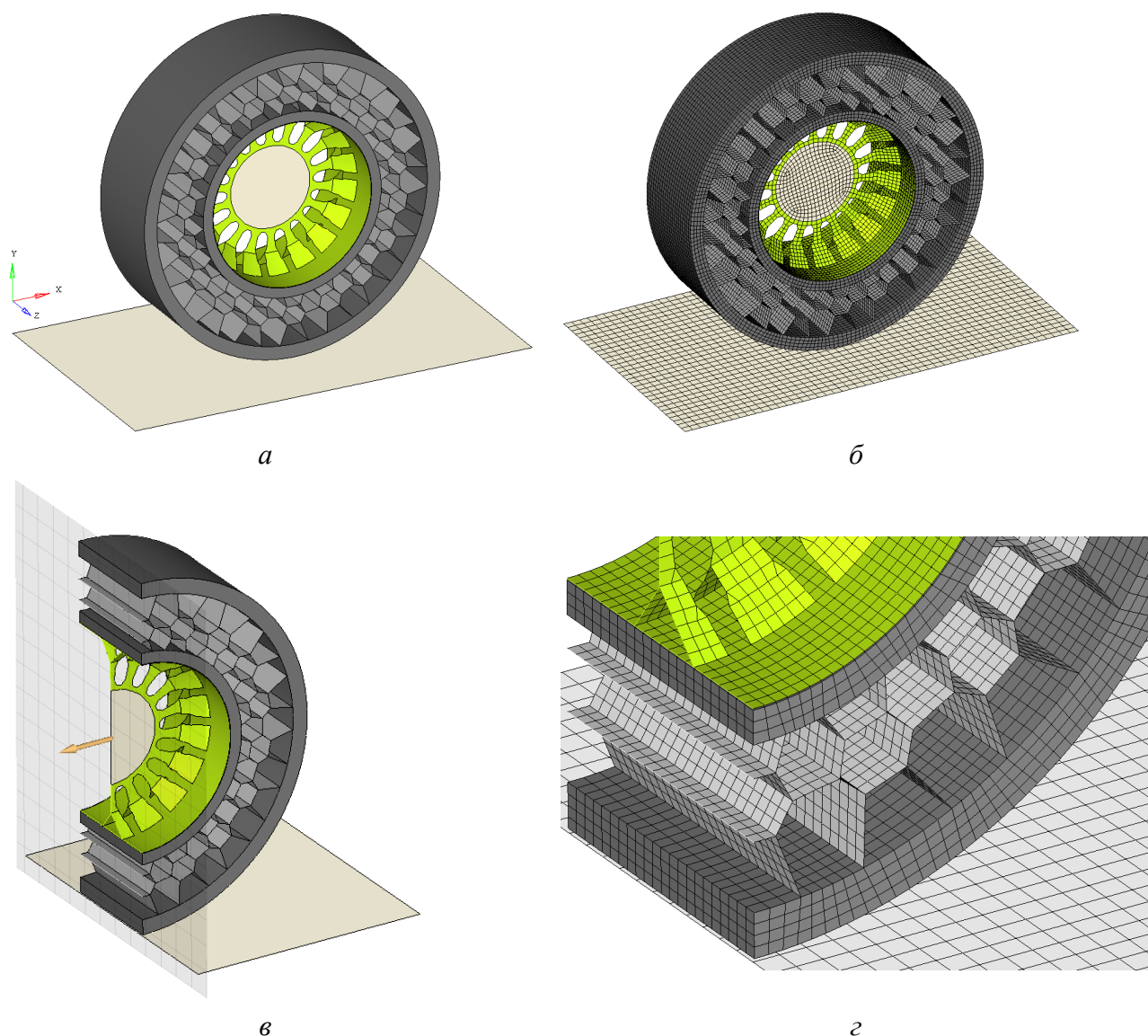


Рис. 2. Геометрическая и конечно-элементная модель колеса в сборе

Были определены геометрические размеры пятна контакта шины (рис. 4). Статическая жесткость шины [1] определяется по нагрузочной или упругой характеристике. Она равна углу наклона касательной к кривой средней линии упругой характеристики. Значения радиальной жесткости шины в каждой точке упругой характеристики можно определить по формуле

$$C_{ш} = P_H / L_{пр}, \quad (1.1)$$

где $L_{пр}$ - приведенный статический прогиб (прогиб линейного упругого элемента с жесткостью $C_{ш}$ под нагрузкой P_H). Так был получен график, изображенный на рис. 5.

Из проведенного компьютерного моделирования становится явным, что изменение размеров пятна контакта можно добиться путем изменения толщины стенок перегородок, и в течение срока службы оно должно оставаться неизменным. Поэтому возможно задать необходимые толщины перегородок для получения конкретной жесткости, несущей способности и размера пятна контакта, которые не будут изменяться в течение срока службы, что облег-

чает обслуживание транспортного средства. Изменяя форму упругих элементов можем также варьировать поперечную жесткость шины.

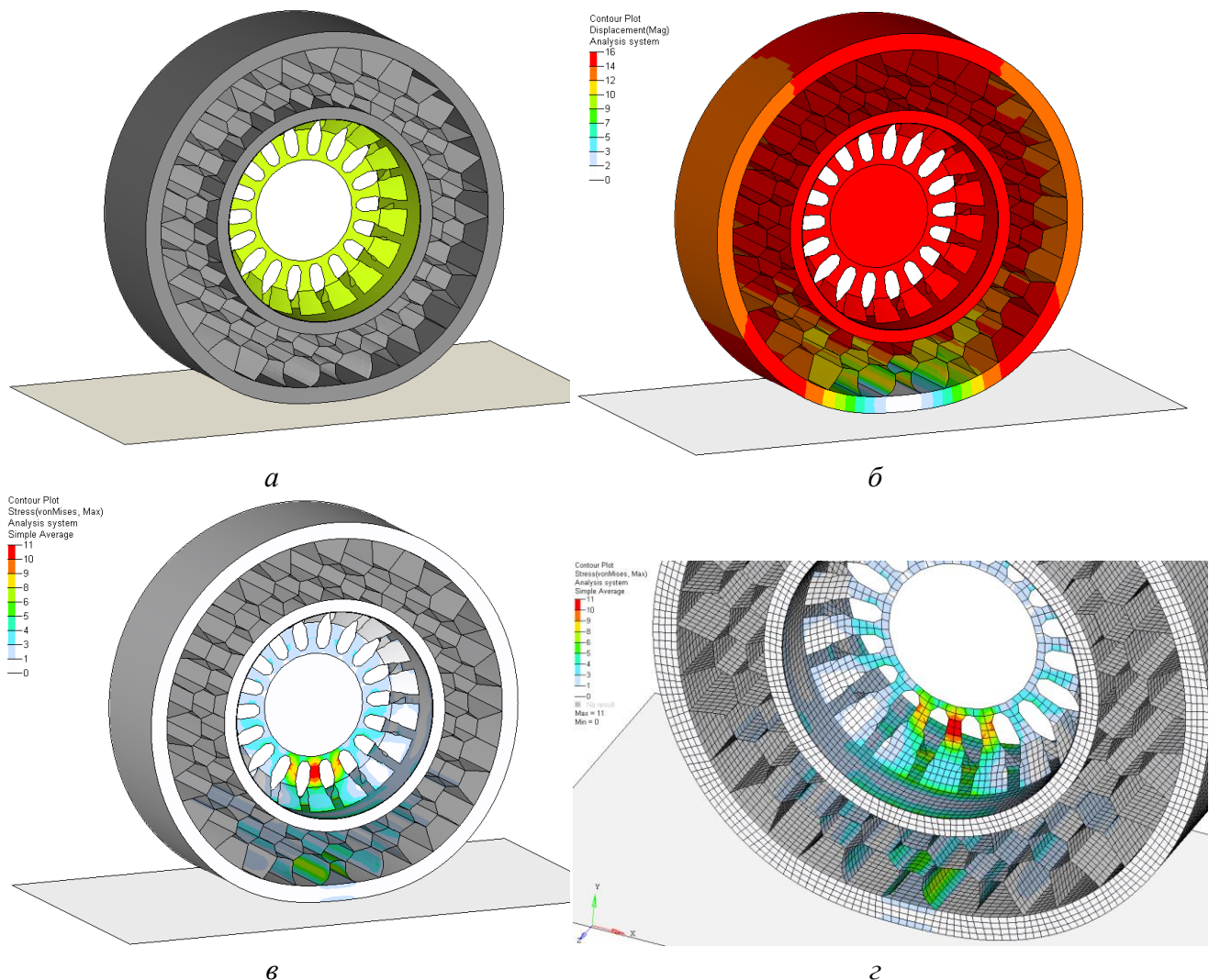


Рис. 3. Характер деформаций и распределение эквивалентных напряжений в модели

В данной работе масса шины составляет 34,8 кг, а масса пневматического аналога составляет не больше 25 кг, что, в свою очередь, негативно скажется на разгоне и управляемости автомобиля. Для облегчения массы шину необходимо армировать. Мазур В. В. разработал способ армирования непневматических самонесущих шин [2]. Это значительно снижает массу конечного изделия и увеличивает кольцевую жесткость внешнего кольца шины [3]. Технический результат по способу армирования автомобильных шин с упругими спицами достигается тем, что армирование каркаса шины осуществляется намоткой тонких металлических нитей в окружном направлении на поверхность предварительно изготовленной армированной и помещенной в матрицу основы шины с упругими спицами, а брекета - намоткой нитей вокруг предварительно изготовленного полиуретанового кольца в радиальном направлении.

Для лучшей работы следует увеличивать жесткость внешнего кольца, так как несущую способность шины в данной конструкции обеспечивает сжатие упругого элемента, находящегося между пятном контакта и диском, а улучшенные эксплуатационные характеристики от шины можно получить если спицы упругого элемента будут работать не на сжатие, а на растяжение. Вследствие будет задействована та часть шины которая находится выше центра колеса, и обеспечение несущей способности будет происходить за счет растяжения спиц. Предпочтительно, чтобы спицы имели высокую эффективную радиальную жесткость

при растяжении и низкую эффективную радиальную жесткость при сжатии. Низкая жесткость при сжатии позволит спицам, прикрепленным к контактирующей с грунтом части кольцевой полосы, согнуться для поглощения толчков от неровностей дороги.

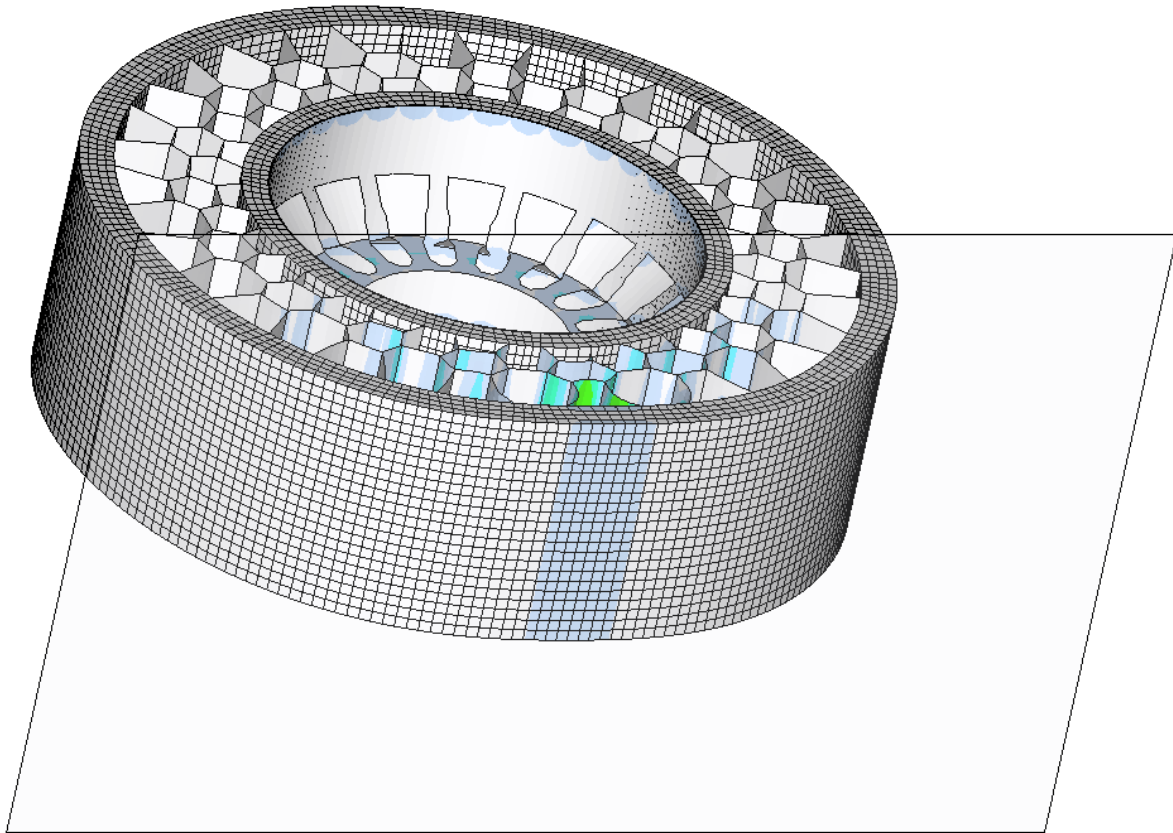


Рис. 4. Пятно контакта колеса с опорной поверхностью

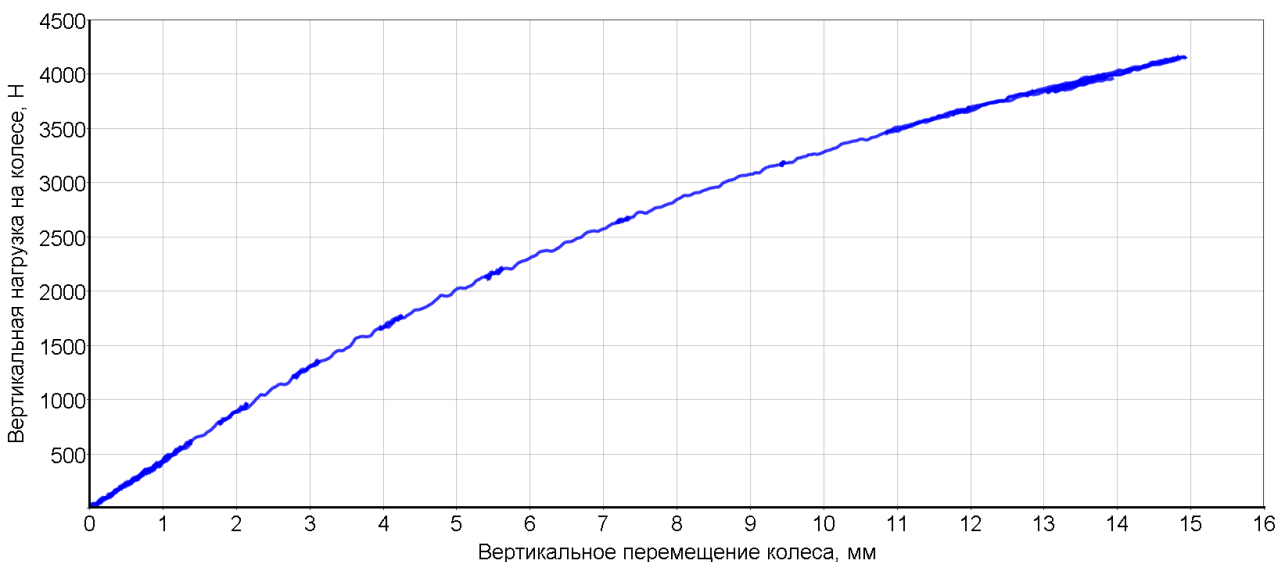


Рис. 5. График зависимости вертикальной нагрузки на колесе (Н) от вертикальных перемещений (мм). Вертикальная жесткость колеса составляет 285Н/мм

Спицы также передают силы, необходимые для ускорения, остановки и поворота. Расположение и ориентация спиц может быть выбрана так, чтобы получить требуемые характеристики [4]. Например, в тех случаях, когда возникают относительно низкие окружные

силы, спицы могут быть расположены в радиальном направлении и параллельно с осью вращения шины. Для обеспечения жесткости в направлении по окружности спиц, перпендикулярной оси вращения могут быть добавлены, чередующихся с осью продольные спицы. Другой альтернативой является организация косых спиц, чтобы обеспечить жесткость в обоих окружных и осевых направлениях. Для облегчения изгиба спиц в местах контактирующей части протектора, спицы могут быть изогнутыми.

В дальнейшем в модель будут введены дополнительные элементы такие как армирующий слой, беговая дорожка и упругий элемент будут иметь различный по своим свойствам материал, это обусловлено тем, что полиуретан имеет недостаточное сцепление с поверхностью дороги. Предполагается математическое моделирование движения непневматической шины в условиях пересеченной местности с учетом разработанных моделей местности и полотна пути представленных в работах [5–16].

Библиографический список

1. **Кнороз, В. И.** Работа автомобильной шины / В. И. Кнороз [и др.]. – М.: Транспорт, 1967. – 237 с.
2. **Гайлиш А. В. Мазур В. В.** Способ армирования автомобильных шин с упругими спицами и матрица для изготовления колес. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный университет. // Патент РФ № 2505398. 2012 г.
3. **Мазур, В.В.** Автомобильные колеса с безвоздушными шинами / В.В. Мазур, А.В. Гайлишин // Журнал Автотранспортное предприятие. 2012. С. 36.
4. Пат. РФ № 2269425. Непневматическая шина / Райн Тимоти, Томпсон Рональд, Крон Стивен, Демино Кеннет // Сосьете Де Текнолоджи Мишлен (fr), Мишлен Решерш э Текник с.а. (ch). 2006.
5. **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.
6. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **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
14. **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.
15. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального ис-

- числения / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 87–88.
- 16.«Авто Мото Спец»; URL: <http://avtomotospec.ru/poleznoe/что-такое-bezvozdushnye-shiny.html> (дата обращения: 11.02.2015).
- 17.Авто Mail.Ru URL: [https://auto.mail.ru/article/43453 shiny_hankook_teper_i_bez_vozduha/#feedback](https://auto.mail.ru/article/43453_shiny_hankook_teper_i_bez_vozduha/#feedback) (дата обращения: 11.02.2015).

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2015*

A. V. Miheev, V.V. Belyakov, D.V. Zezyulin, V.S. Makarov, Z. A. Kostrova

ESTIMATING THE STRAIN OF WHEELS FITTED NON-PNEUMATIC TYRE BY COMPUTER SIMULATION OF VERTICAL STATIC LOADING

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

Subject/topic/purpose: Estimating the strain of wheels fitted non-pneumatic tyre by computer simulation of vertical static loading

Methodology of work: Treated with the experimental data. Creating a computer model.

Results/application: The paper presents the results of computer simulation of the vertical static load of self-supporting non-pneumatic tire interacting with a firm, level base. Were created by computer 3d-model and finite element model of non-pneumatic tires and steel disc.

The values of strain and equivalent stresses arising in the wheel model in this type of loading. The character of the elastic deformation of the tire. A plot of the vertical load on the wheel from the vertical displacement. Determine the vertical stiffness of the wheel.

Findings: Requires the introduction of additional elements of the tire model such as a reinforcing layer. Necessary to carry out other types of loading to determine the behavior of the tire.

Key words: paddle wheels, non-pneumatic tire, statistical modeling of loading tire deformation, equivalent stresses.

УДК 629.113

П.П. Зубов, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СОЧЛЕНЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексева

В статье выполняется обзор компоновочных и конструкционных схем сочлененных гусеничных машин. Рассматриваются зависимости и делаются выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения сочлененных гусеничных машин, которые обуславливают их подвижность, производительность и эффективность. Приводится блок-схема методики рационального выбора типа машины, систем управления маневренностью, обеспечение общей потребной мощности, грузоподъемности, максимальной скорости движения.

Ключевые слова: сочлененная гусеничная машина, поворотное-сцепное устройство, поворотное-седельный механизм, условия эксплуатации снег, подвижность транспортно-технологических машин.

Выполнение функциональных задач транспортно-технологическими и специальными машинами в ряде отраслей реального сектора экономики, а также при решении специфических оперативно-тактических проблем специальных и силовых служб в большинстве случаев связано с их эксплуатацией на временных дорогах или в условиях бездорожья.

Появление новых, более энергонасыщенных многооперационных машин позволяет механизировать большинство работ в отраслях лесного, сельского хозяйства, нефтегазового и горнодобывающего комплексов и других направлениях национальной экономики и безопасности. Применение *сочлененных транспортно-технологических систем* является одним из перспективных направлений в решении многих задач, возникающих при эксплуатации транспортных и технологических комплексов в условиях бездорожья и особенно периоды зимы и распутицы, а также в других специфических условиях их функционирования.

Сочлененная гусеничная машина (СГМ) - частный случай сочлененной транспортной системы (СТС) [1]. Последнее понятие очень широко и включает в себя целый спектр транспортных и технологических машин, а также транспортно-технологических комплексов, имеющих, как минимум, две секции, соединенные между собой шарниром с одной или более степенями свободы.

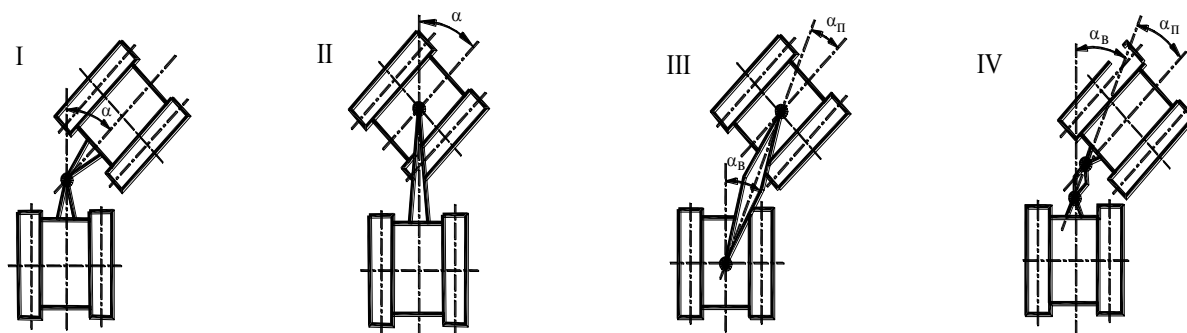


Рис. 1. Классификация СГМ:

I – одношарнирная симметричная (прицепная) СГМ; II – одношарнирная седельная СГМ; III – двухшарнирная (вагонная) СГМ; IV – двухшарнирная СГМ с промежуточным звеном

На сегодняшний день существует не так много технической и специальной литера-

туры описывающей СГМ. В первую очередь это книги, изданные производителями машин данного типа [2, 3]. Также есть ряд диссертаций, посвященных исследованию СГМ [4, 5, 6]. Некоторые аспекты выбора параметров двигателей для этих машин представлены в работах [7, 8].

За основу классификации СГМ принимается количество и расположение шарнирных точек сцепки [9] (рис. 1).

В настоящее время существуют несколько схем СГМ, которые представлены на рис. 2 [2]. Каждый из этих вариантов обладает своими недостатками и достоинствами. В рамках данной статьи рассматриваются подходы к выбору рациональных параметров СГМ на начальной стадии проектирования.

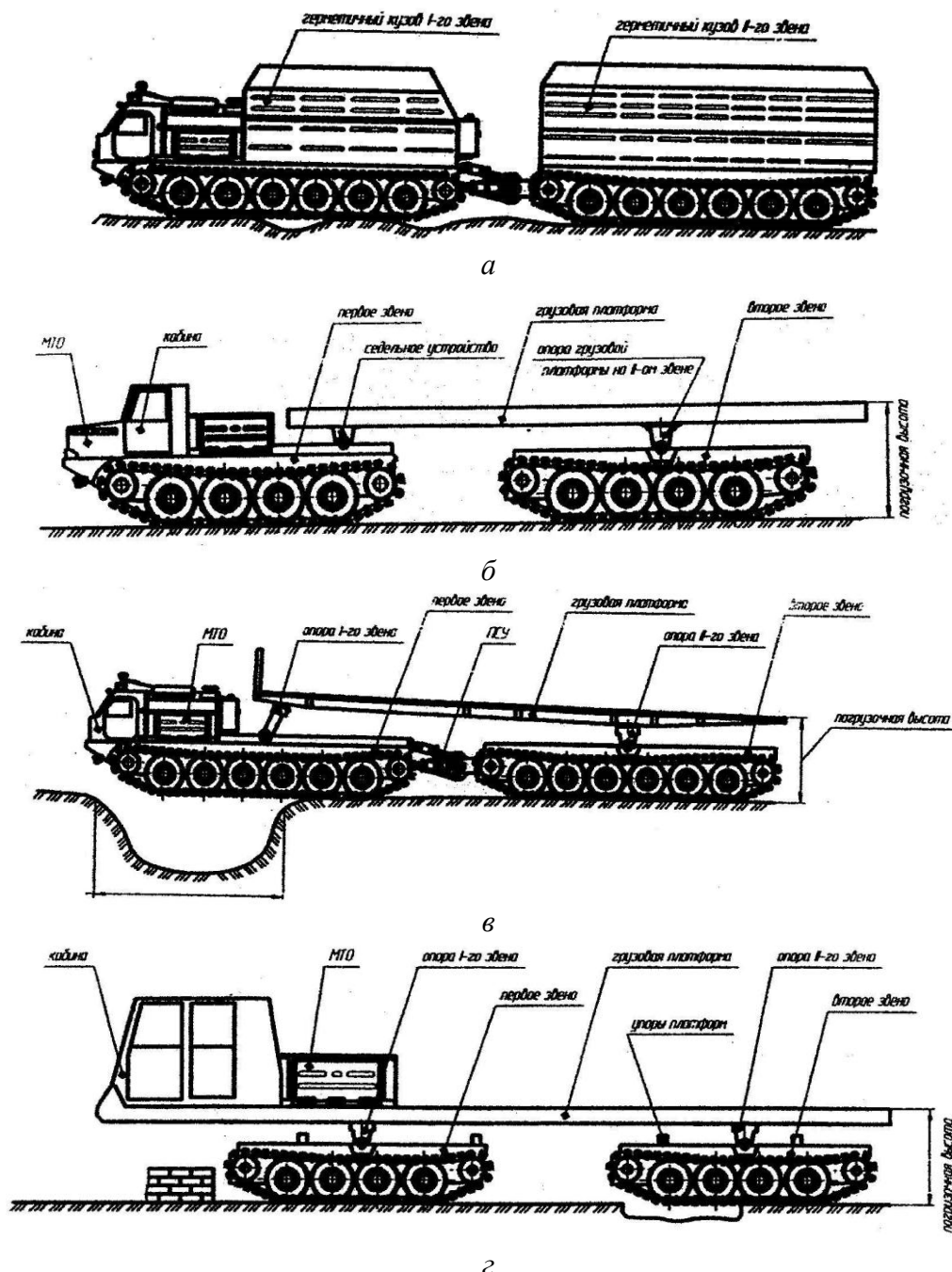


Рис. 2. Схемы известных в настоящее время СГМ:

а - одношарнирная прицепная СГМ; б - одношарнирная седельная СГМ;
в - прицепная (платформенная) СГМ; г - седельная двухшарнирная (вагонная) СГМ

Криволинейное движение машин данного класса осуществляется при помощи поворотно-сцепного устройства (ПСУ) или поворотно-седельного механизма (ПСМ). Первый тип поворотного устройства должен обеспечивать складывание звеньев в трех плоскостях: в горизонтальной, продольной вертикальной (режимы: амортизаторов; принудительного складывания, в заблокированном состоянии), поперечной вертикальной. Конструкция ПСУ во многом зависит от предпочтений конструктора, габаритных размеров, требований к СГМ по профильной проходимости, конструкционных ограничений.

При создании сочлененных транспортных средств следует руководствоваться основным практическим опытом конструирования существующих машин. В настоящее время основными производителями машин данного типа являются следующие организации (рис. 3): ОАО МК «Витязь», «Заволжский завод гусеничных тягачей», ЗАО «Транспорт», ООО «Завод Вездеходных Машин», ООО «ТрансМаш», ООО ЕЗСМ «Континент», Foremost Industries LP (Канада), АВ Haeagglunds (Швеция).



Рис. 3. Основные производители СГМ

По результатам обработки параметров основных характеристик СГМ были получены зависимости и сделаны выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения.

На рис. 4 и рис. 5 видно, что точки сгруппированы характерным образом. Можно выделить три группы: 1- СГМ с ПСУ между секциями; 2 – СГМ с одной рамой, в основном для перевозки длинномерных грузов; 3 – СГМ специального назначения (выполняют широкий спектр технологических и специальных операций). На основании этих зависимостей можно выбирать параметры машины.

Для групп 1 и 2 будут справедливы следующие зависимости для определения соотношения мощности двигателя и грузоподъемности соответственно: $P_e = 50 G + 66$ и $P_e = 5,8 G + 250$.

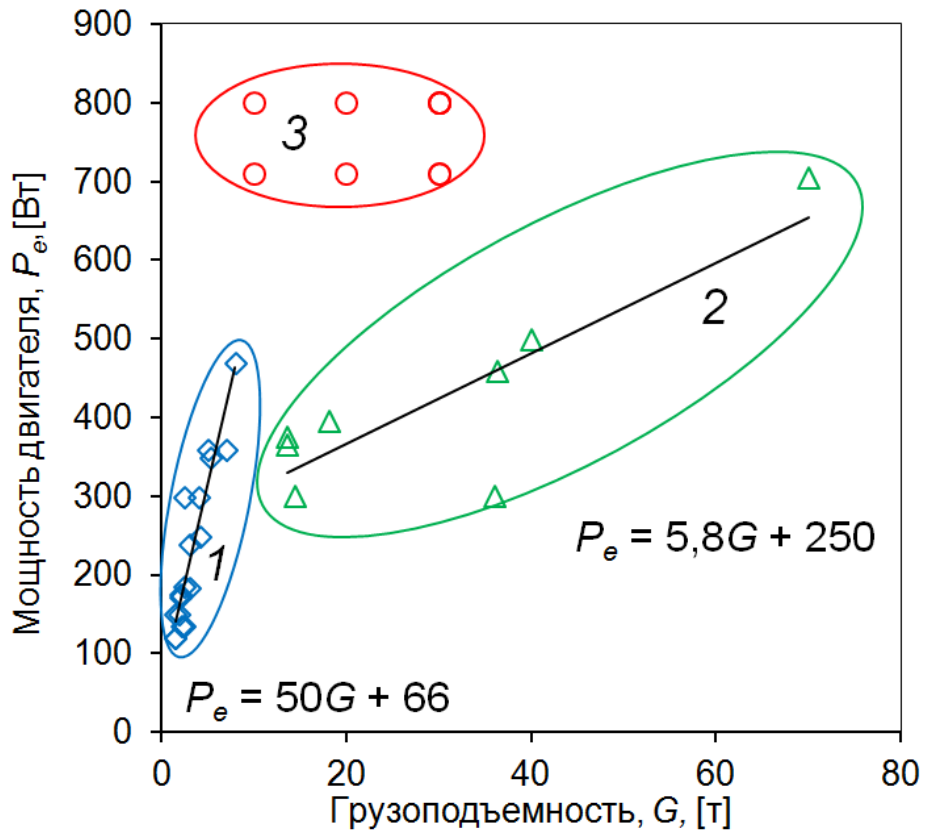


Рис. 4. Мощность двигателя СГМ от грузоподъёмности

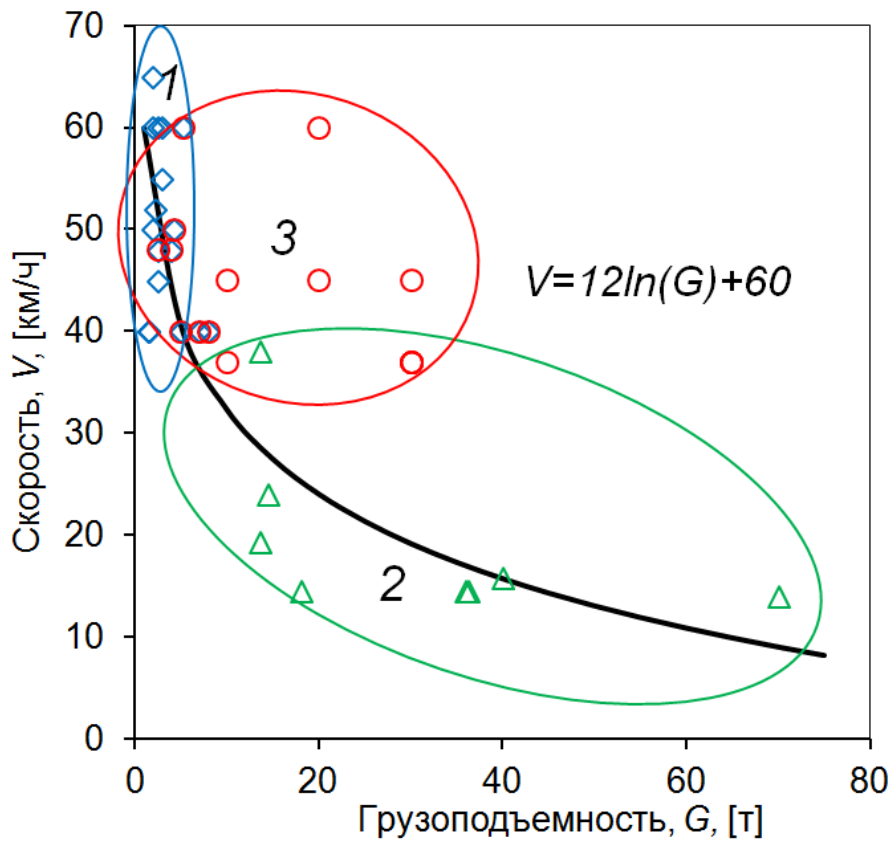


Рис. 5. Скорость движения от грузоподъёмности

Характеристики энерговооруженности и максимальной скорости функции грузоподъёмности СГМ показывают, что сегодня невозможно создать оптимальную сочлененную транспортную систему в отношении грузоподъёмности и подвижности как на дорогах, так и вне дорог. Это обусловлено отсутствием научно-обоснованной методики для целей конструирования.

Для групп 1 и 2 будет справедлива следующая зависимости для определения соотношения максимальной скорости движения от грузоподъёмности: $V = 12 \ln G + 60$.

На рис. 6, в виде блок-схемы представлена методика рационального выбора параметров поворотно-сцепного устройства СГМ. Длины частей ПСУ, расположение шарнирной точки поворота относительно центра ПСУ, расположение шарнира вертикального складывания и др. (в соответствии с рис. 6) определяются в результате решения задачи, заключающейся в поиске рациональных параметров, обеспечивающих требуемые показатели подвижности [10, 11] машины, в том числе: проходимости, маневренности, плавности хода и эффективности СГМ. При этом предполагается использование специальных математических моделей, представленных в работах [12–22], которые описывают различные условия эксплуатации транспортно-технологических машин, в том числе СГМ. Полученные параметры являются исходными данными для определения параметров гидроцилиндров поворота (из потребных сил тяги при поворотах) и гидроцилиндра вертикального складывания, расчета гидроаппаратуры, конфигурации рамы ПСУ.

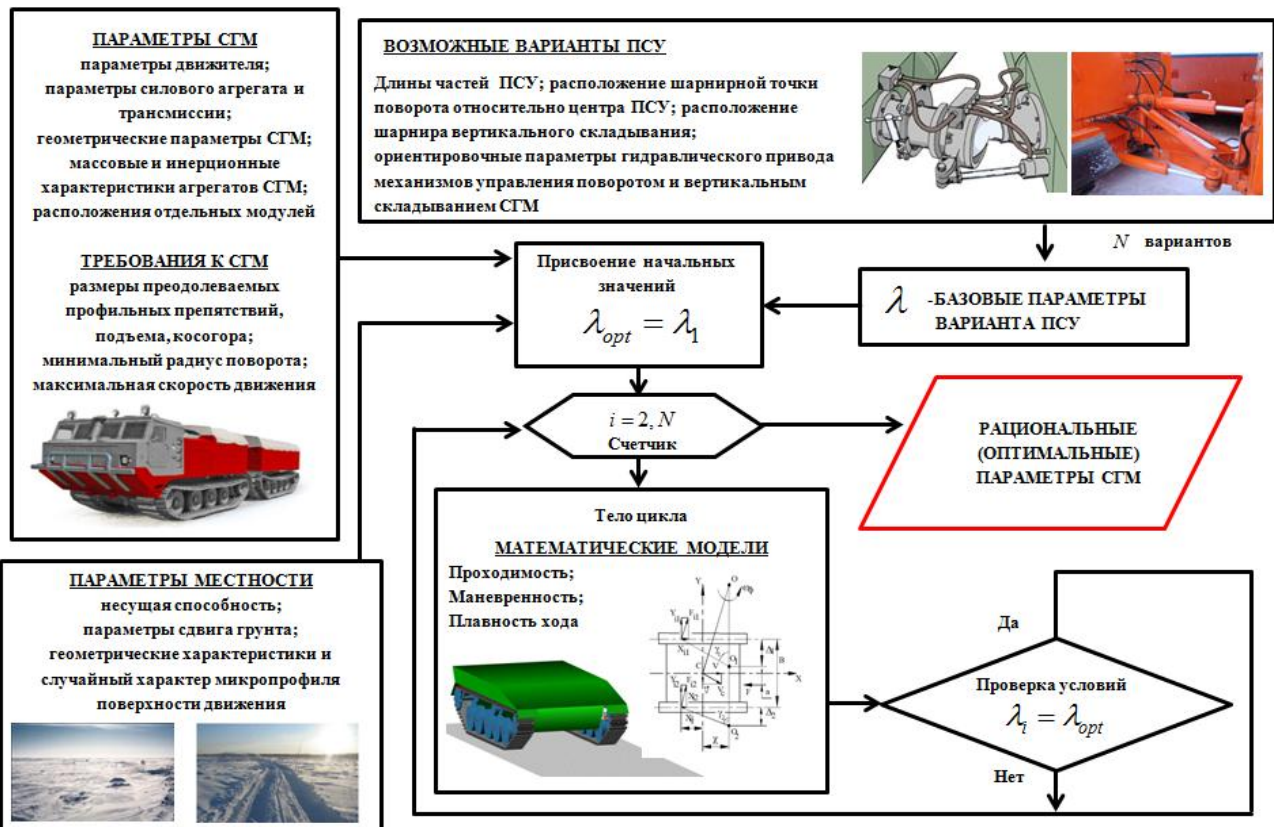


Рис. 6. Блок-схема выбора параметров СГМ

Таким образом, общие конструкционные решения СТС определяют выбор: типа СГМ, систем ПСУ и ПСМ, схем раздачи мощности по модулям, обеспечения потребной мощности, грузоподъёмности, максимальной скорости движения, что обуславливает подвижность, производительность и эффективность СТС.

Библиографический список

1. **Баженов, Е.Е.** Теория автомобиля и трактора / Е.Е. Баженов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – 125 с.
2. **Осколков, К.В.** Первые отечественные сочлененные гусеничные машины – двухзвенные транспортеры «Витязь» / К.В. Осколков. – Уфа: Слово, 2005. – 280 с.
3. **Веселов, Н.Б.** Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет.
4. **Шмаков, А. Ю.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения сочлененных машин: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ, 2000.
5. **Сарач, Е.Б.** Разработка научных методов создания комплексной системы подрессоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук.
6. **Баженов, Е.Е.** Разработка научных методов прогнозирования эксплуатационных свойств сочлененных наземных транспортно-технологических машин. дисс. ... на соискание ученой степени д-ра техн. наук. – Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010.
7. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, Е.В. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 203 с.
8. 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.
9. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 276 с.
10. **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.
11. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 113.
16. **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.
17. **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.
18. **Макаров, В.С.** 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
19. **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.
20. **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.
21. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность – машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973.

22. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1967.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2015*

P.P. Zubov, V.S. Makarov, D.V. Zeziulin, V.V. Belyakov, V.E. Kolotilin, A.A. Kurkin

**OVERVIEW OF EXISTING STRUCTURES OF ARTICULATED TRACKED VEHICLES
AND ADVICE IN CHOOSING THEIR PARAMETERS**

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

Subject/topic/purpose: Review of configuration schemes and designs of articulated tracked vehicles is carried out in this paper.

Methodology of work: Associated with the experimental data.

Results/application:

Dependencies between carrying capacity and engine power (and speed of movement) of articulated tracked vehicles are presented. These parameters define vehicle mobility, performance and efficiency.

Findings: Methodology of choice of a rational type of vehicle, its control systems of maneuverability, engine power, load capacity, maximum speed is presented in this paper.

Key words: articulated tracked vehicle, coupling device, operating conditions, snow, mobility of transportation and technological vehicles.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 621.43

Л.А. Захаров¹, А.Н. Тарасов^{1,2}, И.Л. Захаров¹, А.В. Дегтярев^{1,3}

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АТМОСФЕРНЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПЫТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Объединенный инженерный центр» ОАО ГАЗ²,
ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева»³

Рассматривается концепция инженерных решений в комплектации брутто рядных четырехцилиндровых «атмосферных поршневых двигателей внутреннего сгорания» (АПДВС) первого, второго, третьего и четвертого поколений выпускаемых Горьковским автомобильным заводом, Заволжским и Ульяновским моторными заводами. Приводится краткая модернизация инженерных решений для каждого поколения. Особое место модернизации по наиболее выгодным инженерным решениям было уделено АПДВС четвертого поколения в комплектации транспортного средства (нетто).

Ключевые слова: атмосферный поршневой двигатель внутреннего сгорания (АПДВС), кривошипно-шатунный механизм (КШМ), газораспределительный механизм (ГРМ), органы впуска и выпуска, инженерные решения, подсистема газообмена.

Выбор основных параметров инженерных решений и рабочих процессов бензиновых АПДВС в составе энергетических установок для водного, воздушного, и наземного транспортного средства определяет их наиболее выгодные технико-экономические показатели.

К технико-экономическим показателям АПДВС относятся:

- термодинамические показатели, полученные в рабочей камере полного объема цилиндра, определялись по расчетной теоретической термодинамической диаграмме и условной цикловой подачей топлива (рис. 1). Основными термодинамическими показателями являются термодинамическая работа рабочего тела за цикл, термодинамическая мощность, термодинамический коэффициент полезного действия, удельный термодинамический расход топлива, литровая (удельная) мощность, цилиндровая (удельная) мощность одного цилиндра за цикл [1–5].

Термодинамическая мощность определяется по формуле

$$N_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_n \cdot \rho_v \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_t \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Термодинамический коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_{2v}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_{2v}}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n-1}} = 1 - \frac{1}{\delta^{n-1}}. \quad (2)$$

Основными эффективными показателями являются:

- эффективная мощность

$$N_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \eta_H \cdot \rho_V \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_e \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \text{ Вт}; \quad (3)$$

- крутящий момент

$$M_{к0} = 9,55 \cdot \frac{N_e}{n}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (4)$$

- литровая мощность

$$N_{л} = \frac{N_{eH}}{i \cdot V_a} = \frac{p_e \cdot n}{60 \cdot m}, \text{ кВт/л}; \quad (5)$$

- мощность одного цилиндра за цикл

$$N_{ц} = \frac{N_{eH}}{i \cdot V_a \cdot \frac{n}{2}}, \text{ кВт/1ц,ц}; \quad (6)$$

- эффективный коэффициент полезного действия

$$\eta_e = \frac{N_e \cdot 1000 \cdot 3600}{g_e \cdot N_e \cdot Q_H}; \quad (7)$$

- среднее эффективное давление – степень использования рабочего объема цилиндра АПДВС за цикл:

$$p_e = \frac{L_e}{V_a} = \eta_H \cdot \rho_V \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_e, \text{ МПа}; \quad (8)$$

- удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{G_T}{N_{eH}}, \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}. \quad (9)$$

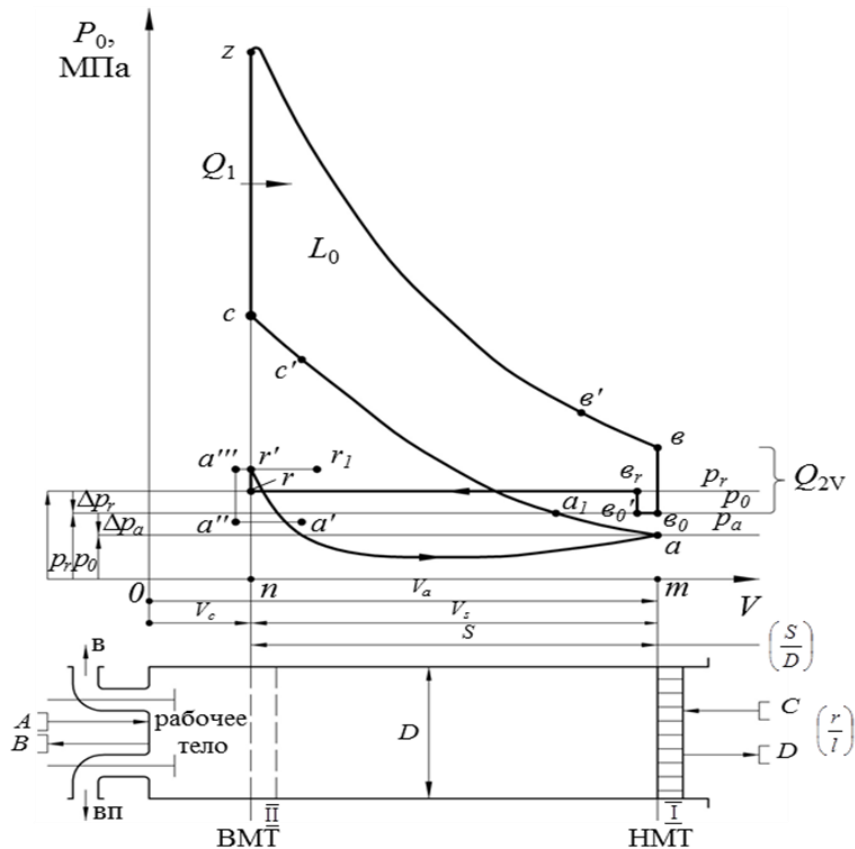


Рис. 1. Схема индикаторной диаграммы работы атмосферного поршневого ДВС с принудительным воспламенением

Формулы (1)–(9) раскрывают возможные пути получения максимальной энергоотдачи АПДВС. Отсюда представляется важным проанализировать закономерности энергопреобразования в рабочей камере АПДВС и определить перспективные направления повышения его эффективности, индикаторный КПД (η_i):

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_1} = \frac{(Q_1 - Q_2) - Q_m}{Q_1} = \eta_t - \frac{Q_m}{Q_1}, \quad (10)$$

где L_i – индикаторная работа; Q_m – технические потери (неполнота сгорания, теплоотдача от рабочего тела в стенки рабочей камеры цилиндра, рост теплоемкости рабочего тела, отличие реальной динамики сгорания от закона теплоподвода в термодинамическом цикле, предварительные выпуски) – принципиально устранимые потери теплоты.

ГОСТ 14846-91 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» устанавливает понятия «мощность нетто» и «мощность брутто».

Под мощностью нетто понимается мощность, снятая с фланца коленчатого вала АПДВС, изготовленного, отрегулированного и обкатанного в соответствии с техническими условиями на двигатель, при укомплектованности двигателя с серийным оборудованием – вентилятором, кожухом вентилятора, радиатором системы охлаждения, воздухоочистителем, глушителем шума выпуска (комплектующие транспортного средства). Полученные по результатам испытаний значения мощности нетто близко к показателю мощности, измеренному по стандарту DIN.

Мощность брутто – мощность, снятой с фланца коленчатого вала АПДВС, изготовленного, отрегулированного и обкатанного в соответствии с техническими условиями на двигатель (комплектация испытательного моторного стенда). Значение мощности брутто больше мощности нетто из-за разных комплектаций АПДВС: в составе энергетической установки транспортного средства и в составе испытательного моторного стенда.

В рекламной и популярной литературе принято технико-экономические показатели АПДВС приводить в комплектации брутто.

Анализ технико-экономических показателей АПДВС первого, второго, третьего и четвертого поколений, разработанных и выпускаемых Горьковским автомобильным и Заволжским моторным заводами (табл. 1 – табл. 6 и рис. 2 – рис. 5) показывают: инженерное решение АПДВС второго поколения модели ЗМЗ-21А, Р-4, $V_h = 2,445 \text{ дм}^3$, диаметр цилиндра 92 мм и ход поршня 92 мм была разработана в КЭО ГАЗ.

Перспективное инженерное решение имело верхнее расположение клапанов в головке цилиндров и камеру сгорания с минимальными тепловыми потерями, кинематическую схему КШМ и ГРМ, позволившие обеспечить повышение массового наполнения рабочей камеры цилиндра окислителем и энергоносителем и повысить энергетические и динамические показатели АПДВС второго поколения в 1,47 раза по сравнению с АПДВС первого поколения.

Таблица 1

Двигатель М-20 – первое поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	3800
Мощность N_e , кВт	11,31	25,13	35,50	35,14
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	108,00	120,00	113,00	88,30
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	390	347	356	400
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	4,41	8,72	12,64	14,06
Эффективный КПД η_e	0,285	0,321	0,312	0,278
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,476	0,476	0,466	0,414
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	4,62	10,27	14,51	14,36
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	2,31	5,14	7,26	7,18

Таблица 2

Двигатель ЗМЗ-21А – второе поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000
Мощность N_e , кВт	15,9	34,9	48,2	51,5
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	151,5	166,7	153,4	123
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	340	321,5	338,5	377
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	5,4	11,22	16,31	19,42
Эффективный КПД η_e	0,241	0,254	0,242	0,217
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88
Коэффициент наполнения, η_n	0,793	0,834	0,818	0,738
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	6,49	14,27	19,69	21,05
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	3,24	7,14	9,85	10,53

Таблица 3

Двигатель ЗМЗ-24-01 – третье поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000	4500
Мощность N_e , кВт	15,5	35,4	51	61,5	62,5
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	147,9	169	162,6	146,8	132,5
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	377	362,9	319,6	356,1	400,6
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	5,84	12,77	15,75	21,89	25,04
Эффективный КПД η_e	0,217	0,225	0,256	0,230	0,204
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
Коэффициент наполнения, η_n	0,858	0,949	0,790	0,833	0,846
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	6,33	14,39	20,14	25,14	25,55
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	3,17	7,19	10,07	12,57	12,77

Таблица 4

Двигатель ЗМЗ-4021.10 – четвертое поколение

Обороты n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000	4500
Мощность N_e , кВт	14,4	34,7	52,8	64,6	66,2
Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м	137	165,5	168	154,2	140,5
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	356,6	298,7	294	314,2	340,8
Часовой расход топлива G_T , кг/ч	5,12	10,35	15,5	20,3	22,6
Эффективный КПД η_e	0,229	0,274	0,278	0,260	0,240
Коэффициент избытка воздуха, α	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
Коэффициент наполнения, η_n	0,752	0,769	0,778	0,772	0,763
Литровая мощность $N_{л}$, кВт/л	5,86	14,16	21,58	26,4	27,06
Цикловая мощность $N_{ц}$, кВт/л·ц	2,93	7,08	10,79	13,2	13,53

Таблица 5

Технико-экономические показатели АДВС

Оценочные показатели		Поколение ПДВС			
		Первое	Второе	Третье	Четвертое
Номинальная мощность кВт, при $n=$ мин ⁻¹ и % улучш.	кВт	35,14	51,5	62,5	66,2
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	146,5	176	188
Максимальный крутящий момент, при $n=$ мин ⁻¹ и % улучш.	Н·м	120	166,7	169	171
	мин ⁻¹	2000	2000	2000	2500
	%	100	138,9	148	142,5
Удельный расход топлива на номинальной мощности, при $n=$ мин ⁻¹ и % улучш.	$\frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$	400	377	356	340,8
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	94,3	89,0	85,2
Эффективный КПД при номинальной мощности и % улучш.	КПД	0,204	0,217	0,224	0,240
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	106,4	109,8	117,6
Коэффициент наполнения на номинальной мощности и % улучш.	η_n	0,414	0,752	0,763	0,88
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	181,6	184,3	212,6
Литровая мощность при номинальной мощности и % улучш.	$\frac{\text{кВт}}{\text{л}}$	14,36	21,05	25,55	27,06
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	146,6	177,9	188,4
Цикловая мощность при номинальной мощности и % улучш.	$\frac{\text{кВт}}{\text{л.ц}}$	7,18	10,53	12,77	13,53
	мин ⁻¹	3800	4000	4500	4500
	%	100	146,7	177,9	188,4

Таблица 6

Сравнение АДВС четвертого поколения в комплектации брутто и нетто

Параметры АДВС	Комплектация АДВС ЗМЗ-4021.10	
	брутто	нетто
1	2	3
Номинальная мощность, кВт, при n мин ⁻¹	$\frac{66,18}{4250}$	$\frac{55,15}{4250}$
	100 %	83,33 %
Максимальный крутящий момент, Н·м, при n мин ⁻¹	$\frac{166,8}{3000}$	$\frac{155,98}{300}$
	100 %	93,53 %
Удельный расход топлива на режиме номинальной мощности, г/(кВт·ч), при $n=4250$ мин ⁻¹	$\frac{378}{4250}$	$\frac{403}{4250}$
	100 %	115,63 %
Эффективный КПД на режиме номинальной мощности, при $n=4250$ мин ⁻¹	$\frac{0,235}{4250}$	$\frac{0,203}{4250}$
	100 %	86,36 %

Окончание табл. 6

1	2	3
Литровая мощность двигателя на режиме номинальной мощности, кВт/дм ³ , при $n=4250 \text{ мин}^{-1}$	27,07	22,56
	100 %	83,33 %
Коэффициент наполнения на режиме номинальной мощности, при $n=4250 \text{ мин}^{-1}$	0,793	0,768
	100 %	96,522 %
Степень сжатия	6,7	6,7
Применяемое топливо	А-76	А-76
Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	92x92	92x92

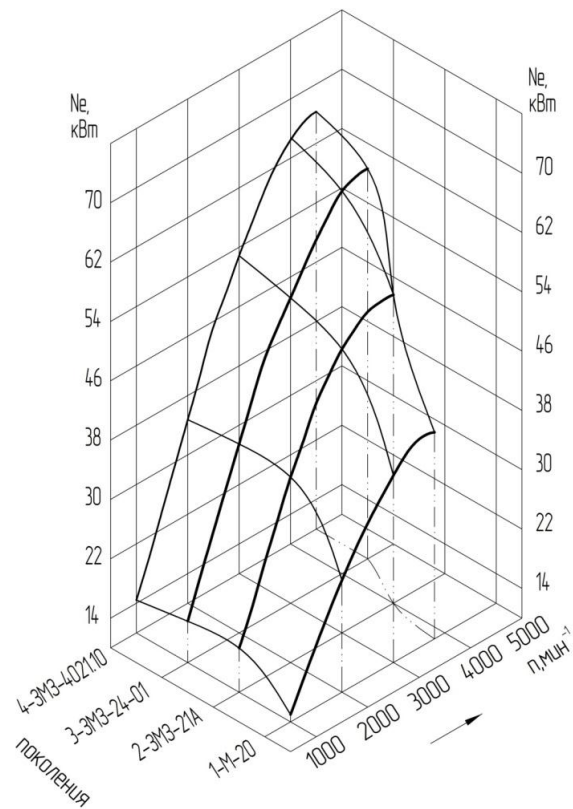


Рис. 2. Графики изменения мощности по внешней скоростной характеристике в комплектации ПДВС «брутто» для четырех поколений двигателей

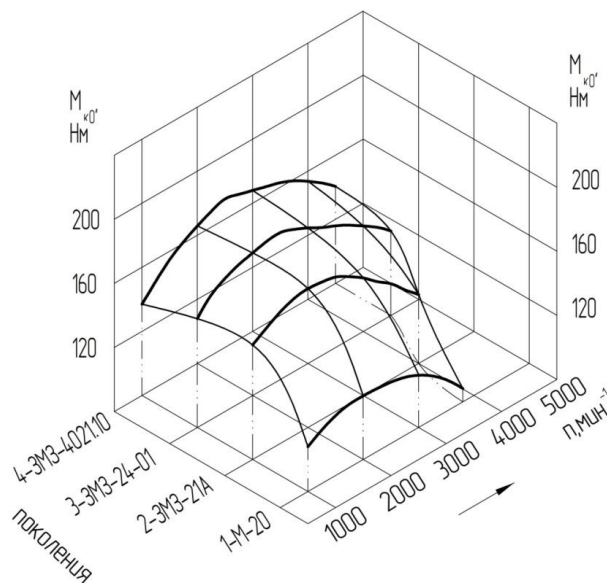


Рис. 3. Графики изменения крутящего момента по внешней скоростной характеристике в комплектации ПДВС «брутто» для четырех поколений двигателей

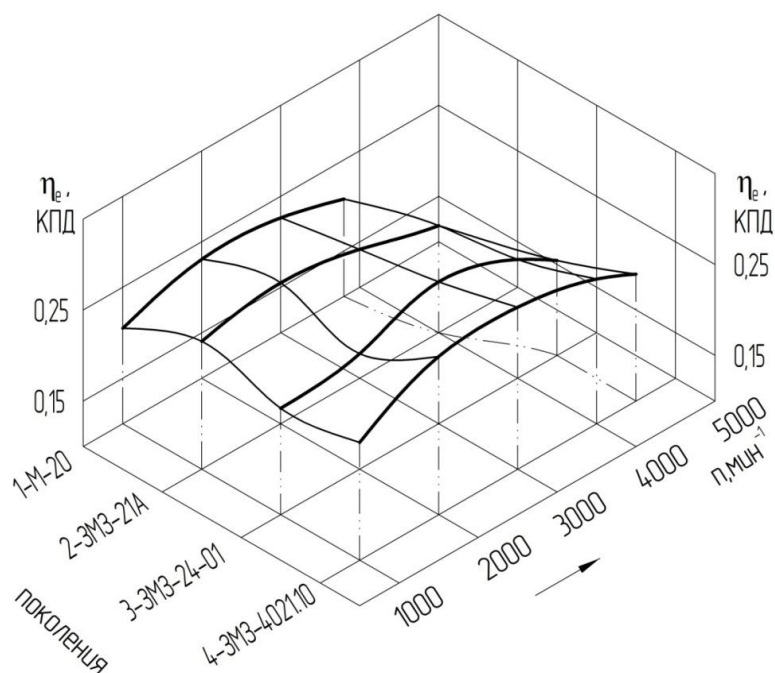


Рис. 4. Графики изменения коэффициента полезного действия по внешней скоростной характеристике в комплектации ПДВС «брутто» для четырех поколений двигателей

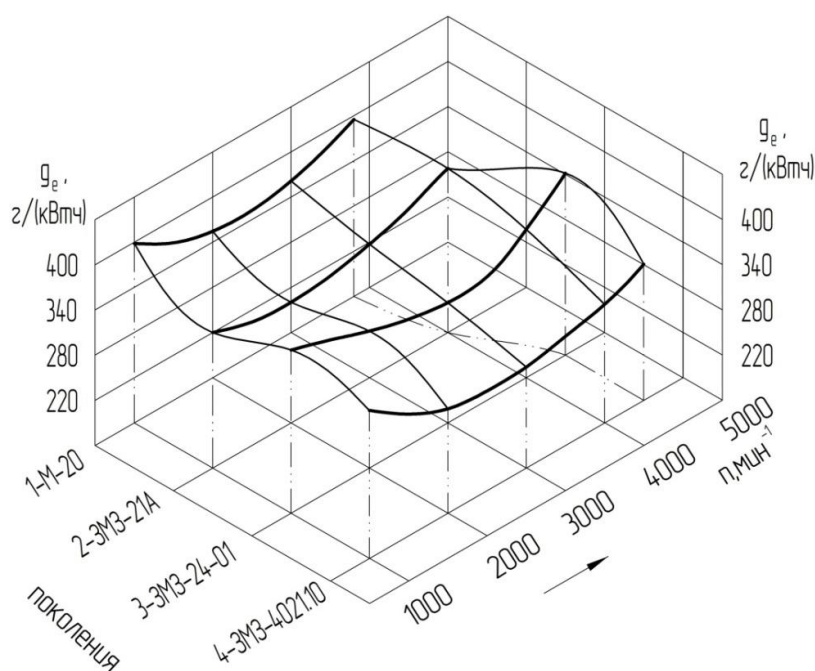


Рис. 5. Графики изменения удельного расхода топлива по внешней скоростной характеристике в комплектации ПДВС «брутто» для четырех поколений двигателей

Создание АПДВС третьего поколения – задача «заводская – межзаводская – отраслевая – межотраслевая и государственная». Поэтому без остановки производства взамен двигателя второго поколения модели ЗМЗ – 21А был поставлен новый перспективный ПДВС третьего поколения модель ЗМЗ – 24. На анализе отечественного и зарубежного опыта эксплуатации, ремонта и производства АПДВС первого и второго поколений специалистами КЭО ГАЗ было разработано инженерное решение АПДВС модели ЗМЗ-24, на ЗМЗ была проведена техническая подготовка производства, и в 1967 году родился первый АПДВС модели

ЗМЗ-24. Массовое производство началось с 1970 года (табл.3). АПДВС модели ЗМЗ-24 сохранил основные геометрические характеристики двигателя второго поколения ЗМЗ-21А (Р-4, $V_h=2,445 \text{ дм}^3$, диаметр цилиндра 92 мм и ход поршня 92 мм, степень сжатия 6,7), технико-экономические показатели его были повышены за счет совершенствования рабочих процессов и снижения механических потерь.

Это было достигнуто рациональными инженерными решениями путем теоретических и экспериментальных исследований и анализа отечественного опыта эксплуатации, ремонта и производства АПДВС первого и второго поколений. Были внедрены следующие рациональные инженерные решения:

- алюминиевый блок, отлитый методом высокого давления, разъем блока цилиндров с масляным картером, расположенным на 75 мм ниже оси коленчатого вала с целью повышения жесткости блока цилиндров;

- КШМ → чугунные крышки коренных подшипников с стале-алюминиевыми подшипниками скольжения (вместо баббитовых); чугунный коленчатый вал с демпфером крутильных колебаний и маховиком с зубчатым венцом; шатун с большой разъемной головкой, стале-алюминиевыми подшипниками скольжения (вместо баббитовых) и деталей крепления; малая головка шатуна с подшипником скольжения и каналом смазки; поршневой палец с деталями крепления; поршень с вертикальным бочкообразным (вместо конусообразного) профилем и горизонтальным овальным профилем юбки поршня без Т-образного разреза; компрессионных поршневых колец высотой 2 мм (вместо 2,5 мм); съемная чугунная с износостойкой вставкой гильза с нижним креплением; головка цилиндров с камерой сгорания, с увеличенными впускными и выпускными отверстиями, с медно-асбестовой прокладкой толщиной 2,35 мм между цилиндром и головкой цилиндра с деталями крепления;

- ГРМ → с нижним расположением распределительного вала из стали Ст45 (вместо стали Ст40), с увеличенными тарелками впускного и выпускного клапанов и увеличен их ход, две пружины на клапане, позволившими увеличить частоту вращения распределительного вала с 2000 до 2250 мин^{-1} ;

- улучшены органы впуска – двухкамерный карбюратор К-126Г (вместо однокамерного К-105), индивидуальные впускные трубопроводы для каждого цилиндра с увеличенным проходным сечением и уменьшенными гидравлическими потерями;

- улучшены органы выпуска – увеличенным проходным сечением трубопроводов и уменьшенными гидравлическими потерями подсистемы газообмена;

- улучшены рабочие органы подсистем смазки, охлаждения, топливоподачи с увеличением их расходных характеристик;

- освоена и внедрена замкнутая подсистема вентиляции картера, а также введен контроль токсичности отработавших газов в эксплуатации.

Были внедрены и другие усовершенствованные инженерные решения, позволившие улучшить технико-экономические показатели АПДВС третьего поколения модели ЗМЗ-24-01 в 1,78 раза по сравнению с АПДВС первого поколения модели ГАЗ-20.

Результаты проведенного анализа опыта эксплуатации, ремонта и производства АПДВС первого и второго и третьего поколений позволили провести модернизацию АПДВС третьего поколения с новыми технико-экономическими показателями. В результате внедренных инженерных решений в 1992 году родился ПДВС четвертого поколения модели ЗМЗ-4021. Модернизация АПДВС модели ЗМЗ-24-01 выполнена специалистами инженерных служб ОАО «ЗМЗ». К основным инженерным решениям АПДВС четвертого поколения модели ЗМЗ-4021 следует отнести:

- алюминиевый блок, отлитый методом кокильного литья, позволил улучшить его жесткость;

- КШМ был модернизирован вставной гильзой из легированного чугуна с верхним креплением и нижним уплотнением двумя резиновыми сальниками; введены шпильки М12 (вместо М11) для улучшения уплотнения медно-асбестовой прокладкой, расположенной между цилиндром двигателя и головкой цилиндров с повышенным моментом затяжки;

- настроенные органы впуска и выпуска отработавших газов из цилиндра с уменьшенными гидравлическими потерями обеспечили повышение номинальной мощности;
- улучшены органы впуска, карбюратор К-151 (вместо К-126Г) с увеличенными проходными сечениями и антитоксичные органы уменьшили токсичность отработавших газов.

Технико-экономические показатели АПДВС четвертого поколения модели ЗМЗ-4021 значительно улучшены и превосходят в 1,88 раза технико-экономические показатели АПДВС первого поколения модели ГАЗ-20.

Анализ отечественного опыта эксплуатации, ремонта и производства показал, что АПДВС в комплектации нетто имеет технико-экономические показатели на 10...17% ниже по сравнению с комплектацией «брутто» (табл. 6) а:

- большой прорыв картерных газов;
- низкий коэффициент наполнения;
- изменение степени сжатия в процессе эксплуатации АПДВС;
- неполнота сгорания энергоносителя в рабочей камере цилиндра;
- отсутствие настройки органов впуска и выпуска подсистемы газообмена;
- выход из строя деталей КШМ (задиры юбки и головки поршня из-за недостаточного диаметрального зазора, неуравновешенности поршня и его перегрев).

В качестве примера используем материалы, приведенные в специальной литературе при эксплуатации ПДВС в составе транспортного средства.

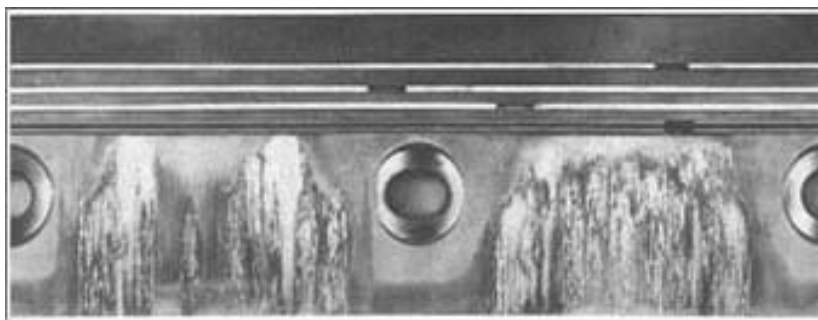


Рис. 6. Фрикционный износ юбки поршня

На рис. 6 изображена юбка поршня с сильным фрикционным износом со следами заедания со стороны как высокого, так и низкого давления. Эти места выглядят глянцевыми, как будто отполированными, и концентрируются, главным образом, по направлению к нижнему краю юбки. Пояс колец и кольца поршня – в хорошем состоянии.

При механической обработке поршня придан такой профиль, что при рабочей температуре юбка опирается на стенку цилиндра по всей длине. Если, например, заедание начинается от края юбки и происходит по обеим несущим сторонам (высокого и низкого давления), то из этого можно сделать вывод, что зазоры при сборке были слишком малыми. Такие повреждения случаются после непродолжительной эксплуатации, поскольку тепловому расширению препятствуют недостаточные зазоры. Причиной недостаточных зазоров может быть перегрев двигателя из-за дефекта системы охлаждения (недостаток воды, неисправный клапан радиатора). Если охлаждение холодной водой происходит слишком быстро, это также может быть причиной недостаточных зазоров, поскольку цилиндр быстро сжимается из-за чрезмерной скорости охлаждения, в то время как поршень остается горячим. Если следы заедания распределены неравномерно по периферии поршня причиной заедания поршня может быть деформация цилиндра. Также показателями этого являются локальные полированные зоны («блестящие пятна»). В этом случае диаметр отверстия цилиндра после переборки двигателя оставлен слишком малым.

Для предотвращения данного износа должны быть выдержаны точные размеры цилиндропоршневой группы. Пользуясь размерами диаметра юбки и зазоров, приведенными на

головке поршня, можно вычислить точный диаметр цилиндра, который необходимо проверить перед установкой поршня.

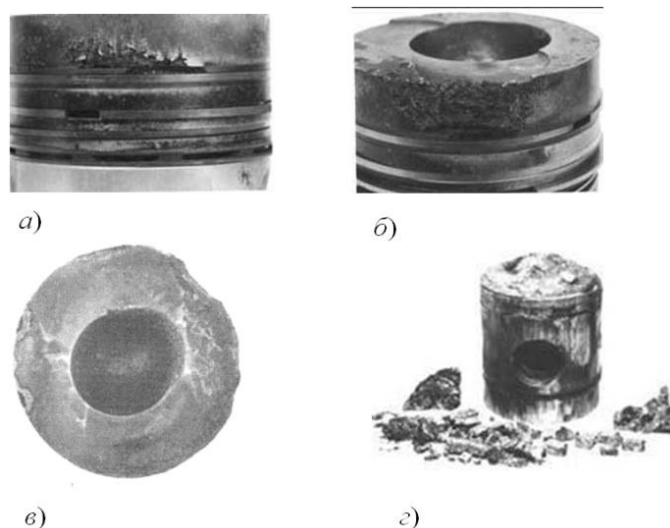


Рис. 7. Оплавление головки поршня и его поверхностей

На рис. 7 изображены: *а* – верхняя поверхность частично оплавлена над вставкой колец; *б* – продолжение процесса оплавления по всей головке поршня (в обоих случаях вставка колец разрушена); *в* – головка поршня имеет оплавление, начинающееся от края камеры сгорания и кромки головки; *г* – головка и верхняя поверхность полностью разрушены.

Несгоревшее топливо из-за запаздывания зажигания и нарушений искры осажается в зазоре между поршнем и цилиндром. С одной стороны, это приводит к повышенному износу колец, с другой стороны, накопленное топливо возгорается без контроля. Местами создается температура, превышающая температуру плавления материала поршня. Впоследствии оплавления головки поршня, показанные на рис. 7, *а*, *б*, могут привести к полному разрушению поршня рис.7, *г*. Причинами неправильного сгорания являются слишком низкая компрессия (вследствие износа, большого зазора или неправильного выбора угла опережения зажигания), нарушения устройств подачи топлива (форсунки, забитые углеродистыми отложениями, или излишнее количество впрыскиваемого топлива в цилиндр). Оплавление краев камеры сгорания и кромки головки поршня (рис.7, *в*) можно объяснить излишним количеством впрыскиваемого топлива. Поврежденные форсунки или несвоевременное срабатывание насоса инжектора (для повышения эффективности) приводят к превышению температуры.

Для предотвращения данных повреждений необходимо точно рассчитать необходимое количество топлива впрыскиваемого в цилиндр двигателя, правильно определить и выставить угол опережения впрыскивания топлива. Обеспечить рекомендуемый зазор между поршнем и цилиндром.

Особое место в работе занимает выбор инженерных решений по повышению технико-экономических показателей АПДВС в комплектации нетто, до уровня и выше, в комплектации брутто, приведенным выше:

1. Инженерное решение по уменьшению прорыва картерных газов.

Таблица 7

Расход картерных газов по внешней скоростной характеристике серийного АПДВС

n , мин ⁻¹	1000	2000	3000	4000	4250
$V_{\text{КГ}}$, л/мин ±	40,5	41,2	42,4	44,3	45,1

$V_{кг}, м^3/1ц,цикл \pm$	0,0000405	0,0000206	0,0000141	0,0000111	0,0000106
---------------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Причиной большого прорыва горючей смеси и отработавших газов в картер и обратно в цилиндр из-за недостаточного уплотнения рабочей камеры цилиндра (нарушение геометрии гильзы цилиндра, поршня и поршневых колец от механических и тепловых нагрузок). Для устранения недостатков выполнили инженерное решение (ввели буртик в нижней части гильзы цилиндра и обеспечили геометрию цилиндра, а также заменили поршень литой на штампованный с бочкообразным профилем на головке и юбке поршня и уменьшили до 3 мм жаровый пояс цилиндра).

Эти мероприятия позволили уменьшить в три раза прорыв горючей смеси и отработавших газов из рабочей камеры цилиндра в картер двигателя и обратно, прорыв картерной смеси из картера двигателя в рабочую камеру цилиндра.

2. Инженерное решение по настройке органов впуска и выпуска подсистемы газообмена для повышения коэффициента наполнения и обеспечения вращательного движения горючей смеси вдоль и вокруг продольной оси цилиндра для качественного смесеобразования и быстрого сгорания паров топлива. При этом, на режиме номинальной мощности для АПДВС четвертого поколения продолжительность газообмена составило $50+180+180+64=474^0$ п.к.в. По результатам расчета: предварение выпуска было увеличено и составило 72^0 п.к.в. до прихода поршня в НМТ. При свободном выпуске 60% массы отработавших газов с давлением 0,4...0,5 МПа и со скоростью 500...720 м/с вытекает из рабочей камеры цилиндра в органы выпуска и резко снижает свое давление до атмосферного, потери работы выпуска уменьшаются и при принудительном выпуске 40% массы оставшихся в рабочей камере цилиндра отработавших газов со скоростью 90 м/с вытесняется в органы выпуска с минимальными гидравлическими сопротивлениями. Расчетно-экспериментальным методом была определена продолжительность дозарядки цилиндра в процессе наполнения, которая составила 68^0 п.к.в. после прохода поршнем НМТ при закрытии впускного отверстия. Продолжительность газообмена увеличилась $72+180+180+68=500^0$ п.к.в. на 5,2%.

Особое место в работе занимает выбор длины впускного трубопровода. Теоретический расчет был выполнен программным обеспечением «Альбея» в САПР ДВС. Методика расчета включает:

- режиме номинальной мощности выбирается определяющий (гидравлический) диаметр горловины отверстия;
- в режиме максимального крутящего момента была выбрана длина впускного канала в относительных единицах $L = \frac{l}{d_{\Gamma}} = 26$, допускается $\frac{l}{d_{\Gamma}} = 18...23$.

3. Инженерное решение по изменению степени сжатия в процессе эксплуатации АПДВС относятся к уплотнению рабочей камеры цилиндра между цилиндром и головкой цилиндров медно-асбестовой прокладкой толщиной 2,35 мм. В процессе эксплуатации толщина ее постепенно уменьшалась до 1,5 мм. Изменение толщины прокладки уменьшила полный объем цилиндра, объем камеры сжатия, степень сжатия и тепловой зазор ГРМ, что привело к нарушению герметичности рабочей камеры цилиндра, а степень сжатия увеличилась с 6,7 до 7,0, т.е на 4,5%, нарушился рабочий цикл АПДВС. Анализ и синтез потребовал нового инженерного решения: медно-асбестовая прокладка была заменена металлической из мягкого алюминия толщиной 2 мм, позволившая улучшить тепловое состояние головки цилиндров и стенок цилиндра, жаровый пояс поршня на 1 мм вышел из цилиндра, что позволило улучшить процессе смесеобразования и сгорания.

Выполненные инженерные решения позволили модернизировать АПДВС четвертого поколения и улучшить технико-экономические показатели на 10...17% и получить АПДВС

имеющий одинаковые технические характеристики, как в комплектации брутто, так и в комплектации нетто.

Библиографический список

1. **Минеев, А.М.** Двигатели Заволжского моторного завода. Создание и развитие конструкций, технологий и производства 1958–1998 гг. / А.М. Минеев [и др.] // ОАО Заволжский моторный завод. – Н. Новгород, 1998.
2. **Захаров, Л.А.** Метод оценки термодинамических показателей поршневого двигателя работающего по циклу Отто на ранней стадии проектирования / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Журнал ААИ, 2011. №2(67). С. 42–47.
3. **Захаров, Л.А.** Современный поршневой ДВС с перспективными энергетическими, экономическим и экологическими показателями, получаемыми за счет повышения внутренней энергии рабочего тела / Л.А. Захаров [и др.] // Журнал ААИ. 2013. №2(79). С. 14–20.
4. **Захаров, Л.А.** Совершенствование термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по гибриднему циклу / Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 1 (86). С. 174–184.
5. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. – 33 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.04.2015*

L.A. Zakharov¹, A.N. Tarasov^{1,2}, I.L. Zakharov¹, A.V. Degtyarev^{1,3}

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS ATMOSPHERIC INTERNAL COMBUSTION PISTON ENGINE AND ANALYSIS OF DOMESTIC EXPERIENCE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC "Joint Engineering Centre" JSC GAZ²,
ALEXEEV'S CENTRAL HYDROFOIL DESIGN BUREAU³

The concept of engineering solutions in a complete set of gross inline four-cylinder "atmospheric piston engine" (APDVS) first, second, third and quadruple generations produced by the Gorky Automobile Plant, Zavolzhskii and Ulyanovsk Motor Plant. Summarizes the modernization of engineering solutions for every generation. A special place of modernization on the optimal engineering solutions was paid APDVS fourth generation in the configuration of the vehicle (net).

Key words: atmospheric piston internal combustion engine, a crank mechanism, gas distribution mechanism, intake and exhaust authorities, engineering solutions, gas exchange subsystem.

УДК 629.12

В.П. Лобастов, Е.В. Зеличенко, А.В. Скворцов**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВОПРОСАМ ПРОЧНОСТИ СУДОВ «РЕКА-МОРЕ»
ПЛАВАНИЯ ПО КЛАССИФИКАЦИИ РЕЗОЛЮЦИИ №61 ЕЭК ООН**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель данной работы заключалась в продолжении исследования приоритетного направления в сфере водного транспорта, в частности, судов типа «река-море». Рассмотрены результаты разработки технических предписаний ЕЭК ООН применительно к судам «река-море» плавания. Изложены рекомендации по вопросам прочности судов «река-море» плавания по классификации Резолюции №61 ЕЭК ООН.

Ключевые слова: ЕЭК ООН, Резолюция №61, глава 20В, суда «река-море» плавания, Правила классификации и постройки судов смешанного (река-море) плавания (ПССП), корпус, прочность корпуса.

**Реализация результатов разработки технических предписаний ЕЭК ООН
применительно к судам «РЕКА-МОРЕ» плавания**

Учитывая известные преимущества судов «река-море» плавания [1] в пересмотренное издание Резолюции №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания», по предложению Рабочей группы SC.3 по внутреннему водному транспорту Комитета внутреннего транспорта ЕЭК ООН, была включена глава 20В «Особые положения, применяемые к судам «река-море» плавания» [2, 3].

В основу работы над главой 20В был положен базовый документ, представленный Российской Федерацией относительно возможного способа и методологии разработки технических требований к судам типа «река-море» плавания [4]. Предполагалось, что на основе исходных материалов этого базового документа первоначальная редакция отдельных блоков будущих предписаний по просьбе рабочей группы будет подготовлена экспертами Российской Федерации и других стран.

В нашей стране разработка предложений по техническим предписаниям ЕЭК ООН к судам «река-море» плавания для включения их в главу 20В Резолюции №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания» была поручена Российскому Речному Регистру (далее РРР).

Техническое руководство осуществляли В.Т. Огарков – Главное управление РРР, В.П. Лобастов – Верхне-Волжский филиал РРР.

Техническое сопровождение проводили В.Ю. Иванова, Ю.Н. Вериш и В.В. Воронцов – Главное управление РРР.

Активное участие в разработке предложений по техническим предписаниям принимали специалисты нижегородской корабельной школы П.И. Бажан – Центр разработки Правил РРР, В.А. Зуев, Е.В. Зеличенко – НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Для целей главы 20В были установлены следующие условия и зоны плавания судов в море:

і) ограниченная зона между портами одной страны, в которой допускаются к плаванию суда внутреннего плавания с эксплуатационными ограничениями по временам года и волнению при выполнении специальных требований администрации и/или признанного классификационного общества к мореходным характеристикам, остойчивости, конструкции

корпуса, механизмам и электрооборудованию, навигационному оборудованию и средствам связи;

ii) зона RS 2,0 (высота волны до 2,0 м (здесь и далее высота волны означает высоту волны 3%-ной обеспеченности)): морские районы в конкретных географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

iii) зона RS 3,0 (высота волны до 3,0 м): морские районы в конкретных географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

iv) зона RS 3,5 (высота волны до 3,5 м): морские районы в конкретных географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

v) зона RS 4,5 (высота волны до 4,5 м): морские районы, в которые допускаются суда «река-море» плавания: в закрытых морях при удалении от мест убежища до 100 миль (расстояние между местами убежища до 200 миль), в открытых морях при удалении от мест убежища до 50 миль (расстояние между местами убежища до 100 миль);

vi) зона RS 6,0 (высота волны до 6,0 м): морские районы, в которые допускаются суда «река-море» плавания: в закрытых морях при удалении от мест убежища до 100 миль (расстояние между местами убежища до 200 миль), в открытых морях при удалении от мест убежища до 50 миль (расстояние между местами убежища до 100 миль).

При назначении условий плавания судов зоны RS 4,5 и RS 6,0 учитывалось, что:

- «закрытые моря» - обособленные сушей внутриматериковые и средиземные, соединяющиеся с океанической акваторией узкими проливами, моря, отличающиеся от океанической акватории соленостью и температурой воды, характером течения, приливами и ветро-волновым режимом;

- «открытые моря» - окраинные моря, хорошо сообщающиеся с океанической акваторией, воды которых мало отличаются от океанических по солености, температуре, течениям, приливам и ветро-волновому режиму.

При подготовке предложений по вопросам прочности судов «река-море» плавания было учтено, что:

- согласно требованиям п. 20В-1.3 Резолюции №61 суда «река-море» плавания должны быть построены под наблюдением признанного классификационного общества в соответствии с его Правилами классификации;

- районы плавания, характеризующиеся волнением в диапазоне $h_{3\%}$ от 2,0 до 3,5 м классифицированы РРР и имеют отработанные и проверенные многолетним опытом эксплуатации судов «река-море» плавания нормативы в части эксплуатационных ограничений по временам года, географии района плавания и волнения, по мореходным характеристикам, прочности, остойчивости, непотопляемости, конструкции корпуса и др.;

- изменения условий плавания судов в районах, характеризующихся волнением $h_{3\%}$ 4,5 м (увеличение допустимого волнения, возможность эксплуатации на трассах, характеризующихся большим удалением от места убежища, и в более бурных районах и сезонах) исследовано РРР и принимая во внимание длительный и, в целом, положительный опыт эксплуатации судов на волнении в диапазоне волн $h_{3\%}$ от 2,0 до 3,5 м – классифицировано РРР;

- районы плавания, характеризующиеся волнением $h_{3\%}$ от 4,5 до 6,0 м классифицированы также Российским Морским Регистром судоходства (далее РМРС).

При этом суда «река-море» плавания, по классификации РРР, совершающие международные рейсы, должны удовлетворять также требованиям международных конвенций.

В табл. 1 представлена информация о нормативной базе российских классификационных обществ, которая может быть использована при проектировании, строительстве и испытании судов различных зон плавания по классификации Резолюции №61.

Таблица 1

Идентификация зон плавания судов в море по Резолюции №61 и классов судов PPP и РМРС

Зоны плавания по классификации Резолюции №61	Класс судна по классификации PPP	Класс судна по классификации РМРС
RS 2,0 ¹⁾	О-ПР 2,0	-
RS 3,0 ²⁾	М-ПР 2,5	-
RS 3,5 ³⁾	М-СП 3,5	R3-RSN
RS 4,5 ⁴⁾	М-СП 4,5	R2-RSN (4,5)
RS 6,0	-	R2-RSN

Примечания: 1) – с использованием требований Правил PPP для судов класса «О-ПР 2,0»;
 2) – с использованием требований Правил PPP для судов класса «М-ПР 2,5»;
 3) – с использованием требований Правил PPP для судов класса «М-СП 3,5»;
 4) – с использованием требований Правил PPP для судов класса «М-СП 4,5».

География морских районов плавания судов с классом О-ПР, М-ПР, М-СП, R3-RSN, которая может быть принята или дополнена с учетом предложений и обоснований других заинтересованных стран для зон плавания RS 2,0, RS 3,0, RS 3,5 представлена на рис. 1 – рис. 3.



Рис. 1. Морские районы плавания судов с классом «О-ПР 2,0»

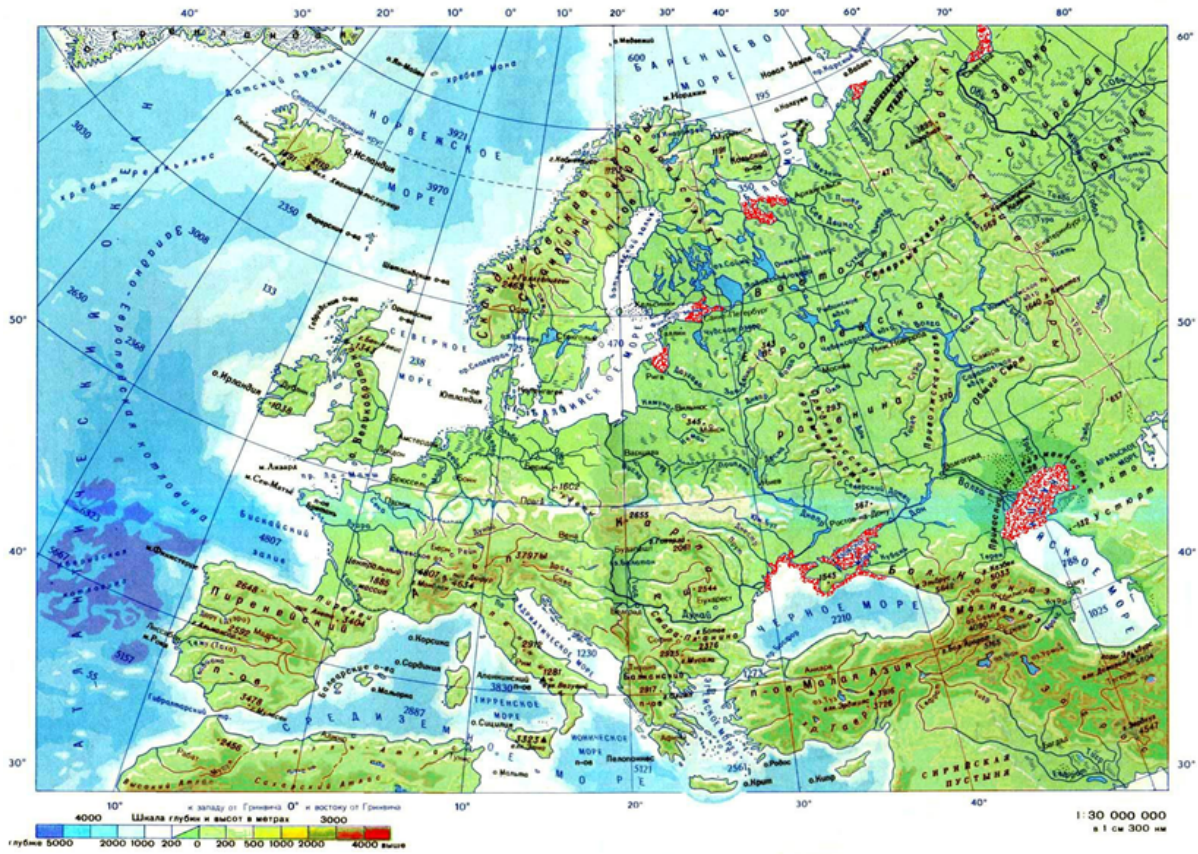


Рис. 2. Морские районы плавания судов с классом «М-ПР 2,5»

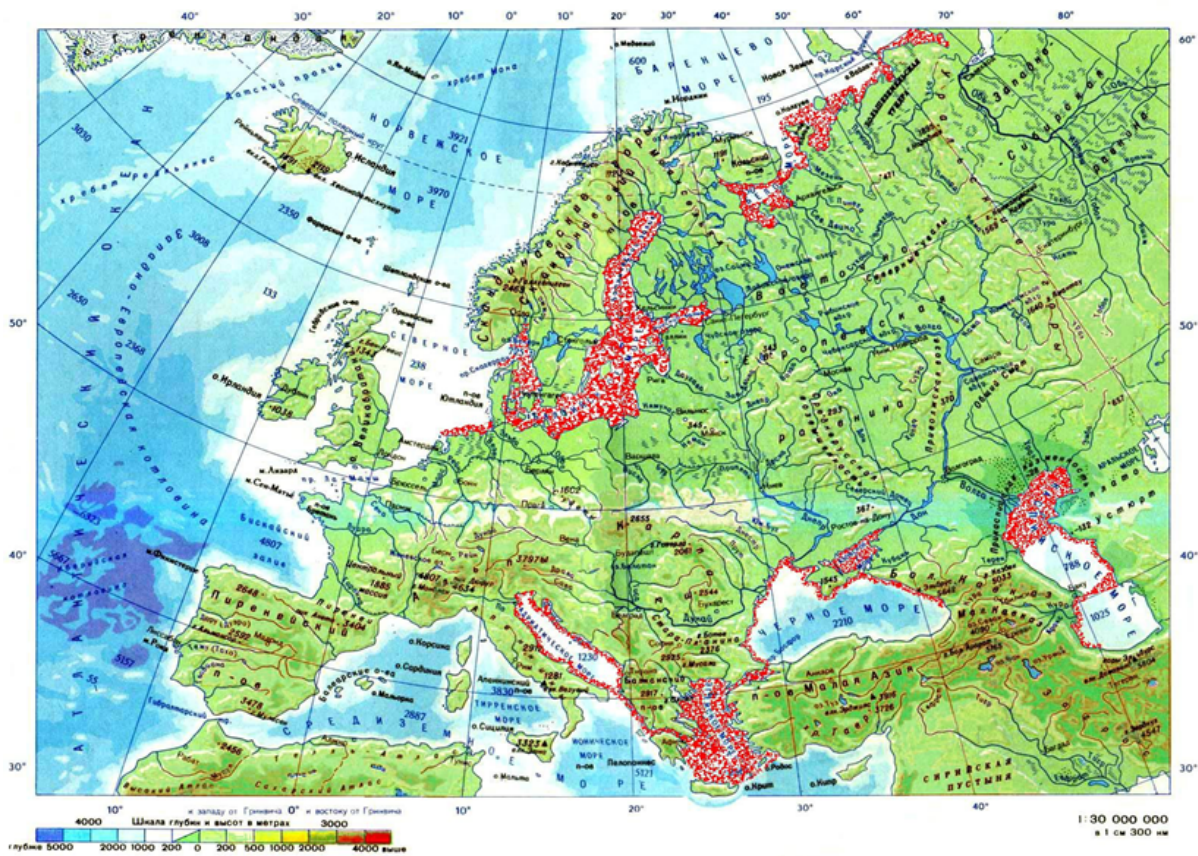


Рис. 3. Морские районы плавания судов с классом «М-СП 3,5», R3-RSN

Далее приведены рекомендации по вопросам прочности судов «река-море» плавания по классификации Резолюции №61 ЕЭК ООН, разработанные на основе требований Правил РРР [5].

Рекомендации по вопросам прочности грузовых самоходных судов «РЕКА-МОРЕ» плавания зон RS 2,0, RS 3,0, RS 3,5, RS 4,5 по классификации резолюции №61 ЕЭК ООН

Общие положения

При использовании требований Правил РРР для судов типа «река-море» плавания настоящие рекомендации распространяются на следующие типы водоизмещающих судов: сухогрузные и наливные длиной от 25 до 140 м.

Для расчетов общей прочности судна суммарный изгибающий момент включает в себя изгибающий момент на тихой воде и дополнительный волновой изгибающий момент, который в свою очередь включает в себя ударную составляющую.

Дополнительный волновой изгибающий момент принимается постоянным на длине $0,5 L$ в средней части судна и уменьшающимся к оконечностям до нуля по линейной зависимости.

Согласно требованиям Правил РРР дополнительный волновой изгибающий момент следует определять с помощью зависимости, кН·м:

$$M_{дв} = \pm 9,81 \cdot k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \delta \cdot B \cdot L^2 \cdot h, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент, значения которого вычисляются по формуле

$$k_0 = 1,24 - 1,7 \cdot B/L \leq 1,0; \quad (2)$$

k_1 – коэффициент, значения которого в зависимости от класса судна и его длины L определяются по табл. 2;

k_2 – коэффициент, значения которого в зависимости от длины судна L и осадки носом T_H определяются по формуле

$$k_2 = 2 - 20 \cdot T_H/L \geq 1,0; \quad (3)$$

k_3 – коэффициент, значения которого для грузовых самоходных судов в зависимости от класса судна, его длины L и принятой допускаемой высоты волны определяются по табл. 3.

L – длина судна, м;

T – осадка судна, м;

δ – коэффициент полноты водоизмещения;

h – расчетная высота волны, принимаемая равной для судов класса «М-СП» - 3,5 м; класса «М-ПР» - 3,0 м; класса «О-ПР» - 2,0 м.

Таблица 2

Определение коэффициента k_1

Длина судна, м Класс судна, коэффициент k_1	25	60	100	140
«М-СП», k_1	0,0147	0,0147	0,0147	0,0137
«М-ПР», k_1	0,0130	0,0130	0,0117	0,0102
«О-ПР», k_1	0,0154	0,0154	0,0114	0,0089

Таблица 3

Определение коэффициента k_3

Класс судна	Допускаемая высота волны, м	Длина судна, м	Коэффициент k_3			
			25	60	100	140
«М-СП»	4,5	k_3	1,114	1,114	1,277	1,367
	3,5		1,0	1,0	1,0	1,0
	3,0		0,914	0,914	0,870	0,843
«М-ПР»	2,5	k_3	1,0	1,0	1,0	1,0
	2,0		0,915	0,887	0,871	0,839
«О-ПР»	2,0	k_3	1,0	1,0	1,0	1,0
	1,5		0,866	0,866	0,911	0,841

Значения L , T и δ следует принимать исходя из расчетного случая нагрузки при определении изгибающего момента на тихой воде.

Из представленных материалов следует, что при допустимой высоте волны, равной расчетной, значение коэффициента k_3 принимается равным 1.

При $h_{\text{дон}} > h_{\text{расч}}$, $k_3 > 1$;

при $h_{\text{дон}} < h_{\text{расч}}$, $k_3 < 1$.

Такая вариация с коэффициентом k_3 была необходима в начальной стадии освоения прибрежных морских районов существующими судами внутреннего плавания с назначением дополнительных ограничений по высоте волны в зависимости от прочностных характеристик судна.

Аналогичный подход был использован при определении дополнительного волнового изгибающего момента для судов класса «М-ПР 2,5» для которых в качестве расчетной высоты волны была принята волна $h_{3\%}$, равная 3,0 м.

В настоящее время создание судов «река-море» плавания необходимых классов по Правилам РРР и зонам плавания по классификации Резолюции №61, ориентировано, в первую очередь, на новое судостроение.

Так, согласно п. 20В-1.1.2 Резолюции №61, положения, применяемые к судам «река-море» плавания, применяются к новым судам для заданного района плавания и необходимость накладывать дополнительные ограничения по допускаемой высоте волны, отличной от расчетной, для той или иной зоны плавания отсутствует.

При таком подходе наличие коэффициента k_3 в формуле дополнительного волнового изгибающего момента является избыточным.

Дополнительный волновой изгибающий момент для судов, эксплуатирующихся в зонах на волнении с допустимой высотой волны равной расчетной, рекомендуется определять с помощью зависимости, кН·м:

$$M_{\text{дв}} = \pm 9,81 \cdot k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \delta \cdot B \cdot L^2 \cdot h. \quad (4)$$

Необходимость выполнения коррекции, для исключения коэффициента k_3 из формулы (2) и внесения уточнений в коэффициент k_1 , рассмотрена применительно к зонам морского района эксплуатации RS 2,0, RS 3,0, RS 3,5, RS 4,5.

Суда «река-море» плавания зоны RS 2,0

Значения k_0 , k_1 , k_2 , h при вычислении дополнительного волнового изгибающего момента по формуле (4) рекомендуется назначить с использованием требований Правил РРР для судов «река-море» плавания класса «О-ПР 2,0»:

- k_0 – по формуле (2);
- k_1 – по табл. 2 применительно к судам класса «О-ПР»;
- k_2 – по формуле (3), при этом осадка носом судна во всех случаях нагрузки должна

быть не менее 0,9 м при $L \geq 60$ м и не менее 0,5 м при $L \leq 25$ м. Для промежуточных длин судов минимально допустимая осадка носом определяется линейной интерполяцией;

- $h - h_{3\%} = 2,0$ м.

Дополнительной коррекции коэффициента k_1 по формуле (4) в данном случае не требуется, так как значение исключаемого коэффициента k_3 для расчетной высоты волны $h_{3\%} = 2,0$ м равняется 1 (см. табл. 3).

Суда «река-море» плавания зоны RS 3,0

Так как требования Правил РРР к судам класса «М-ПР 2,5» не предполагают определение дополнительного волнового изгибающего момента $M_{ДВ}$ для допустимой высоты волны $h = 3,0$ м, воспользуемся требованиями Правил РРР для судов класса «М-СП», согласно которым $M_{ДВ}$ может быть рассчитан на необходимую нам высоту волны $h = 3,0$ м.

Коррекцию коэффициента k_1 формулы (4) для судов «река-море» плавания зоны RS 3,0 выполняем с учетом требований Правил РРР для судов класса «М-СП 3,0» и пересчитываем по зависимости:

$$k_1^{«RS 3,0»} = k_1^{«М-СП»} \cdot k_3^{«М-СП 3,0»} \cdot h^{«М-СП 3,5»} / h^{«М-СП 3,0»},$$

где $k_1^{«М-СП»}$ – принимается по табл. 2;

$k_3^{«М-СП 3,0»}$ – принимается по табл. 3;

$h^{«М-СП 3,5»} = 3,5$ м;

$h^{«М-СП 3,0»} = 3,0$ м.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Определение коэффициента k_1

Длина судна, м	25	60	100	140
Коэффициент k_1	0,0157	0,0157	0,0149	0,0135

Значения k_0 , k_1 , k_2 , h при вычислении дополнительного волнового изгибающего момента по формуле (4) принимаются:

- k_0 – по формуле (2);

- k_1 – по табл. 4;

• k_2 – по формуле (3), при этом осадка носом судна во всех случаях нагрузки должна быть не менее 1,4 м при $L \geq 60$ м и не менее 0,75 м при $L \leq 25$ м. Для промежуточных длин судов минимально допустимая осадка носом определяется линейной интерполяцией;

- $h - h_{3\%} = 3,0$ м.

Суда «река-море» плавания зоны RS 3,5

Рекомендации разрабатывались с использованием требований Правил РРР для судов «река-море» плавания класса «М-СП 3,5».

Дополнительный волновой изгибающий момент рекомендуется определять с помощью формулы (4).

Значения k_0 , k_1 , k_2 , h при вычислении дополнительного волнового изгибающего момента по формуле (4) принимаются:

- k_0 – по формуле (2);

- k_1 – по табл. 2 применительно к судам класса «М-СП»;

• k_2 – по формуле (3), при этом осадка носом судна во всех случаях нагрузки должна быть не менее 1,7 м при $L \geq 60$ м и не менее 0,9 м при $L \leq 25$ м. Для промежуточных длин судов минимально допустимая осадка носом определяется линейной интерполяцией;

- $h - h_{3\%} = 3,5$ м.

Дополнительной коррекции коэффициента k_1 по формуле (4) в данном случае не требуется, так как значение исключаемого коэффициента k_3 для расчетной высоты волны $h_{3\%} = 3,5$ м равняется 1 (см. табл. 3).

Суда «река-море» плавания зоны RS 4,5

Рекомендации разрабатывались с использованием требований Правил РРР для судов «река-море» плавания класса «М-СП 4,5».

Следует отметить, что разработка требований к волновым нагрузкам судов «река-море» плавания класса «М-СП 4,5» выполнялась из условия обеспечения одинаковой вероятности их превышения (обеспеченности), в характерных для разрабатываемого класса условиях эксплуатации, и аналогичной вероятности, получаемой для судов класса «М-СП 3,5» применительно к допустимым для них условиям плавания при волновых нагрузках, регламентируемых действующей редакцией ПССП Правил РРР [5].

Для обеспечения одинакового уровня надежности судов «река-море» плавания класса «М-СП 4,5» всех длин в качестве эталонного уровня безопасности принимались обеспеченности общих и местных волновых нагрузок для судов класса «М-СП 3,5» длиной $L = 100$ м.

При разработке требований к $M_{ДВ}$ была использована формула (1), где $k_0, k_2, \delta, B, L, h$ – см. пояснения к формуле (1);

- k_1 – коэффициент, значения которого применительно к классу судна «М-СП» представлены в табл. 2;

- k_3 – коэффициент, учитывающий влияние на $M_{ДВ}$ отличия условий эксплуатации судна класса «М-СП 4,5» от устанавливаемых Правилами ПССП для судов «М-СП 3,5», представлен в табл. 3.

Расчетная высота волны для судна класса «М-СП 4,5», независимо от устанавливаемого ограничения по допустимой высоте волны, принималась равной $h_{3\%} = 3,5$ м.

Поскольку в настоящих рекомендациях при определении $M_{ДВ}$ предлагается использовать формулу (4), то необходимо проведение коррекции, обусловленное исключением из формулы коэффициента k_3 , уточнением коэффициента k_1 , использованием расчетной высоты волны $h_{3\%} = 4,5$ м.

Коррекция выполняется по зависимости:

$$k_1^{«М-СП 4,5»} = k_1^{«М-СП»} \cdot k_3^{«М-СП 4,5»} \cdot h^{«М-СП 3,5»} / h^{«М-СП 4,5»},$$

где $k_1^{«М-СП»}$ – принимается по табл. 2;

$k_3^{«М-СП 4,5»}$ – принимается по табл. 3;

$h^{«М-СП 3,5»} = 3,5$ м;

$h^{«М-СП 4,5»} = 4,5$ м.

Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Определение коэффициента k_1

Длина судна, м	25	60	100	140
Коэффициент k_1	0,0127	0,0127	0,0146	0,0146

При определении дополнительного волнового изгибающего момента $M_{ДВ}$ значения k_0, k_1, k_2, h принимаются:

- k_0 – по формуле (2);
- k_1 – по табл. 5;
- k_2 – по формуле (3), при этом осадка носом судна во всех случаях нагрузки должна быть не менее 2,2 м при $L \geq 60$ м и не менее 1,2 м при $L \leq 25$ м. Для промежуточных длин судов минимально допустимая осадка носом определяется линейной интерполяцией;
- $h - h_{3\%} = 4,5$ м.

Выводы

Статистические данные, представленные на начало 2001 года [6], свидетельствуют, что значительную часть мирового торгового флота составляют суда дедвейтом менее 5000 т. Доля транспортных судов с дедвейтом менее 5000 т от общего числа судов составляет: сухо-

грузные суда – 67%; наливные суда – 45%. Они, как правило, осуществляют перевозки между морскими, устьевыми и речными портами, их значительная часть имеет ограничения по районам, сезонам, удаленности от места убежища, условиям волнения и ветра, т.е. относятся к судам ограниченного района «река-море» плавания.

Наличие таких ограничений позволило существенно уменьшить строительную стоимость судов ограниченного районов плавания за счет обоснованного снижения требования к общей и местной прочности, мореходным качествам корпусов, номенклатуре и параметрам судового оборудования и снабжения, мощности главных двигателей, что позволило увеличить грузоподъемность судов при фиксированных проходных осадках за счет уменьшения массы судна порожнем и роста коэффициента общей полноты.

Выполненные рекомендации по вопросам прочности судов «река-море» плавания по классификации Резолюции №61 ЕЭК ООН позволяют судовладельцам более детально ознакомиться с требованиями российских классификационных обществ (Российский Речной Регистр, Российский Морской Регистр Судоходства) к вопросам обеспечения общей прочности судов и расширить круг классификационных обществ, являющихся наиболее привлекательными при проведении технического наблюдения за проектированием, строительством и эксплуатацией судов «река-море» плавания.

Библиографический список

1. **Лобастов, В.П.** Интеграционные процессы в области водного транспорта в рамках сотрудничества России и ЕЭК ООН / В.П. Лобастов, Е.В. Зеличенко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2012. № 2(95). С. 197–205.
2. Резолюция №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания. Пересмотр 1. Поправка 1» // ECE/TRANS/SC.3/172/Rev.1/Amend.1 // ЕЭК ООН, Нью-Йорк и Женева, 2011.
3. Резолюция №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания. Пересмотр 1. Поправка 2» // ECE/TRANS/SC.3/172/Rev.1/Amend.2 // ЕЭК ООН, Нью-Йорк и Женева, 2013.
4. О разработке технических предписаний ЕЭК ООН к судам типа «река-море» // ECE/TRANS/SC.3/2006/8 // Пятидесятая сессия ЕЭК ООН, Женева. 11-13 октября, 2006.
5. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов смешанного (река-море) плавания (ПССП). Т.4. Москва, 2008.
6. **Егоров, Г.В.** Коастеры и суда смешанного плавания нового поколения // Судостроение и судоремонт. Одесса, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 09.04.2015*

V. Lobastov, E. Zelichenko, A. Skvortsov

RECOMMENDATIONS CONCERNING THE STRENGTH OF «RIVER-SEA» NAVIGATION SHIPS ON THE RESOLUTION №61 UNECE CLASSIFICATION

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

The aim of this work is to continue research the priority direction in the field of water transport, in particular, the river-sea navigation ships. The results of development the UNECE technical requirements for river-sea navigation ships are considered. Recommendations on the strength of river-sea navigation ships on the classification of the Resolution №61 UNECE are provided.

Key words: UNECE, Resolution №61, Chapter 20B, river-sea navigation ships, Rules for the classification and construction of river-sea navigation ships, hull, hull strength.

УДК 621.16

П.В. Семашко, С.Н. Зеленев, И.В. Земсков

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ТУРБОАГРЕГАТА ТЭЦ В МЕЖРЕМОНТНЫЙ ПЕРИОД**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «Теплоэнергоремонт – Москва»

Изложены вопросы организации ремонта паровых турбин энергетических блоков ТЭЦ. Описаны технология и рабочие приемы проведения экспресс-испытаний, позволяющих с минимальными затратами времени и ресурсов произвести оценку технического состояния турбоагрегата.

Ключевые слова: паровые турбины, режимные параметры, КПД, методика испытаний, ремонтные работы.

В практике технической эксплуатации турбоустановок ТЭЦ существует такое понятие, как межремонтный период работы оборудования, устанавливающий сроки выведения установок из действия для проведения ремонтно-профилактических работ [1, 2]. Любому ремонту предшествуют предремонтные испытания [3, 4], которые целесообразно проводить в виде так называемых экспресс-испытаний (ЭИ).

В общем случае ЭИ проводятся:

- для оценки текущего изменения экономичности турбоустановок;
- проверки состояния ее отдельных элементов и своевременного выявления дефектов;
- установления качества выполнения предшествующего ремонта турбины или ее элементов;
- обеспечения грамотной и безаварийной эксплуатации.

Анализ результатов ЭИ позволяет обоснованно судить о том, следует ли остановить турбину (или, если это, возможно, отключить отдельные элементы установки) для ревизии и устранения дефектов или оставить ее в работе на некоторый период. При принятии решения сопоставляются возможные затраты на остановку, проведение восстановительных работ, финансовые потери от недоотпуска потребителям электрической (тепловой) энергии и др. с потерями, обусловленными эксплуатацией оборудования с пониженной экономичностью.

Проводятся ЭИ силами персонала цехов (групп) наладки в соответствии с программой, утвержденной техническим руководителем ТЭЦ.

Достоинством ЭИ является то, что их выполнение позволяет отказаться от трудоемкого измерения с высокой точностью расхода свежего пара при одновременном сохранении погрешности и достоверности получаемого конечного результата. Так как в основу ЭИ положен принцип сравнительной оценки изменения показателей работы оборудования, то при их проведении не требуется проводить громоздких по объему и дорогостоящих теплотехнических и балансовых испытаний с высокоточным измерением многочисленных расходов пара и воды и последующим затем расчетом абсолютных значений показателей экономичности турбоустановки - удельных расходов теплоты и пара. В качестве основного критерия изменения общей экономичности в этом случае принимается электрическая мощность турбоагрегата, достаточно точное измерение которой не представляет большого труда. При этом сравниваются зависимости этой мощности не от расхода свежего пара на конденсационном режиме, как это обычно практикуется, а от давления в контрольной ступени турбины при отключенной системе регенерации. Это позволяет исключить влияние режимов и показателей работы регенеративных подогревателей на форму указанной зависимости и, следовательно, дает возможность провести корректный анализ сравниваемых параметров последующих ЭИ.

Учитывая зависимость давления в контрольной ступени от расхода свежего пара, а также возможность достаточно точного его определения, об изменении общей экономично-

сти турбоагрегата можно будет судить по результатам сравнения зависимостей электрической мощности от давления в контрольной ступени, полученным в итоге последовательно проведенных ЭИ.

В качестве основных критериев для анализа состояния отдельных элементов турбоагрегата приняты:

- для собственно турбины – это относительно-внутренние КПД цилиндров высокого $\eta_{oi}^{ввд}$ и среднего давления $\eta_{oi}^{сд}$, работающих в зоне перегретого пара, диаграмма парораспределения и давление по ступеням;
- для конденсатора – это разрежение (вакуум) и температурный напор при одинаковых граничных условиях (расход и температура циркуляционной воды на входе, расход отработавшего пара), переохладение конденсата, нагрев циркуляционной воды; гидравлическое сопротивление;
- для регенеративных и сетевых подогревателей - температура нагреваемой воды на выходе, температурный напор, потери давления в паропроводе отбора, переохладение конденсата греющего пара.

Поскольку основное влияние на изменение экономичности турбоустановки оказывает состояние проточной части турбины, в качестве основного раздела программы необходимо предусмотреть проведение опытов на конденсационном режиме с полностью отключенной системой регенерации, что исключает влияние отдельных элементов тепловой схемы и режимных параметров на уровень экономичности и, следовательно, позволяет выявить влияние лишь собственно турбины. Действительно, при наличии в каждом из последовательно проведенных испытаний с полностью включенной регенерацией расхождений между измеренными расходами свежего пара и питательной воды и при различных параметрах работы отдельных регенеративных подогревателей будет невозможно корректно сопоставить результаты испытаний между собой и однозначно определить снижение мощности установки, обусловленное лишь состоянием проточной части (износом уплотнений, заносом, повреждением лопаточных аппаратов, неплотностями стыков диафрагм и т.д.) и конденсатора.

Таким образом, первая серия ЭИ турбин любого типа предполагает проведение пяти-шести опытов на конденсационном режиме с отключенной системой регенерации (подогреватель высокого давления, деаэратор и подогреватели низкого давления) в диапазоне электрических нагрузок от 25% от номинальной до максимальной, допускаемой инструкцией по эксплуатации турбин.

Вторая серия ЭИ состоит также из пяти-шести опытов на конденсационном режиме в аналогичном диапазоне нагрузок, но при работе по проектной тепловой схеме. Цель выполнения данной серии - сравнение значений электрической мощности (в том числе максимально достигнутой) в последовательных ЭИ с анализом изменения показателей регенеративных подогревателей и конденсатора.

Третья серия ЭИ целесообразна лишь для турбин с регулируемыми отборами пара. Цель опытов - сравнение характеристик турбоагрегата и его элементов при расходе свежего пара, превышающем максимально допустимый на конденсационных режимах, а также определение показателей экономичности сетевых подогревателей при проектной тепловой схеме. Серия состоит из трех опытов, которые проводятся при максимальном 110% -, 90% - и 80% - ном расходах свежего пара с включенными регулируемым отборами и минимальным открытием поворотных диафрагм.

После проведения серий опытов, переходят к расчёту с помощью общепринятых формул различных параметров турбоагрегата, в том числе и относительно-внутренних КПД цилиндров. Величина относительно-внутреннего КПД определяется по формуле $\eta_{oi} = \frac{H_1}{H_0}$, где H_1

– использованный в турбине теплоперепад; H_0 – располагаемый теплоперепад. Расчет проводится как по результатам опытов с включенной, так и с отключенной системой регенерации.

На значение относительно-внутреннего КПД цилиндра турбины влияют в основном следующие факторы:

- характеристика системы парораспределения (давление за регулирующими клапанами, потери при их полном открытии, значения "перекрыш");
- давление по проточной части;
- состояние лопаточного аппарата и протечки через надбандажные и диафрагменные уплотнения, разъемы диафрагм и цилиндров.

Однако, если влияние двух первых факторов на изменение значения КПД в период между последовательными испытаниями может быть хотя бы приблизительно оценено с помощью $I-S$ диаграммы, то способы непосредственного контроля внутрицилиндровых протечек отсутствуют и об изменении их значения приходится судить лишь по результатам косвенных измерений температуры за контролируемым отсеком турбины.

Так как температура пара, протекающего через внутренние уплотнения, существенно выше температуры пара, проходящего через сопловой и лопаточный аппараты, то при одинаковых условиях с увеличением зазоров в уплотнениях в период эксплуатации температура пара и, следовательно, энтропия, на выходе из цилиндра будут превышать исходные значения на всё большую величину. При этом соответственно будут снижаться относительно - внутренние КПД турбин ЦВД и ЦСД, рассчитанные по параметрам пара, измеренным до и после цилиндра.

При включенной регенерации, когда часть высокотемпературных протечек в лопаточном аппарате сбрасывается в соответствующие подогреватели, температура пара после цилиндра будет меньше, чем в случае без регенерации, а значение относительно внутреннего КПД будет больше аналогичных значений, полученных в опытах с отключенной регенерацией. Исходя из этого, по значению расхождений относительно-внутренних КПД, полученных в опытах с включенной и отключенной регенерацией во времени, можно судить об изменении "плотности" проточной части соответствующего цилиндра турбины.

Таким образом, как показывает анализ результатов многочисленных испытаний и ремонтов турбин разных типов, наиболее существенными причинами снижения относительно-внутренних КПД турбин являются:

- повышенное дросселирование в системе парораспределения;
- увеличение зазоров в проточной части по сравнению с расчетными значениями;
- несоответствие размеров и формы проходных сечений расчетным;
- занос проточной части, влияющий как на величину профильных потерь, так и в ряде случаев на расход пара;
- повреждение лопаточных аппаратов и других элементов проточной части.

В связи с тем, что период ремонтных работ строго ограничен по времени, очень важно перед вскрытием турбины иметь более полную информацию о состоянии турбоагрегата, о характере и местонахождении повреждений, что позволит до вскрытия выяснить возможную потребность в соответствующих запасных комплектах соплового и лопаточного аппаратов, уплотнительных сегментов, гребней и т.д. Это даст возможность значительно сократить сроки ремонта и раньше ввести агрегат в работу, т.е. приступить ТЭЦ к выработке тепловой и электрической энергии.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показано изменение значений внутренних КПД цилиндров высокого $\eta_{oi}^{цвд}$ и среднего давления $\eta_{oi}^{цсд}$ в зависимости от их наработки τ , ч, полученные по результатам испытаний теплофикационной паровой турбины ПТ-80/100-130/13 с промышленным и отопительными отборами пара [5].

Исследованная турбина с номинальной мощностью 80 МВт, максимальной 100 МВт с начальным давлением пара 12,8 МПа, предназначена для непосредственного привода электрического генератора ТВФ-120-2 с частотой вращения 50 Гц и отпуска тепловой энергии для нужд производства и отопления. Турбина имеет следующие регулируемые отборы пара: производственный с абсолютным давлением $1,275 \pm 0,29$ МПа и два отопительных отбора:

верхний с абсолютным давлением в пределах 0,049...0,245 МПа и нижний с давлением в пределах 0,029...0,098 МПа.

Регулирование давления отопительного отбора в турбине осуществляется с помощью одной регулирующей диафрагмы, установленной в камере верхнего отопительного отбора. Регулируемое давление в отопительных отборах поддерживается: в верхнем отборе - при включенных обоих отопительных отборах, в нижнем отборе - при включенном одном нижнем отопительном отборе. Сетевая вода через сетевые подогреватели нижней и верхней ступеней подогрева пропускается последовательно и в одинаковом количестве. Расход воды, проходящей через сетевые подогреватели, контролируется.

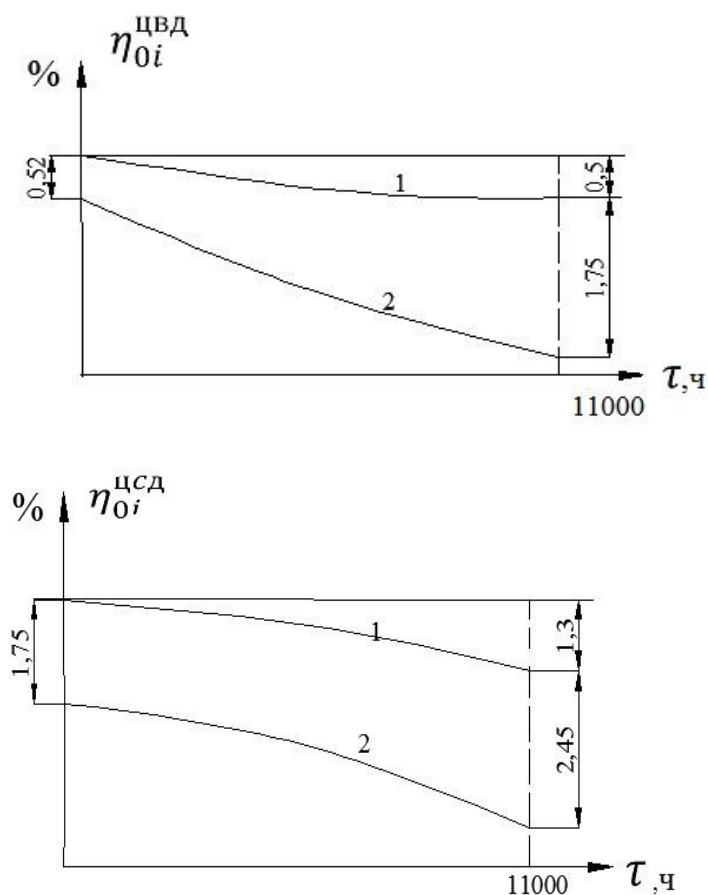


Рис. 1. Изменение относительно-внутренних КПД $\eta_{oi}^{цвд}$ и $\eta_{oi}^{цсд}$ турбоагрегата в зависимости от времени наработки τ , ч:

1, 2 - система регенерации включена и отключена соответственно

Как видно из приведенных на рис. 1 зависимостей, уже через ~ 11000 ч работы падение КПД становится весьма значительным, что свидетельствует об увеличении по сравнению с проектными значениями зазоров в проточной части турбины.

Таким образом, выявленные экспериментальные зависимости позволяют сделать предположение о возможности использования этого показателя в качестве диагностического для оценки технического состояния турбины. При этом надо иметь в виду, что средний межремонтный ресурс турбин данного типа составляет $\sim 15\,400$ ч, а нормативный $\sim 30\,000$ ч.

Дальнейшее накопление статистических данных по результатам ЭИ других турбин позволит нормативно установить предельные значения падения КПД, по достижении которых можно ставить вопрос о необходимости начала проведения ремонтных работ. В целом это позволит повысить надежность работы паровых турбин и уменьшить количество их аварийных остановок.

Выводы

1. Тщательно проводимые с соблюдением всех рекомендаций и соответствующей периодичностью ЭИ при сравнительно небольших затратах и трудоемкости помогают своевременно обнаружить дефекты в техническом состоянии турбоагрегата и его элементов, влияющие на уровень экономичности.

2. Для получения надежных и сопоставимых между собой результатов при проведении последовательных испытаний необходимо соблюдать два основных условия: полная идентичность тепловой схемы и режимных параметров и применение одних и тех же регулярно поверяемых измерительных приборов и датчиков рекомендуемого класса точности.

3. Признаком практически любого сколько-нибудь заметного дефекта проточной части турбины является отклонение от нормы давления пара в одной или нескольких ступенях. Учитывая относительную простоту измерений, контроль давления по ступеням следует осуществлять постоянно в целях своевременной фиксации отклонений от нормы.

4. ЭИ позволяют существенно сократить сроки ремонта турбоагрегатов и снизить затраты на его проведение.

5. Операции ЭИ следует проводить в процессе эксплуатации, их можно выполнять силами персонала ТЭЦ без привлечения сторонних организаций.

Библиографический список

1. **Энгель-Крон, И.В.** Устройство и ремонт оборудования турбинных цехов электростанций / И.В. Энгель-Крон. – М.: Высш. шк., 1971. – 256 с.
2. **Энгель-Крон, И. В.** Ремонт паровых турбин / И. В. Энгель-Крон. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
3. **Сахаров, А.М.** Тепловые испытания паровых турбин / А. М. Сахаров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
4. **СО 34.04.181-2003.** Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей.
5. Стандарт СТО 70238424.27.040.020-2009 Турбина паровая ПТ-80/100-130/13 ЛМЗ. Технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования. - Москва, 2009.

*Дата поступления
в редакцию 09.04.2015*

P.V. Semashko, S.N. Zelenov, I.V. Zemskov

THE ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE OF THE TURBINE UNIT of TETs (heat and power plant) IN THE TIME BETWEEN OVERHAULS

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
ООО "Heat-power equipment repair - Moscow", Nizhniy Novgorod

Purpose: The development of practical recommendations for the Organization of repair of steam turbine power plant.

Design/methodology/approach: Experimental and theoretical rationale for the express test to evaluate the technical condition of the turbine.

Finding: The main criteria and physical parameters are selected to determine the current technical state of the turbines. A program for thermal testing was developed.

Research limitations/implications: The use of the proposed recommendations in practice allows to reduce the time and cost of repairs on units of heat.

Originality/value: The effectiveness of the express test was confirmed at the time of planning and conduction of repairing work of heat extraction steam turbine ПТ-80/100-130/13.

Key words: the steam turbines, the regime parameters, efficiency, test procedure, repair work.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-52-83:656.56

А.В. Серебряков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов, А.В. Шахов

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены процессы формирования графиков нагрузки автономных потребителей. Определены средняя установленная мощность и критическая минимальная нагрузка автономного жилого дома, они не превышают 20 кВт и 2 кВт соответственно. Предложено создание системы электроснабжения с обособлением тепловой нагрузки с целью экономии средств на создание автономного генераторного комплекса. Проведен сравнительный анализ схем автономных систем электроснабжения для определения экономического эффекта от использования схемы с дифференцированием нагрузки. Эффект выразился в экономии топлива традиционного источника по сравнению со схемой с постоянно работающей дизель-энергетической установкой (ДЭУ) при суммарной установленной мощности автономных источников энергии 20 кВт.

Ключевые слова: автономный источник энергии, ветроэнергетическая установка, электромеханическая часть, инвариантная система, преобразователь частоты, синхронный генератор.

Введение

Положительная динамика развития отечественной промышленности и увеличение уровня потребления электроэнергии населением стимулируют расширение масштабов исследований и разработок, направленных на совершенствование топливно-энергетического комплекса РФ и экономии традиционных углеводородных источников электроэнергии (ТИЭ) [1, 2]. Это обусловило поиск новых стратегий энергоэффективного и экономичного энергообеспечения российских потребителей с привлечением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Новая аппаратная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники дополнительно стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых агрегатов и систем [3].

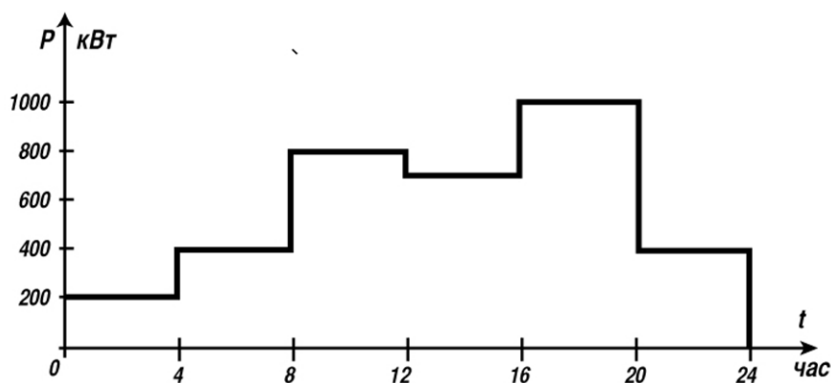


Рис. 1. Характерный график нагрузки автономного потребителя

Автономный источник энергии должен обеспечивать длительное бесперебойное питание объекта при различных параметрах окружающей среды. Значительное влияние на формирование структуры системы электроснабжения (СЭС) оказывает электрическая нагрузка [4]. Процесс формирования электрических нагрузок потребителя имеет вероятностный характер (рис. 1), поэтому при определении закономерностей формирования и числовых значений графика нагрузок потребителя можно использовать общепринятые методы теории вероятностей и математической статистики. На основании этих методов устанавливаются числовые характеристики и законы распределения рассматриваемых величин.

Математическая модель системы электроснабжения автономных потребителей

Рассмотрим процесс формирования графика нагрузки группы электроприемников автономных потребителей. Включение и выключение отдельных электроприемников можно рассматривать как случайные события. Как известно, случайный процесс - график нагрузки - характеризуется функцией распределения, математическим ожиданием и корреляционной функцией, которая отражает зависимость между параметрами процесса. Если допустить, что электроприемники включаются независимо друг от друга, то число электроприемников из общего их числа, работающих одновременно и составляющих групповую нагрузку может быть определено по биномиальному закону. В этом случае вероятность работы m электроприемников из общего их числа n определяется при помощи следующего выражения

$$P_{(n,m)} = \sum \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}. \quad (1)$$

Произведем построение модели нагрузок «среднего» автономного жилого дома (усадыбы) с небольшим хозяйством, энергоснабжение которого осуществляется от автономного источника энергии. Сложность моделирования нагрузок заключается, прежде всего, в большом разнообразии электроприемников. Тем не менее, несмотря на зависимость вида и количества электроприемников от таких факторов как вид хозяйства, уклад семьи, состав семьи, уровень жизни, район и многих других, возможно, построить модель некоего «среднего» автономного жилого дома (усадыбы) с небольшим хозяйством. Для построения такой модели разработана карта сбора статистических данных, которая была предложена владельцам 12 хозяйств в разных районах РФ.

На основании результатов обработки данных по набору электроприемников, их мощности и годового потребления электроэнергии (табл. 1), а также характерного графика нагрузки автономного потребителя, можно сделать следующие выводы:

- установленная мощность электроприемников в большинстве индивидуальных хозяйств не превышает 20 кВт;
- критическая минимальная нагрузка, которую должен обеспечивать источник питания, не превышает для большинства хозяйств 2 кВт. Таким образом, можно определить минимальную мощность P_{\min} резервного источника в самом худшем варианте.

Таблица 1

Характеристики электроприемников

№ п/п	Наименование	Кол-во	Вт	Число часов работы в день	кВт*ч в год
1	2	3	4	5	6
	Хозяйственно-бытового назначения				
1	Холодильник	1	350	8	1022
2	Телевизор	2	120	6	262,8

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
3	DVD проигрыватель	1	17	4	24,82
4	Музыкальный центр	1	75	4	109,5
5	Кондиционер	1	1700	2	1241
6	Утюг	1	1400	0,25	150
7	Пылесос	1	900	0,2	65,7
8	Стиральная машина	1	2000	0,2	146
9	Вентилятор	1	50	2	36,5
10	Швейная машина	1	210	0,1	7,665
11	Электромиксер	1	150	0,2	10,95
12	Электробритва	1	15	0,2	1,095
13	Электрическое освещение	-	850	3	930,75
14	Электрический насос	1	270	6	591,3
15	Машина сверлильная	1	420	0,5	76,65
16	Машина шлифовальная угловая	1	1200	0,1	43,8
17	Электрорубанок	1	300	0,2	21,9
18	Пила дисковая	1	1500	0,2	109,5
19	Компрессор	1	420	0,2	30,66
20	Фен промышленный	1	480	0,2	35,04
Производственного назначения					
21	Опрыскиватель	1	250	0,1	9,125
22	Станок токарный	1	1600	1	584
23	Кормодробилка	1	2000	1	730
24	Сепаратор	1	350	1	127,75
25	Электрокосилка	1	1000	0,5	182,5
	Итого		17627		6912,005

На основе полученных данных можно построить имитационную модель потребления электрической энергии (рис. 2).

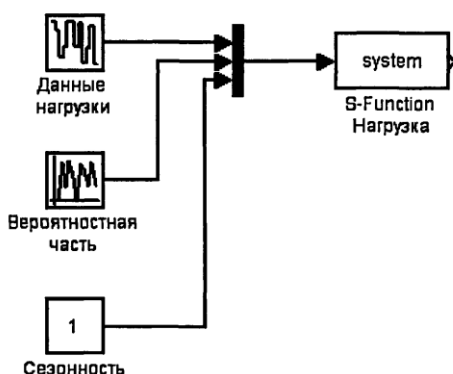


Рис. 2. Упрощенная модель нагрузки автономных потребителей

Данная модель включает постоянную часть (реальные усредненные статистические данные потребителей) и переменную часть (вероятностная составляющая на основе нормального распределения). При построении модели учитывались также следующие факты. В целях устранения возможных убытков от перерыва в энергоснабжении источник питания должен

обеспечивать минимально необходимую мощность P_{\min} для питания определенных электроприемников. Принимаем $P_{\min} \sim 2000$ Вт.

Таким образом, мощность источника гарантированного питания не должна быть ниже 2000 Вт. Сезонность графика нагрузки учитывалась коэффициентами для весенне-летнего ($K=1$) и осенне-зимнего периодов. Приведенная модель может быть использована для расчета вероятности совпадения нагрузки и поступления энергии для включения в общую модель системы автономного электроснабжения.

Однако обособление тепловой нагрузки 3-й категории позволяет значительно снизить установленную мощность силовой преобразовательной части АГК и повысить энергетические показатели ДЭУ. Поэтому необходимо знать суточные графики потребления не только общей нагрузки, но и отдельно тепловой, которая является также случайной величиной, зависящей, главным образом, от температуры окружающего воздуха в данном пункте.

Построение суточных графиков нагрузки автономных потребителей

Для получения графиков нагрузки необходимо проводить систематические измерения потребляемой мощности в течение суток [5].

При определении степени согласованности случайных величин допускается для получения графиков их изменения применять экспертные оценки - один из видов пассивного эксперимента. Для сокращения времени экспериментов воспользуемся правилом приведения одной случайной величины к другой, которое состоит в следующем. Чтобы случайную величину X привести к случайной величине Y , имеющей такой же закон распределения, но другие статистические параметры распределения, необходимо фактически наблюдаемые значения X_j изменить, предварительно вычислив коэффициенты приведения.

На основании изложенного правила воспользуемся методикой ускоренного получения графиков нагрузки автономного пункта:

- на основании малого количества опытов (или небольшого числа экспертов) определяются значения мощности j -х нагрузок за i -й интервал и строится усредненный график нагрузки;
- определяются опытные параметры распределения нагрузки (среднее значение и среднее стандартное отклонение мощности);
- сравниваются опытные параметры с параметрами генеральной совокупности;
- изменяются значения нагрузки в i -й интервал по изложенному правилу приведения;
- строятся графики нагрузки, приведенной к генеральной совокупности.

В соответствии с изложенной методикой опрошено девять экспертов в автономных пунктах с высокой насыщенностью электрооборудованием. В результате экспертной оценки были получены данные о времени работы j -х нагрузок в i -й интервал, по которым распределение нагрузок подчиняется нормальному закону, то результаты экспертного опроса проверялись на согласие по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,05. Для этого вычислялись коэффициенты парной корреляции между значениями k -го эксперта и усредненными данными. Коэффициент корреляции вычисляется по формуле

$$r_k = \frac{\overline{P_{cp}} \overline{P_{ji}} - \overline{P_{cp}} * \overline{P_{ji}}}{\sigma_k \sigma_{cp}}, \quad (2)$$

где r_k - коэффициент корреляции между данными k -го эксперта и средними данными; $\overline{P_{cp}}$, $\overline{P_{ji}}$ - средние значения усредненного графика и по данным k -го эксперта; σ_k , σ_{cp} - стандартные отклонения усредненного графика и по данным k -го эксперта.

В соответствии с данной методикой проверки наблюдаемое значение критерия Стьюдента должно вычисляться по формуле (4) и сравниваться со стандартным значением при заданном уровне значимости и числе степеней свободы $s = n - 2$ (n - объем выборки).

$$T = r_k \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_k^2}}. \quad (3)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента сравнивались с нормированными значениями для уровня значимости 0,05. Данные эксперта считались согласованными с реальными данными, если расчетное значение критерия Стьюдента превышало нормированное, в противном случае корреляционная связь экспертных данных с реальными данными считалась несущественной, и такие данные исключались из дальнейшего анализа.

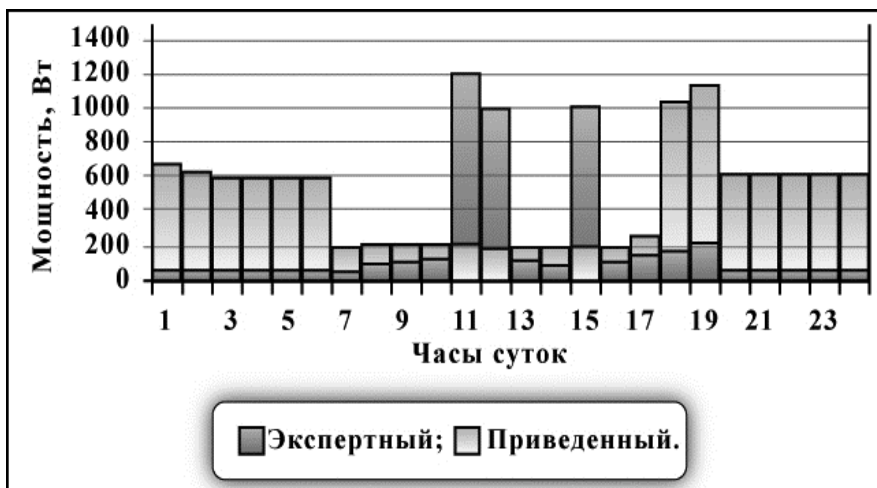


Рис. 3. График нагрузки в весенне-летний период

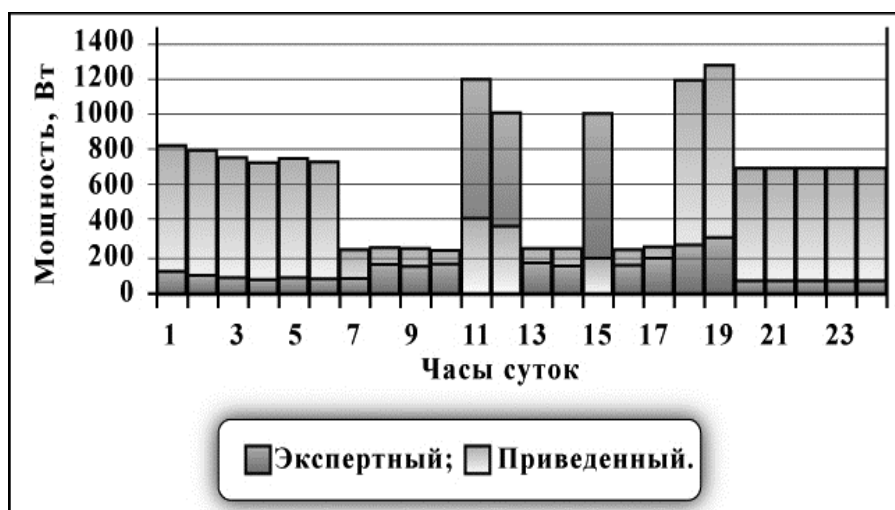


Рис. 4. График нагрузки осенне-зимний период

В справочниках приводятся параметры распределения нагрузки за дневной и вечерний максимумы. В связи с этим, для приведения экспертных графиков нагрузки к генеральной совокупности рассчитаны среднесуточные значения параметров распределения по формулам

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_v^2}; \tag{4}$$

$$\bar{P}_{cp} = \frac{\bar{P}_d + \bar{P}_v}{2}; \tag{5}$$

$$\sigma_{cpj} = k_{cj} \cdot \sigma_{cp}; \tag{6}$$

$$\bar{P}_{cpj} = k_j \cdot \bar{P}_{cp}, \tag{7}$$

где σ_{cp} , σ_d , σ_v - соответственно стандартное отклонение суточной нагрузки за дневной и вечерний периоды, Вт; \bar{P}_{cp} , \bar{P}_d , \bar{P}_v - математические ожидания соответственно суточной нагрузки за дневной и вечерний периоды, Вт; σ_{cpj} - стандартное отклонение суточной нагрузки за j -

ый сезон года, Вт; $\bar{P}_{срj}$ - математическое ожидание суточной нагрузки за j -ый сезон года, Вт; k_j - коэффициент сезонности для j -го сезона года.

Приведенные графики электрических нагрузок (рис. 3, рис. 4) отражают наиболее вероятные значения нагрузок для генеральной совокупности объектов.

Структура автономной системы электроснабжения с дифференцированием нагрузки

Авторами предлагается создание более экономичной структуры автономной СЭС в рамках комбинированного генераторного комплекса с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки потребителей (рис. 5).

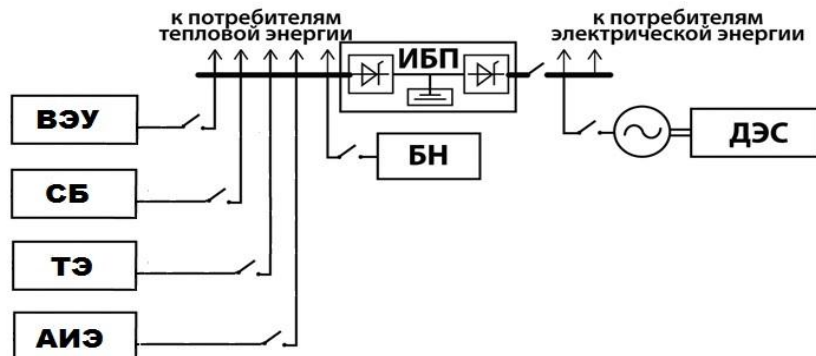


Рис. 5. Схема автономной СЭС с дифференцированием нагрузки:

ВЭУ - ветроэнергетическая установка; СБ - солнечные батареи; ТЭ - топливные элементы;

АИЭ - альтернативный источник энергии; БН - балластная нагрузка;

ИБП - источник бесперебойного питания; ДЭС - дизель-энергетическая станция

Данная схема обеспечивает подключение потребителей 3-й категории напрямую к шинам источника энергии, а все потребители электроэнергии питаются от автономного источника энергии через ИБП. При этом ДЭУ выполняет функцию резерва с подключением только в номинальный режим. Данная структура АГК позволяет обеспечить автономные СЭС высококачественной электроэнергией при оптимальной загрузке ДЭУ и минимальном расходе топлива ТИЭ. Сравнительный анализ схем АГК и соответствующие расчеты затрат на топливо при равных условиях эксплуатации показывают значительный экономический эффект (рис. 6) при работе по схеме с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки.

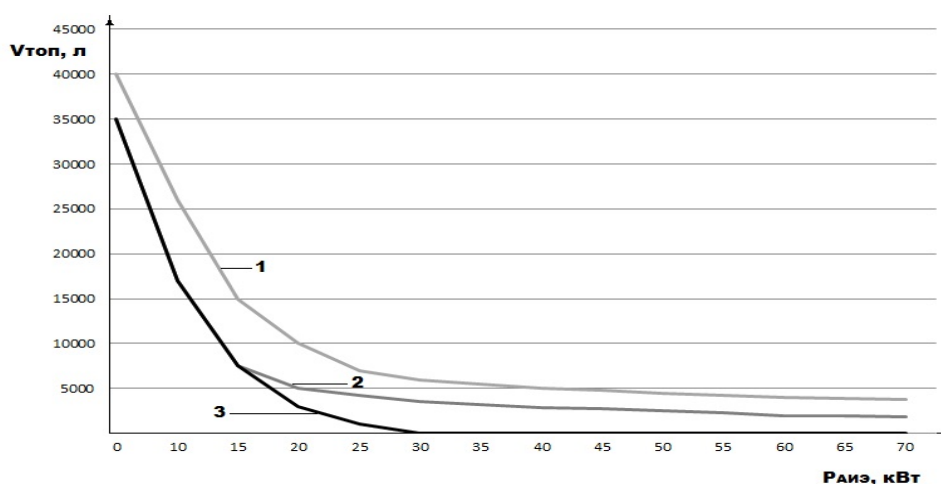


Рис. 6. Расход топлива ДЭУ за год в зависимости от суммарной мощности АИЭ для комбинированного АГК с ДЭУ:

1 - АГК с постоянно работающей ДЭУ; 2 - АГК с накопителем энергии;

3 - АГК с дифференцированием нагрузки и накопителем энергии

Выводы

Анализ результатов обработки данных по набору электроприемников, их мощности и годового потребления электроэнергии, характерного графика нагрузки автономного потребителя, суточных графиков нагрузки потребителей показал:

- установленная мощность электроприемников в большинстве индивидуальных хозяйств не превышает 20 кВт;
- критическая минимальная нагрузка, которую должен обеспечивать источник питания, не превышает для большинства хозяйств 2 кВт;
- тепловая нагрузка 3-й категории составляет до 60 % от общей установленной мощности автономного потребителя.

Предложенная структура автономной СЭС с дифференцированием нагрузки позволяет значительно экономить топливо ТИЭ и снизить капитальные затраты на создание автономного источника энергии за счет питания потребителей 3-й категории напрямую от шин источника энергии.

Библиографический список

1. **Онищенко, Г.Б.** Новое поколение автономных ветроэнергетических установок / Г.Б. Онищенко, Л.Я. Хаскин // МГОУ-XXI-Новые технологии. 2007. №5. С. 41–47.
2. **Онищенко, Г.Б.** Развитие энергетики России. Направления инновационно-технологического развития / Г.Б. Онищенко, Г.Б. Лазарев. – М.: РСА, 2008. – 200 с.
3. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Редакция 5.0 / В.Е. Фортов [и др.]. – М.: ОАО «НТЦ Электроэнергетики», 2012. – 220 с.
4. **Дарьенков, А.Б.** Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. Т. 77. С. 68–72.
5. **Васенин, А.Б.** Концепция систем автономного электроснабжения объектов / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, В.Г. Титов // Сб. тезисов XII Всемирного электротехнического конгресса (ВЭЛК-2011). – М.: ВЭИ. 2011. С. 28–30.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

A.V.Serebryakov, V.G.Titov, E.A. Chernov, A.V. Shahov

DIFFERENTIATION LOADS IN POWER SYSTEMS AUTONOMOUS CONSUMERS

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

Processes of formation of load graphs of autonomous consumers have been considered. Medium set power and critical minimal load of autonomous house have been determined, they don't exceed 20 kW and 2 kW correspondingly. Creation of power supply system with separation of thermal load for the purpose of economy of means on creation of autonomous generator complex has been suggested. Comparative analysis of schemes of autonomous power supply systems for determination of economic effect from the usage of the scheme with load differentiation has been carried out. Effect has been expressed in economy of the fuel of traditional energy comparing to the scheme with the constantly working electrical plant with the summary set power of autonomous energy sources 20 kW.

Key words: autonomous energy source, wind power plant, electromechanical part, invariant system, frequency converter, synchronous generator.

УДК 621.3

Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, А.А. Асабин

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы моделирования трехфазного многообмоточного трансформатора, входящего в состав фазоповоротного устройства. Модель трансформатора выполнена в пакете Simulink и состоит из схемы замещения магнитной и электрической цепей. Модель позволяет исследовать важнейшие энергетические показатели трансформатора в динамических и статических режимах работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0098 о предоставлении субсидии от 26.08.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0098).

Ключевые слова: трехфазный многообмоточный трансформатор, моделирование, схемы замещения, Simulink.

Автоматизированный узел регулирования потоков мощности в распределительной электрической сети среднего напряжения (6-10-20 кВ) может быть выполнен на основе транзисторных или тиристорных фазоповоротных устройств (ФПУ). В состав тиристорного ФПУ, как правило, входят два трансформатора: шунтовой (параллельный) и серийный (последовательный).

В исследуемых устройствах процессы регулирования напряжения сопровождаются изменением структуры многообмоточных трехфазных трансформаторов на вторичной стороне с помощью тиристорных ключей. При этом возникают режимы работы, сопровождающиеся изменением насыщения магнитопровода трансформаторов, которые требуют адекватного математического представления. В нестационарных режимах, связанных с нарушением нормального функционирования, возможны глубокие насыщение магнитопроводов и значительные изменения электромагнитных связей между обмотками трансформатора.

В ходе выполнения прикладных научных исследований была разработана нелинейная модель трехфазного трехстержневого многообмоточного трансформатора (параллельный трансформатор) с плоской магнитной системой в программе Matlab Simulink.

Основные допущения при разработке нелинейной математической модели трансформатора общеприняты [1]:

- магнитная система трансформатора представлена схемой замещения с нелинейными сосредоточенными магнитными сопротивлениями, определяемыми аппроксимацией основной кривой намагничивания;
- полные потокосцепления фаз представлены как суммы потокосцеплений от основного магнитного потока и потокосцеплений рассеяния обмоток фазы;
- потокосцепления рассеяния обмоток трансформатора, являются линейными функциями от токов;
- не учитываются емкостные связи между элементами обмоток, между обмотками и заземленными частями магнитопровода, а также токи утечки изоляции.

Схема замещения магнитной цепи (рис. 1) состоит из следующих элементов:

- $(w_A i_A - w_x i_x)$, $(w_B i_B - w_y i_y)$, $(w_C i_C - w_z i_z)$ - намагничивающие силы обмоток на стержнях магнитопровода;
- $(\Phi_A - \Phi_C)$ соответственно магнитные потоки фаз;
- $H_{AC} \div H_{CC}$; $H_{AA} \div H_{AA}$ - падения магнитных напряжений на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков;

- H_0l_0 - падение магнитного напряжения от потока нулевой последовательности.

В соответствии с приведенной схемой замещения уравнения магнитного состояния трехфазного многообмоточного трансформатора будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} w_A i_A + w_{a1} i_{a1} + w_{a2} i_{a2} + w_{a3} i_{a3} + w_{a4} i_{a4} + w_{a5} i_{a5} - H_A l_C - 2H_{ЯА} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0; \\ w_B i_B + w_{b1} i_{b1} + w_{b2} i_{b2} + w_{b3} i_{b3} + w_{b4} i_{b4} + w_{b5} i_{b5} - H_B l_C - H_0 l_0 &= 0; \\ w_C i_C + w_{c1} i_{c1} + w_{c2} i_{c2} + w_{c3} i_{c3} + w_{c4} i_{c4} + w_{c5} i_{c5} - H_C l_C - 2H_{ЯС} l_{Я} - H_0 l_0 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Величина потока нулевой последовательности

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_0. \quad (2)$$

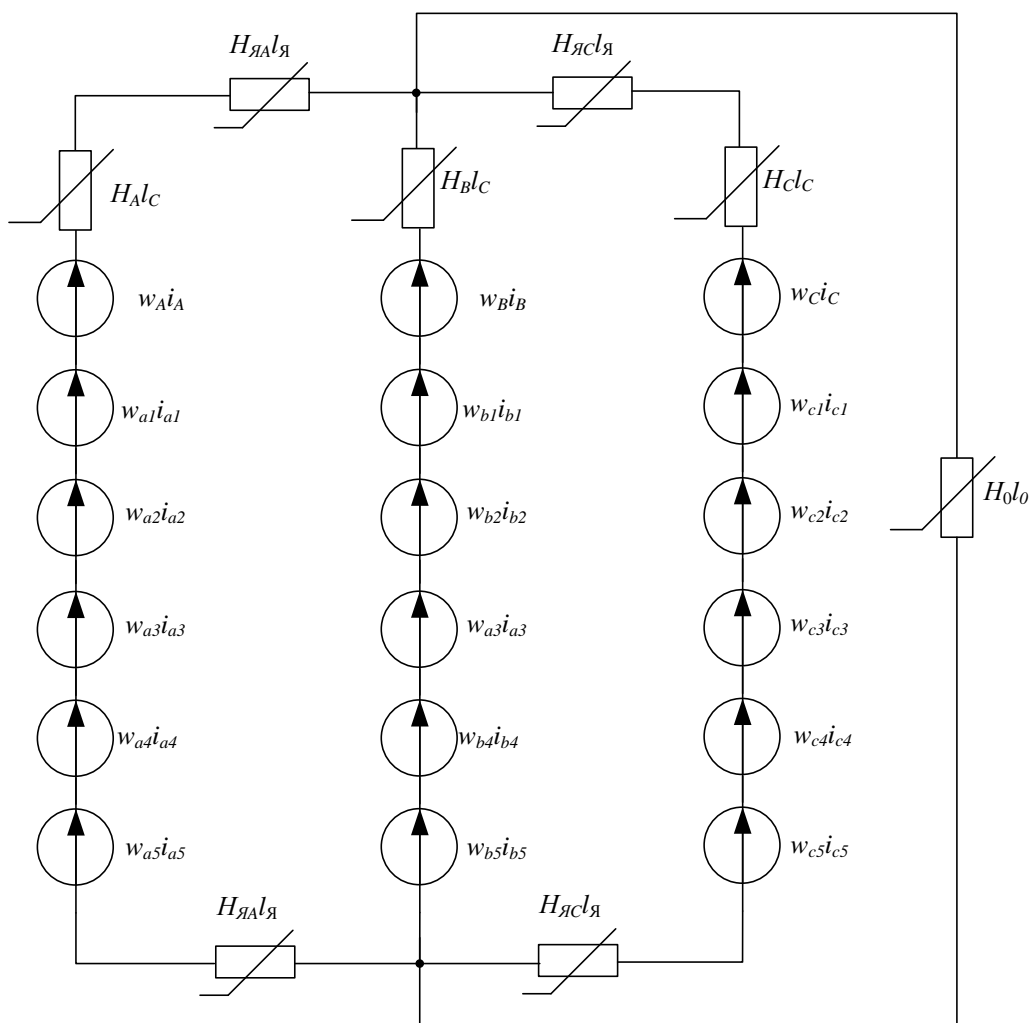


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи параллельного трансформатора с контуром замыкания потоков нулевой последовательности

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений магнитной системы, запишем уравнения электрической системы (обмоток) трансформатора по следующим выражениям:

фаза A:

$$\begin{aligned} u_A &= L_{SA} \frac{di_A}{dt} + w_A \frac{d\Phi_A}{dt} + i_A R_A; \\ u_{a1} &= L_{Sa1} \frac{di_{a1}}{dt} + w_{a1} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a1} R_{a1}; \\ u_{a2} &= L_{Sa2} \frac{di_{a2}}{dt} + w_{a2} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a2} R_{a2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{a3} &= L_{Sa3} \frac{di_{a3}}{dt} + w_{a3} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a3} R_{a3}; \\
 u_{a4} &= L_{Sa4} \frac{di_{a4}}{dt} + w_{a4} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a4} R_{a4}; \\
 u_{a5} &= L_{Sa5} \frac{di_{a5}}{dt} + w_{a5} \frac{d\Phi_A}{dt} + i_{a5} R_{a5};
 \end{aligned} \tag{3}$$

фаза B:

$$\begin{aligned}
 u_B &= L_{SB} \frac{di_B}{dt} + w_B \frac{d\Phi_B}{dt} + i_B R_B; \\
 u_{b1} &= L_{Sb1} \frac{di_{b1}}{dt} + w_{b1} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b1} R_{b1}; \\
 u_{b2} &= L_{Sb2} \frac{di_{b2}}{dt} + w_{b2} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b2} R_{b2}; \\
 u_{b3} &= L_{Sb3} \frac{di_{b3}}{dt} + w_{b3} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b3} R_{b3}; \\
 u_{b4} &= L_{Sb4} \frac{di_{b4}}{dt} + w_{b4} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b4} R_{b4}; \\
 u_{b5} &= L_{Sb5} \frac{di_{b5}}{dt} + w_{b5} \frac{d\Phi_B}{dt} + i_{b5} R_{b5};
 \end{aligned} \tag{4}$$

фаза C:

$$\begin{aligned}
 u_C &= L_{Sc} \frac{di_C}{dt} + w_C \frac{d\Phi_C}{dt} + i_C R_C; \\
 u_{c1} &= L_{Sc1} \frac{di_{c1}}{dt} + w_{c1} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c1} R_{c1}; \\
 u_{c2} &= L_{Sc2} \frac{di_{c2}}{dt} + w_{c2} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c2} R_{c2}; \\
 u_{c3} &= L_{Sc3} \frac{di_{c3}}{dt} + w_{c3} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c3} R_{c3}; \\
 u_{c4} &= L_{Sc4} \frac{di_{c4}}{dt} + w_{c4} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c4} R_{c4}; \\
 u_{c5} &= L_{Sc5} \frac{di_{c5}}{dt} + w_{c5} \frac{d\Phi_C}{dt} + i_{c5} R_{c5};
 \end{aligned} \tag{5}$$

где u_n - напряжение соответствующей обмотки; L_{Smm} - собственные индуктивности рассеяния обмоток; R_{mn} - активные сопротивления обмоток; w_{mn} - число витков обмоток.

Представленные уравнения являются нелинейными дифференциальными уравнениями электромагнитных связей трехфазного многообмоточного трансформатора.

Полная модель многообмоточного трансформатора состоит из двух моделей, отвечающих за магнитную и электрическую схемы замещения трансформатора [2].

Рассмотрим алгоритм работы модели. Напряжение, измеренное в блоке *Winding* (рис. 2.) в подсистеме электрических связей трансформатора (рис. 3) с помощью блоков *Goto* и *From*, поступает на блок *integrator*, который совместно с блоком *Gain* в соответствии с представленным ниже уравнением вычисляет поток отдельных обмоток:

$$\Phi = \int \frac{u_n}{w_n} = -\Phi_m \cos \omega t + C, \tag{6}$$

где u_n - напряжение соответствующей обмотки, w_n - число витков соответствующей обмотки, Φ_m - амплитуда магнитного потока, C - постоянная интегрирования.

Как видно, кроме блока управляемого источника тока, подсистемы *Winding* содержат в своем составе последовательное сопротивление $R1$, равное активному сопротивлению соответствующей обмотки трансформатора, параллельное сопротивление $Rm1$, учитывающее магнитные потери в сердечнике трансформатора и измеритель напряжения $V1$.

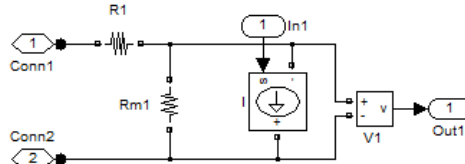


Рис. 2. Состав подсистем Winding

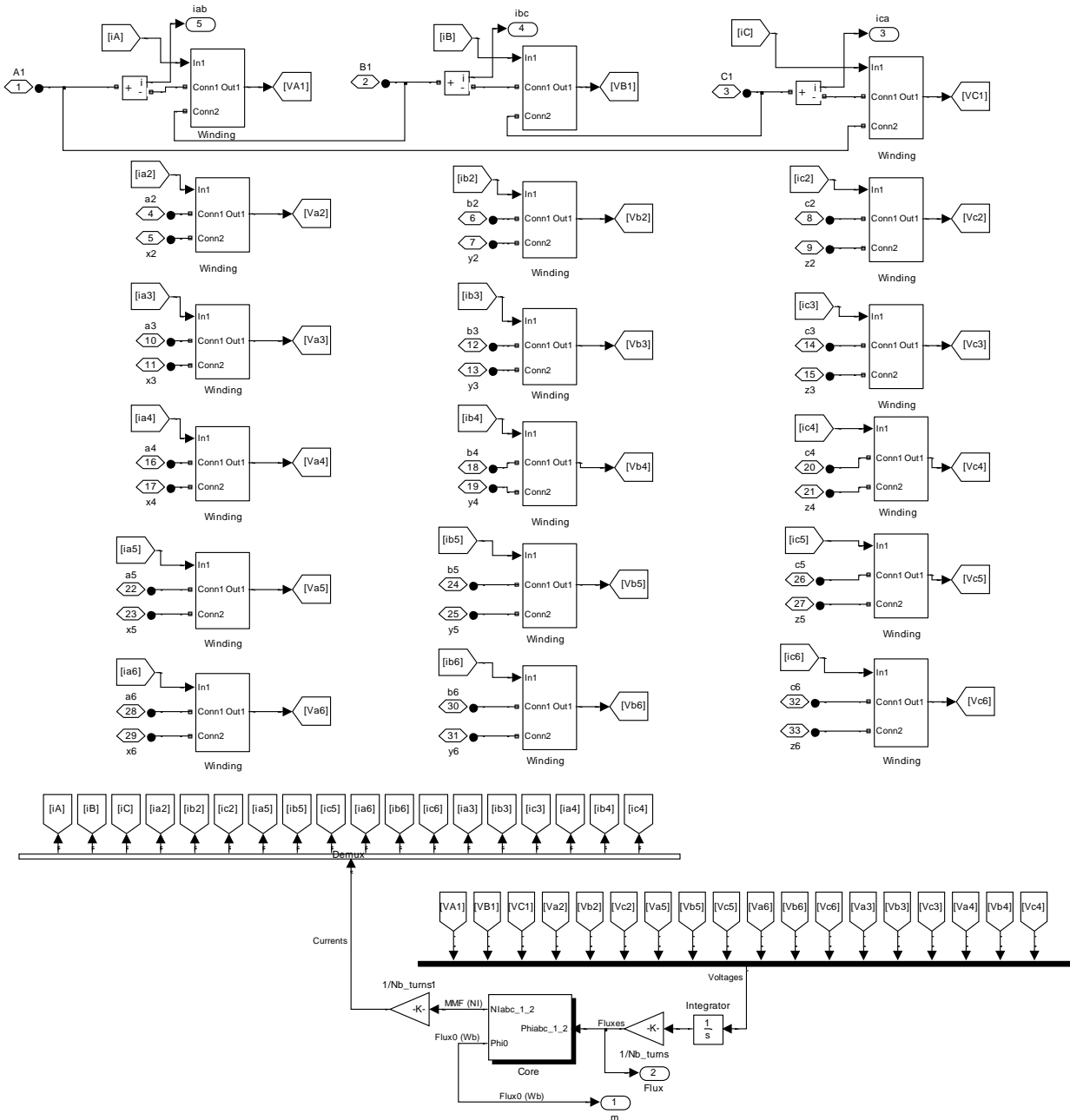


Рис. 3. Модель электрической системы трансформатора

Начальными условиями для блока «integrator» являются значения потока в момент времени $t = 0$ (рис. 3). Задание начальных условий интегрирования позволяет, при необходимости, исключить апериодическую составляющую переходного процесса и сразу перейти к установившемуся режиму работы, что дает значительное сокращение времени моделирования. Блок *Gain* выполняет деление интеграла напряжения на число витков соответствующей обмотки.

Вычисление начального потока выполняется с помощью команд инициализации, написанных на языке Matlab. Данные команды записаны во вкладке *Initialization* маскированной подсистемы модели трансформатора. Размер вектора потоков содержит 18 элементов по количеству обмоток трансформатора.

Значения вычисленных потоков поступают на вход подсистемы, моделирующей магнитную цепь трансформатора. На рис. 4 представлена модель магнитной системы трансформатора, составленная по уравнениям (1)-(2) в соответствии со схемой замещения рис. 1.

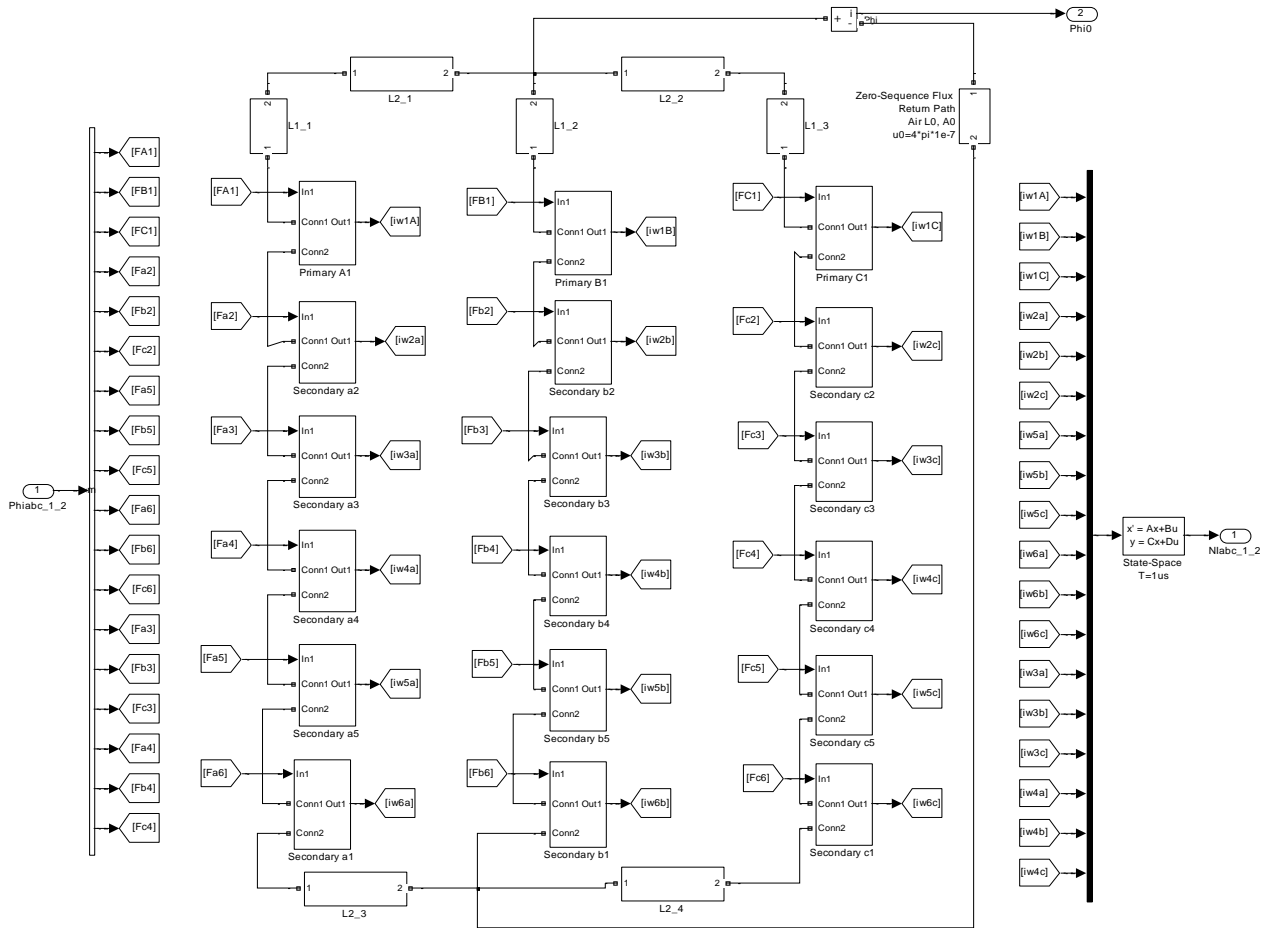


Рис. 4. Модель магнитной системы трансформатора

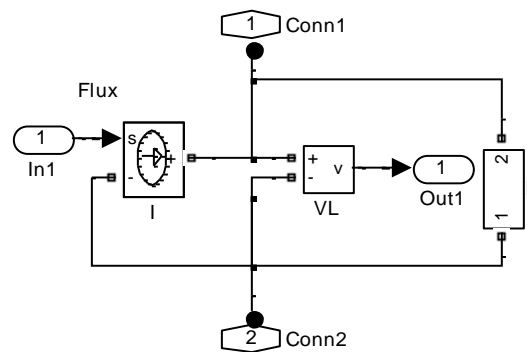


Рис. 5 Состав подсистем *Primary* и *Secondary*

Модель магнитной системы представляет собой эквивалентную электрическую схему замещения магнитной цепи трансформатора. Внешним контуром модели магнитной системы трансформатора является контур замыкания потоков нулевой последовательности.

С помощью блоков *Goto* и *From* значения потоков подаются на входы подсистем *Primary* и *Secondary*, и далее на входы блоков *Controlled Current Source*, превращаясь, таким образом, в электрический сигнал, пропорциональный потоку (рис. 5).

Параллельно источнику тока включено активное сопротивление, величина которого равна соответствующему магнитному сопротивлению, значение которого вычисляется в соответствии с выражением

$$L = \frac{w\Phi}{I} = w^2 \frac{\mu_0 \mu S}{l} = \frac{w^2}{R_M}, \tag{6}$$

и, следовательно,

$$R_M = \frac{w^2}{L}, \tag{7}$$

где R_M – магнитное сопротивление, w – число витков обмотки, L – индуктивность рассеяния обмотки.

Сигнал с измерителя напряжения VL равен величине МДС соответствующей обмотки.

Значения потоков стержней и ярм трансформатора поступают на вход подсистем представляющих нелинейные сопротивления, учитывающие геометрию и магнитные свойства магнитопровода трансформатора (рис. 6). В этих подсистемах определяются магнитные напряжения на ферромагнитных участках (стержень, ярмо) от потока этих участков.

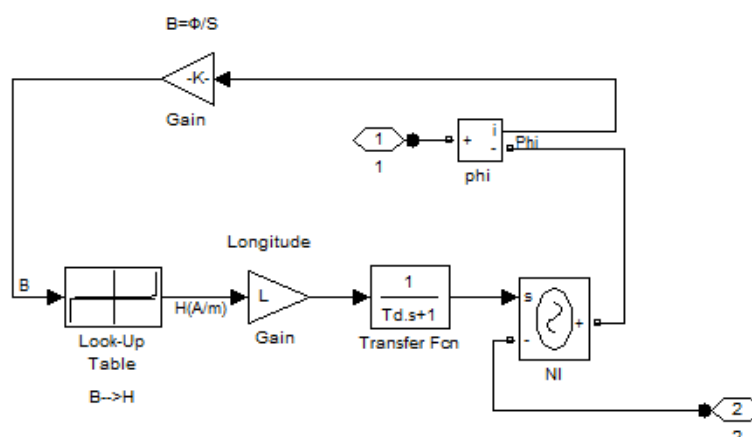


Рис. 6. Состав подсистемы определения магнитного напряжения участков магнитопровода

Алгоритм работы подсистемы (рис. 6) следующий: по величине потока с помощью блока «Gain» рассчитывается индукция на соответствующем участке

$$B = \frac{\Phi}{S}, \tag{8}$$

где S – сечение стержня или ярма. Далее с помощью блока *Look-Up Table* вычисляется напряженность магнитного поля. Данный блок реализует кусочно-линейную интерполяцию заданной табличной функции основной кривой намагничивания стали. Входным сигналом является индукция B , выходным напряженность магнитного поля H . Реализуя произведение напряженности магнитного поля H на соответствующую длину участка магнитопровода l с помощью блока *Gain* определяются падения магнитного напряжения соответствующих участков магнитопровода (стержня или ярма).

Следует отметить, что для улучшения устойчивости вычислений (разрыва алгебраической петли) используется блок *Transfer Fcn* в котором прописана передаточная функция аperiodического звена с малой постоянной времени.

Сигнал равный падению магнитного напряжения участка магнитопровода Hl , является входным для блока *Controlled Current Source*.

Значения МДС обмоток поступают в подсистему верхнего уровня (рис. 3), в которой моделируются электрические связи обмоток.

Значения токов обмоток вычисляются через МДС с помощью блока *Gain* (рис. 3) по выражению:

$$i = \frac{i_w}{w} \quad (9)$$

Вычисленный ток поступает на входы подсистем *Winding* и далее на блок управляемого источника тока (рис. 2). Напряжение, измеренное с помощью *V1*, поступает на блок *integrator* и далее процесс вычисления повторяется.

Разработанная модель шунтового трансформатора ФПУ реализует следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора в режиме холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. В динамических режимах модель позволяет исследовать режимы короткого замыкания и подключения трансформатора к трехфазной сети.

Библиографический список

1. Алтунин, Б.Ю. Математическое моделирование тиристорных устройств РПН трехфазных трансформаторов / Б.Ю. Алтунин, И.М. Туманов // Электротехника. 1996. №6. С. 22–25.
2. 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.

Дата поступления
в редакцию 16.04.2015

E.N. Sosnina, A.A. Kralin, A.A. Asabin

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF PHASE SHIFTING PARALLEL TRANSFORMER

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

Purpose: Development of simulation model of phase-shifting multi-winding transformer by means of Simulink.

Design/methodology/approach: Models are made in Simulink by means of structural scheme.

Findings: Model allows us to study electromagnetic processes of phase-shifting transformers in steady-state and transient mode. Models consist of two parts: magnetic and electrical.

Key words: three-phase multi-winding transformer, modeling, equivalent circuits, Simulink.

УДК 621.314

О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, В.В. Соколов

**ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Волжский государственный университет водного транспорта

Обоснована актуальность разработки и исследования электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения.

Приведено описание функциональной и структурной схем единой электростанции судна на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения. Рассмотрены результаты моделирования режима плавного пуска гребного электродвигателя единой электростанции на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения мощностью 500 кВт. Описана методика расчета коэффициента полезного действия рассматриваемой единой электростанции. Приведены результаты расчета топливной экономичности единой электростанции мощностью 100 кВт.

Ключевые слова: единая электростанция, электродвижение, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения.

На водном, автомобильном и железнодорожном транспорте все большее распространение получают системы электродвижения. При этом тяговые (гребные) электродвигатели могут питаться вместе с другими потребителями от единой электростанции автономного объекта (ЕЭС). Применение ЕЭС позволяет повысить надежность и упростить обслуживание энергосистемы автономного объекта за счет уменьшения количества составляющих ее компонентов. В качестве первичных двигателей ЕЭС широко используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Как правило, ЕЭС строится на базе дизель-генераторных установок (ДГУ) постоянной частоты вращения. Повышение экономичности электростанции возможно за счет применения ДГУ переменной частоты вращения. Экономия топлива достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [1].

Исследование и разработка ЕЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения является относительно новым техническим направлением в малой энергетике. Работы в данной области проводят ряд известных зарубежных фирм (Fubag, Honda, Hyundai, Kupor, ABB, Wartsila и др.). Известны исследования по данной тематике и в России – ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (г.Москва), ОАО "Звезда" (г.Санкт-Петербург), ОАО "Сигма" (г.Ковров), ВГАВТ и НГТУ (г.Н.Новгород). Перечень отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных указанной тематике, достаточно мал. Анализ показал, что особенно это относится к исследованиям динамических режимов работы, разработке математической модели ЕЭС с системой электродвижения на базе ДГУ переменной частоты вращения, синтезу систем регулирования каналов электродвижения, электроснабжения, расчету топливной экономичности ЕЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения.

На основании изложенного целью исследования является разработка электростанции автономного объекта с системой электродвижения на базе ДГУ переменной частоты вращения.

Предложена концепция построения электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе ДГУ, отличающихся повышенной топливной экономичностью, кото-

рая достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [2].

Разработана структура ЕЭС транспортного объекта (судна) на базе ДГУ переменной частоты вращения, защищенная патентом на изобретение РФ (рис. 1) [3]. ЕЭС построена на базе ДВС 1, приводящего во вращение синхронный генератор (СГ) 2. Гребной винт 6 приводится во вращение синхронным двигателем (СД) 5. Система работает следующим образом. Блок 14 формирования оптимальной частоты вращения (БОЧ) ДВС 1 задает частоту вращения вала, оптимальную с точки зрения потребления топлива. Блок 14 формирует выходной сигнал, согласно заложенной в его памяти многопараметровой характеристике ДВС, в зависимости от выходных сигналов блока 15 вычисления мощности нагрузки (БМН) и датчика 8 частоты вращения ДВС. Многопараметровая характеристика представляет собой зависимость эффективной мощности ДВС от частоты вращения вала дизеля при наименьшем удельном расходе топлива. Блок 15 определяет мощность нагрузки на основе сигналов от датчиков тока 9, 10 и датчиков напряжения 11, 12.

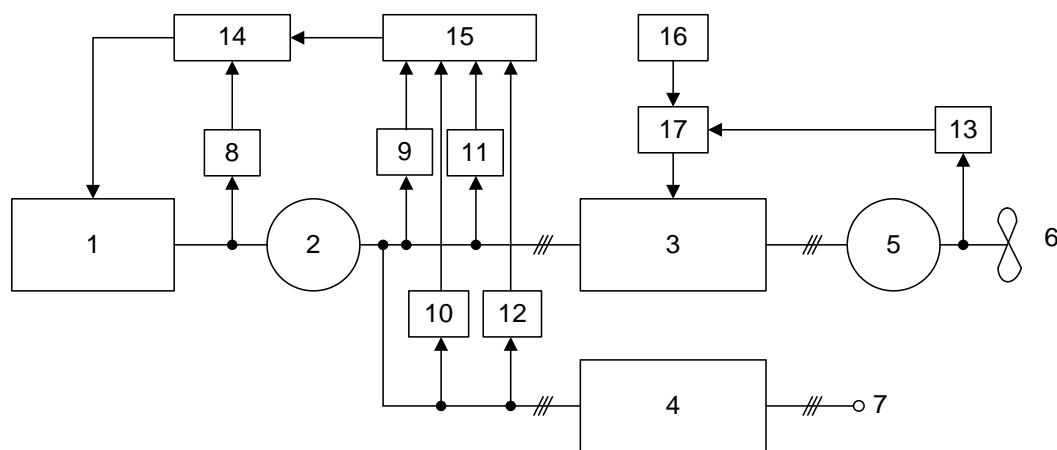


Рис. 1. ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения:

1 – ДВС; 2 – синхронный генератор; 3, 4 – преобразователи частоты; 5 – гребной синхронный двигатель; 6 – гребной винт; 7 – выходы для подключения потребителей судовой сети; 8 – датчик частоты вращения ДВС; 9, 10 – датчики тока; 11, 12 – датчики напряжения; 13 – датчик частоты вращения гребного винта; 14 – блок формирования оптимальной частоты вращения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки; 16 – задатчик частоты; 17 – блок регулирования частоты

В соответствии с требуемой скоростью движения судна, задатчик частоты 16 формирует сигнал задания частоты выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ) 3, и, тем самым, определяет скорость вращения гребного электродвигателя 5. Блок регулирования частоты 17 формирует сигнал управления частотой ПЧ 3 на основе сигналов от задатчика частоты 16 и датчика 13 частоты вращения гребного электродвигателя.

Таким образом, ПЧ 3 является согласующим элементом между СД 5 и СГ 2, работающими с разными частотами вращения. Для питания электропотребителей судна на выходе СГ включен ПЧ 4, который обеспечивает стабильные значения амплитуды и частоты напряжения бортовой сети. Таким образом, ЕЭС можно условно разделить на два канала: электродвижения и электроснабжения.

Наиболее экономичная частота вращения вала ДВС может быть определена по универсальной (многопараметровой) характеристике. На рис. 2 представлена многопараметровая характеристика двигателя SEMT – «Пилстик» типа РС4-480 мощностью 1100 кВт [4].

Для исследования динамических режимов, разработана математическая модель ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения [5].

На основе математической модели разработана структурная схема ЭЭС транспортного объекта (на примере судна) с электродвижением на базе ДГУ переменной частоты вращения.

На рис. 3 представлена структурная схема канала электродвижения вышеуказанной ЭЭС.

На основе математической модели и структурной схемы, в программном пакете MatLab Simulink разработаны имитационные модели, позволяющие производить анализ динамических режимов работы каналов электродвижения и электроснабжения ЭЭС с учетом величины и характера нагрузки, а также формируемой с целью оптимизации расхода топлива скоростной характеристикой дизеля [6].

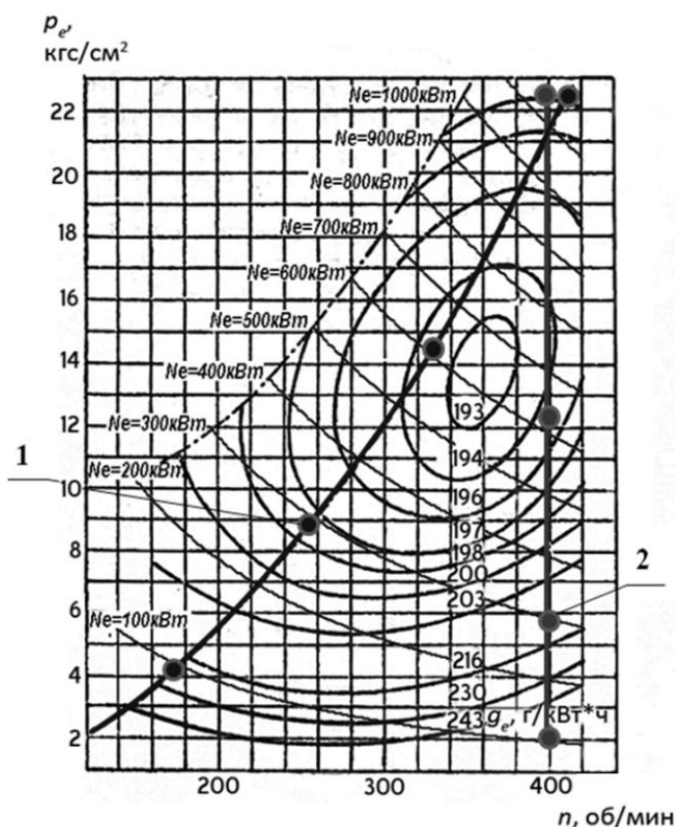


Рис. 2. Многопараметровая (универсальная) характеристика СОД фирмы SEMT – «Пилстик» типа РС4-480:

N_e - мощность дизеля кВт; n – обороты дизеля об/мин; g_e – удельный расход топлива – г/кВт*ч; p_e – среднее эффективное давление на поршень – кгс/см²; кривая 1 – характеристика оптимального регулирования частоты ДВС; кривая 2 – характеристика работы ДВС с постоянной частотой коленчатого вала (неоптимальная)

На основе разработанной имитационной модели, произведен сравнительный анализ результатов моделирования режимов плавного пуска гребного электродвигателя канала электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт по линейной, S-образной и экспоненциальной характеристикам. Установлено, что наименьшие колебания электромагнитного момента M_{max} и длительность пуска $t_{пуск}$ соответствуют S-образной пусковой характеристике гребного электродвигателя (рис. 4).

Произведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт. Например, для ЭЭС мощностью 500 кВт максимальная амплитуда колебаний электромагнитного момента при сбросе нагрузки до $M_c=0$ (оголение винта) достигает 1,7 о.е. Также проведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электроснабжения ЭЭС.

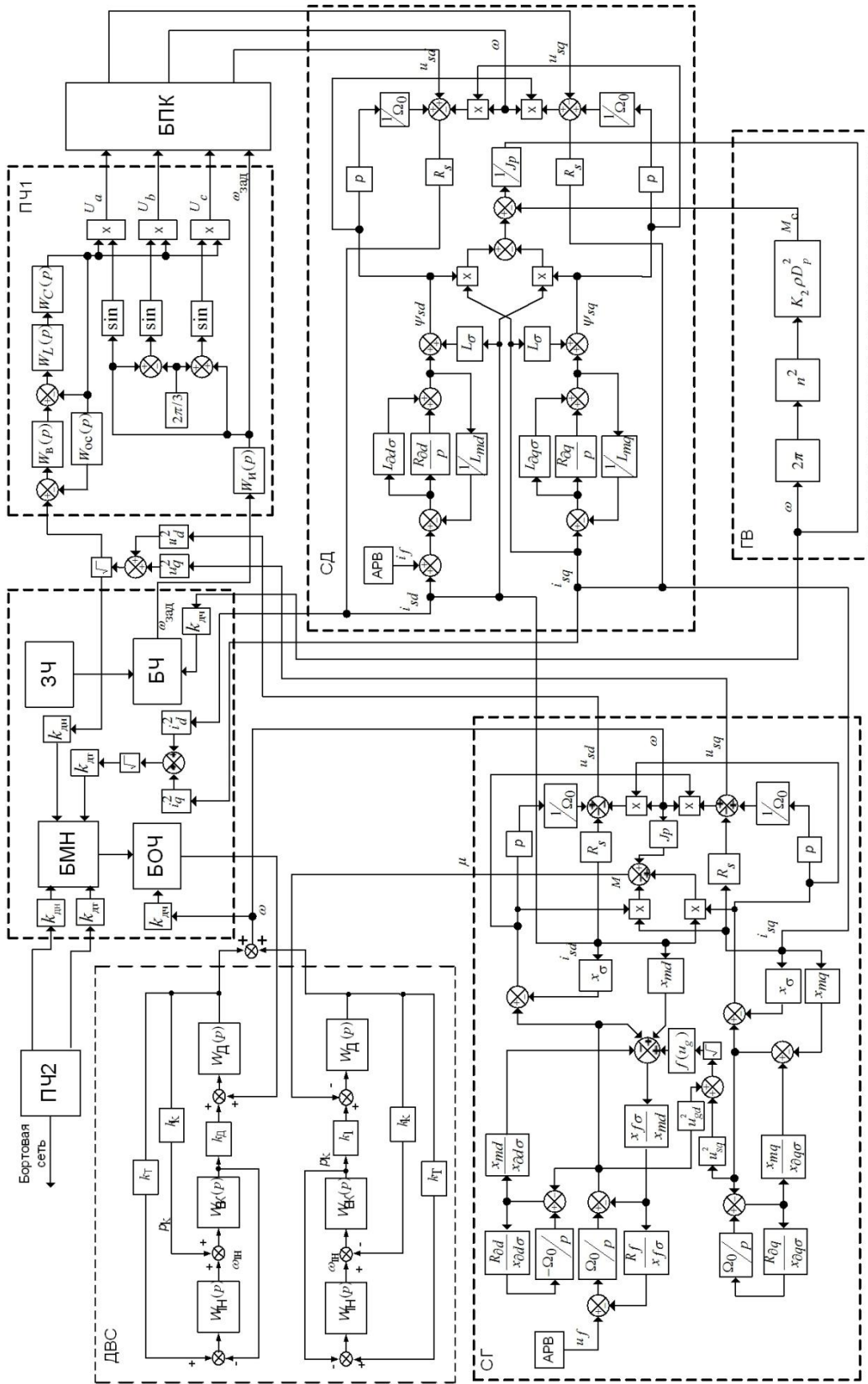


Рис. 3. Структурная схема канала электродвижения ЭЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения $W_b(p)$, $W_{oc}(p)$, $W_L(p)$, $W_C(p)$, $W_i(p)$ – передаточные функции выпрямителя ПЧ, обратной связи, индуктивности и емкости фильтра, инвертора; АРВ, ПЧ1 (ПЧ2), ГВ – соответственно автоматический регулятор возбуждения, преобразователи частоты, гребной винт; $\omega_{зад}$, M_c – заданная частота вращения СД, момент сопротивления на валу СД

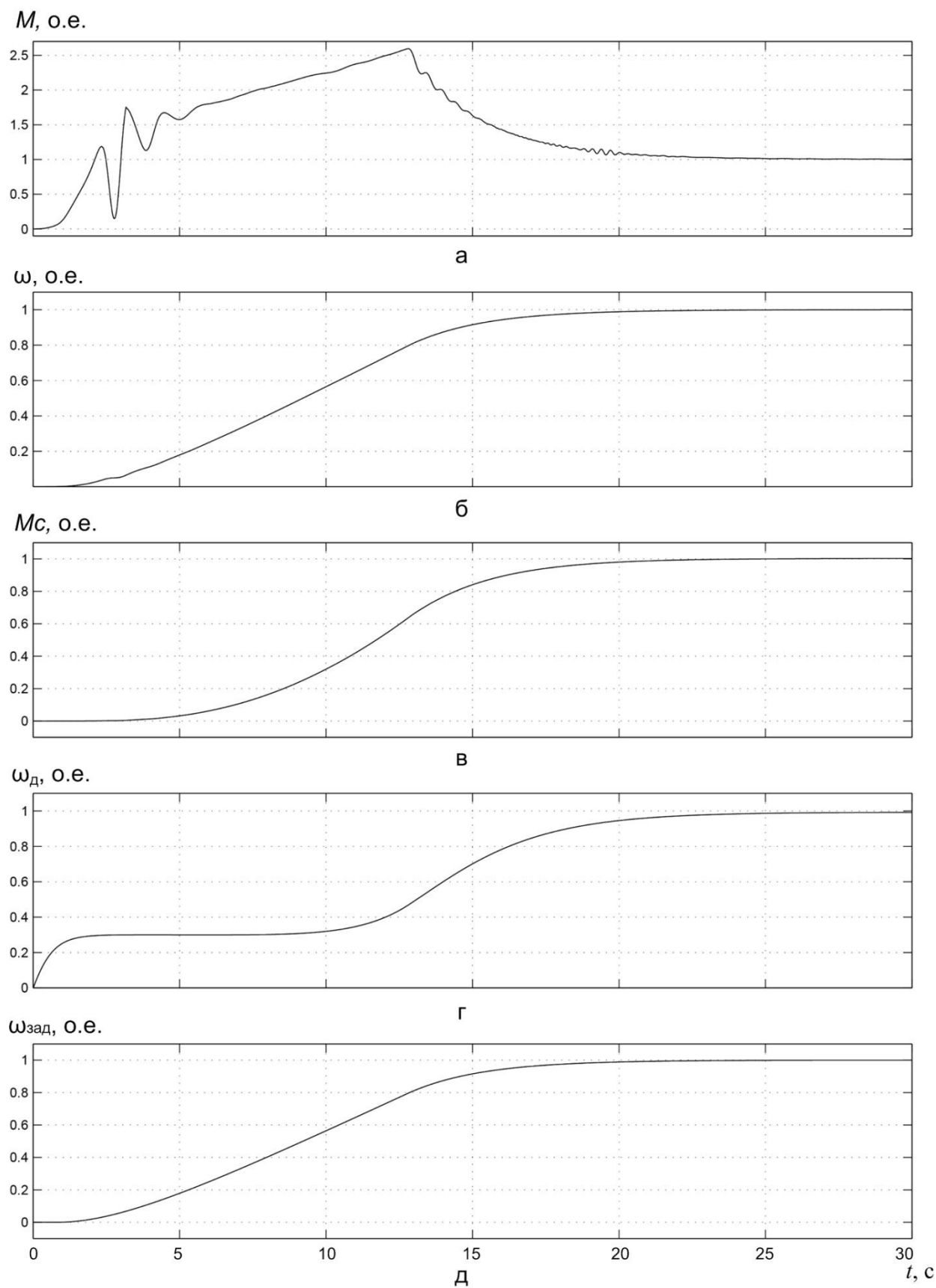


Рис. 4. Моделирование режима пуска СД ЕЭС 500 кВт по S-характеристике:
 а – электромагнитный момент СД M , о.е.; б – частота вращения ротора СД ω , о.е.;
 в – момент нагрузки СД M_c , о.е.; г – частота вращения вала дизеля ω_d , о.е.;
 д – заданная частота СД $\omega_{зад}$, о.е.

Разработана методика расчета коэффициента полезного действия ЭЭС автономного объекта с электродвижением на базе ДГУ переменного частоты вращения [7, 8]. Энергетическая диаграмма ЭЭС на базе ДГУ переменного частоты вращения представлена на рис. 5.

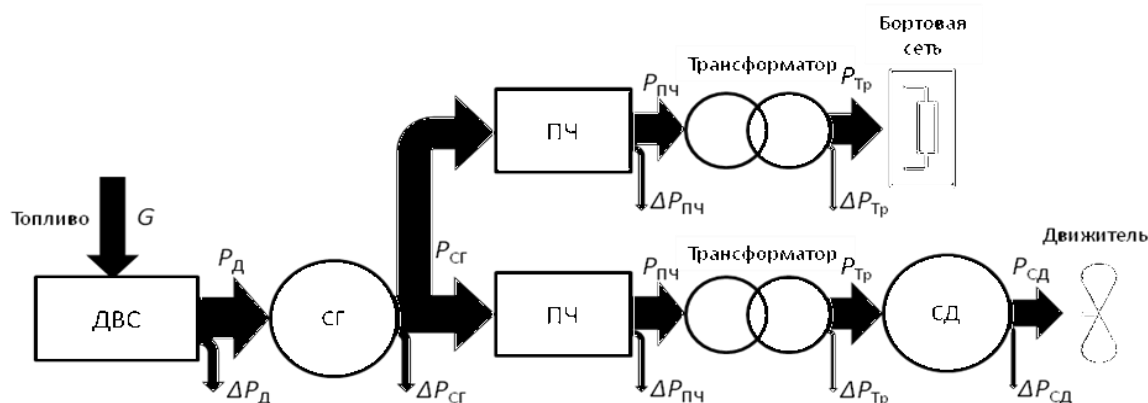


Рис. 5. Энергетическая диаграмма ЭЭС на базе ДГУ переменного частоты вращения:

G – абсолютный расход топлива; P_D , $P_{СГ}$, $P_{ПЧ}$, $P_{Тр}$, $P_{СД}$ – выходная мощность соответственно ДВС, синхронного генератора, преобразователей частоты, трансформаторов, тягового синхронного двигателя; ΔP_D , $\Delta P_{СГ}$, $\Delta P_{ПЧ}$, $\Delta P_{Тр}$, $\Delta P_{СД}$ – потери мощности соответственно ДВС, синхронного генератора, преобразователей частоты, трансформаторов, тягового синхронного двигателя

При изменении мощности нагрузки ЭЭС происходит изменение частоты вращения вала ДВС, момента на его валу, соответственно меняется частота вращения ротора генератора, частота и амплитуда генерируемого напряжения, частота и амплитуда напряжения на входе и выходе (для канала электродвижения) преобразователя частоты, трансформатора, частота и амплитуда питающего напряжения, частота вращения ротора, момент на валу гребного (тягового) двигателя, а также мощность, потребляемая бортовой сетью автономного объекта. Таким образом, методика расчета должна учитывать изменение всех вышеперечисленных параметров.

Каждому значению частоты вращения гребного винта (колеса) соответствует определенный момент и мощность нагрузки на валу гребного (тягового) двигателя. Гребной (тяговый) двигатель является нагрузкой для трансформатора (Тр). ПЧ является нагрузкой для СГ. Согласно разработанной методике, рассчитывается общий КПД цепи СГ – ПЧ – Тр – СД. Алгоритм расчета КПД учитывает, что элементы электрооборудования, входящие в состав ЭЭС на базе ДГУ переменного частоты вращения (СГ, СД, Тр, ПЧ) работают при переменном частоте и амплитуде напряжения. Расход топлива ДВС при конкретных значениях мощности нагрузки и частоты вращения вала определяется по многопараметровым характеристикам ДВС.

Разработана методика расчета КПД (потерь мощности) синхронной машины, преобразователя частоты и трансформатора при переменных мощности нагрузки и частоте напряжения. Построены графики зависимостей КПД от частоты напряжения для синхронной машины (СМ), трансформатора и ПЧ.

Произведен расчет коэффициента полезного действия СМ в пакете MathCad. В расчете учитывается закон регулирования $U/f = \text{const}$, т.е. при снижении частоты напряжения, амплитуда напряжения также будет снижаться. На рис. 6, 7 представлены графики зависимости КПД от частоты напряжения и потребляемой мощности для синхронных машин МСК91-4 ($P_H = 75 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$), МСК1250-1500 ($P_H = 1000 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$). Кривые соответствуют определенным мощностям $P_1 = 0,25, 0,5, 0,75, 1 P_H$. Графики отражают зависимость КПД от частоты напряжения при переменных амплитуде напряжения, токе и постоянной мощности нагрузки. Так как расчет произведен для кривых соответствующих определенной, постоянной мощности нагрузки, при снижении частоты и амплитуды напряжения, ток будет обратно пропорционально увеличиваться.

Таким образом, для кривой, соответствующей номинальной мощности ($P_1 = P_H$), при номинальной частоте напряжения $f=50$ Гц, напряжение и ток статора соответствуют номинальным значениям $U=U_H$, $I=I_H$, при снижении частоты до $f=40$ Гц, $U=0,8*U_H$, $I=I_H/0,8=1,25*I_H$. При превышении номинального значения тока, нагрев электрической машины превышает максимально допустимый для длительного режима работы. Графики зависимости КПД (рис. 6, 7) ограничены кривой, соответствующей току статора $I=1,25*I_H$.

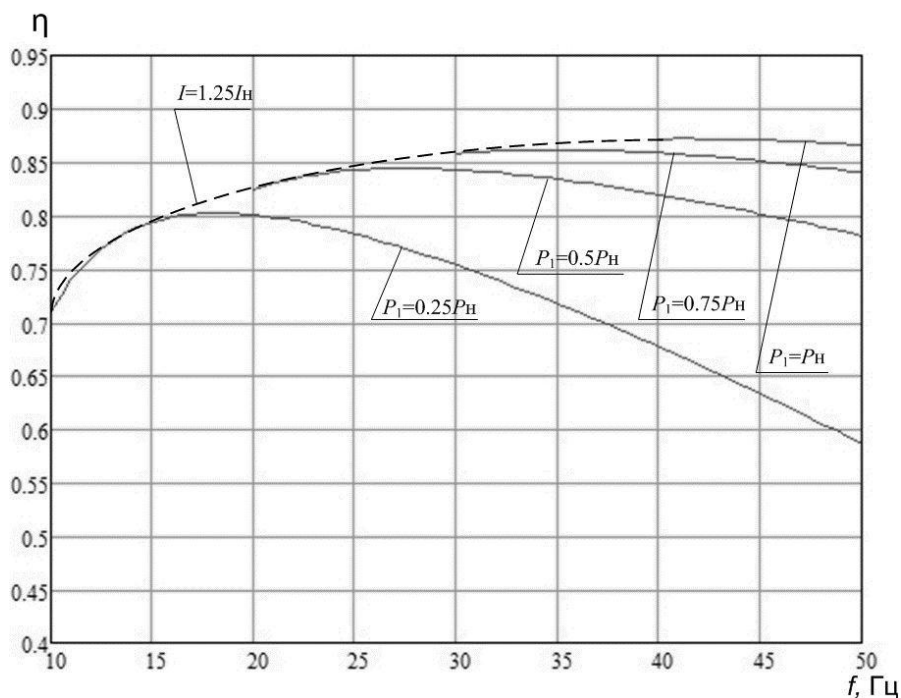


Рис. 6. Зависимость КПД СМ МСК91-4 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

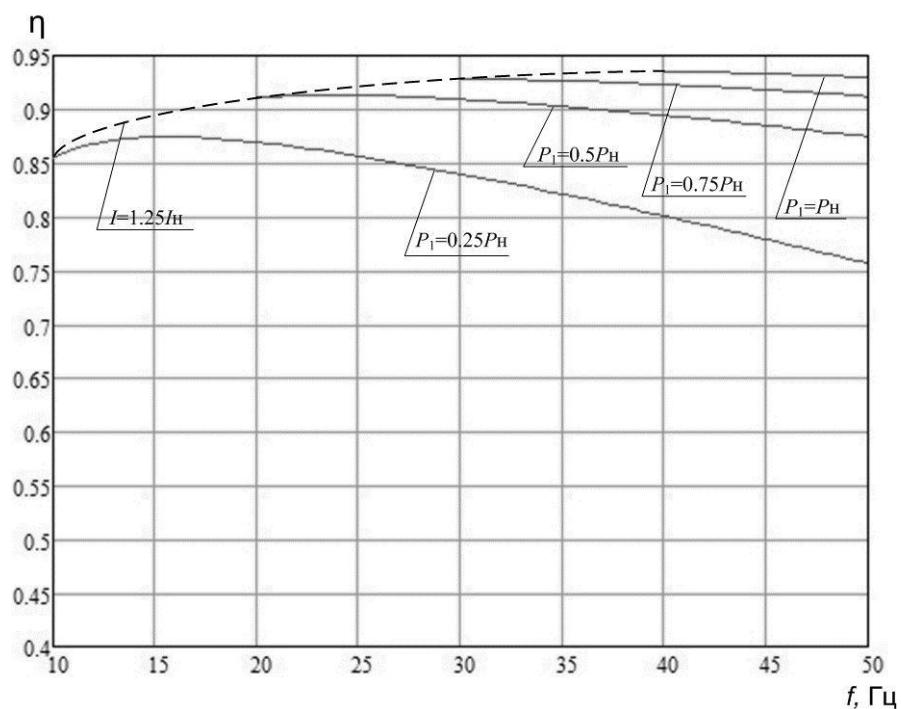


Рис. 7. Зависимость КПД СМ МСК1250-1500 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

С помощью разработанной методики произведен расчет топливной экономичности ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения на примере ЭЭС мощностью 100 и 1000 кВт. На основании результатов расчета, построены сравнительные характеристики удельного и абсолютного расходов топлива для двух режимов работы: с регулированием частоты вращения ДГУ в зависимости от мощности нагрузки и с постоянной частотой вращения ДГУ. Например, для ЭЭС мощностью 100 кВт экономия топлива достигает 31% по абсолютному расходу (рис. 8, 9).

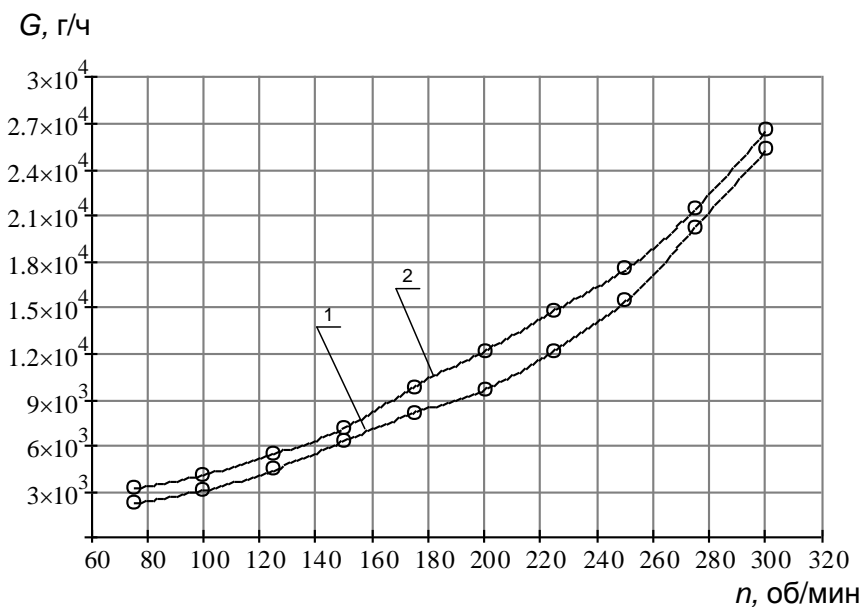


Рис. 8. Абсолютный расход топлива G ДВС ЭЭС мощностью 100 кВт с регулированием (1) и без регулирования (2) частоты ДГУ в зависимости от частоты вращения гребного винта n

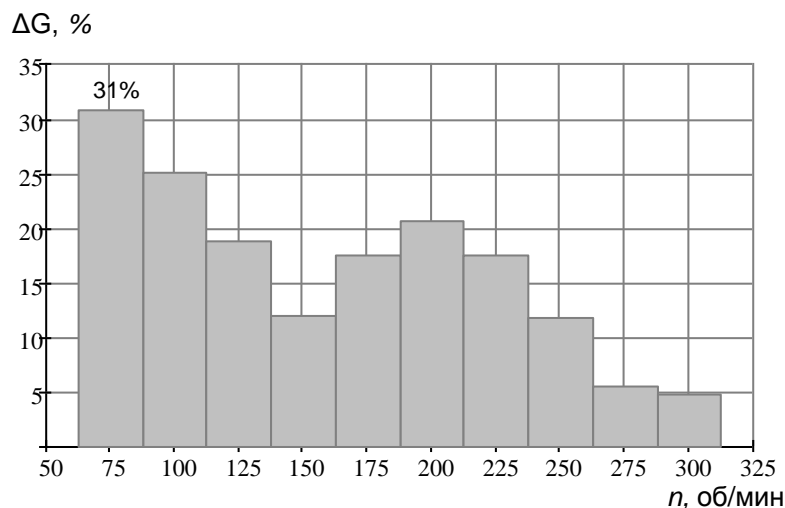


Рис. 9. Диаграмма показателей топливной экономичности ΔG по абсолютному расходу топлива, соответствующих различным частотам вращения ГВ n ЭЭС мощностью 100 кВт

Применение ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения позволяет добиться существенной экономии топлива, что является крайне важным показателем в современных условиях растущих цен на энергоносители и повышающихся требованиях к снижению уровня вредных выбросов в атмосферу. Обеспечение оптимального режима ДВС требует нового подхода к управлению топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной системы управления нейросетевого типа [9].

Библиографический список

1. **Дарьенков, А.Б.** Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. Т. 77. С. 68–72.
2. **Самоявчев, И.С.** Единая электростанция автономного объекта на базе ДВС переменной частоты вращения / И.С. Самоявчев, О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Тезисы докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. Н.Новгород. 2010. С. 62–63.
3. Патент на изобретение № 2436691, В60L 11/08, В60W 20/00, В60W 10/08. Система электродвижения автономного объекта / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, И.С. Самоявчев // Опубликовано Бюл. № 35, 20.12.2011.
4. **Коллеров Л.К.** Газожиidкостные двигатели SEMT-«Пилстик» / Л.К. Коллеров. – Энергомашиностроение, 1973.
5. **Хватов, С.В.** Математическая модель единой электростанции автономного объекта на базе ДВС с переменной скоростью вращения / С.В. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, О.С. Хватов // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород. 2010. С. 58–63.
6. **Хватов, О.С.** Имитационная модель единой судовой электростанции на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Вестник Ивановского государственного технического университета. Иваново. 2011. №4. С. 50–54.
7. **Хватов, О.С.** Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта. – СПб. 2013. №1(71). С. 47–50.
8. **Хватов, О.С.** Оценка топливной экономичности в единых электростанциях автономных объектов на базе двигателей внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. №3.
9. **Хватов, О.С.** Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Ч. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 126–131.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov, I.S. Samoyavchev, V.V. Sokolov

**ELECTRIC POWER STATIONS OF AUTONOMOUS OBJECTS BASED
ON A VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR SETS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

The urgency of research and development electric power stations with electric propulsion based on a variable speed diesel generator sets.

The description of the functional and structural schemes of unified electric power station of ship based on a variable speed diesel generator set. The results of the simulation soft-start of propulsion motor of unified electric power station output of 500 kW based on a variable speed diesel generator set. A technique for calculating the efficiency of the considered unified electric power station. The results of the calculation of fuel efficiency unified electric power station output of 100 kW.

Key words: unified electric power station, electric propulsion, variable speed diesel generator set.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74.002.64:669.13

Ю.А. Зиновьев¹, А.А. Колпаков², С.В. Кузнецов¹, В.Д. Швецов¹, Г.И. Белявский¹

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ОБРАЗОВАНИЕ ГРАФИТА В ВЫСОКОПРОЧНОМ ЧУГУНЕ И УСАДОЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ОТЛИВКАХ

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

Рассмотрены особенности воздействия нового комплексного модификатора с Се, Са на свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Сбалансированное количество Се нейтрализует демодифицирующие элементы для получения стабильных интерметаллических соединений оксидов Се, сульфидов и окисульфидов. Эти соединения Се действуют на улучшение образования зародышей графита при кристаллизации. Са используется как первичный активный элемент в модифицировании, и он оказался решающим для эвтектического образования зародышей графита. Сера, соединяясь с Се, Са и другими металлами, облегчает образование зародышей графита. Этот комплексный модификатор сдвигает выделение графита в более позднее время кристаллизации, что уменьшает объем усадки данного сплава и, следовательно, количество усадочных дефектов в отливке. Для полного исключения усадочных дефектов в высокопрочном чугуне Се был заменен на La.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, комплексный модификатор, церий, кальций, лантан, усадочные дефекты.

Модифицирование играет решающую роль в производстве высококачественного литейного чугуна. Основной функцией модифицирования является увеличение центров графитизации, что способствует росту графитовой эвтектики и одновременно уменьшает переохлаждение и снижает до минимума вероятность образования твердых эвтектических карбидов в структуре. Для этого необходимо предотвратить переохлаждение до температур ниже метастабильной эвтектики, когда происходит образование карбидных структур.

Роль модификатора заключается в создании центров графитизации в жидком чугуне, способствующих формированию шаровидного графита при незначительном переохлаждении. Это, в свою очередь, обеспечивает большее число зародышей графита в высокопрочном чугуне (ВЧ).

Добавки магния и церия в литейный чугун с целью получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) оказывают сильное воздействие на образование карбидов. Модифицированием чугуна необходимо нейтрализовать это воздействие даже в случае высокого содержания углерода и кремния. Помимо этого, модифицированием обеспечивается повышенное количество графитовых центров в высокопрочном чугуне.

Модифицирование ВЧ представляет собой процесс десульфурации и деоксидации. Тем не менее, необязательно удалять сульфиды и оксиды из жидкого чугуна в покровный шлак. Необходимо обеспечить мелкодисперсное распределение частиц в чугуне. Такие микрочастицы действуют в качестве потенциальных центров гетерогенного образования

графита в процессе кристаллизации. Следовательно, эффективный процесс модифицирования получается при низких величинах S и O.

При бурно протекающих процессах (например, конверторном или обработкой порошковой проволокой) замедляется реакция деоксидации. Частицы MgO проявляют большую склонность к окускованию и образуют крупные шлаковые кластеры, которые легко всплывают, и деоксидация эффективно протекает в покровном шлаке. Основным недостатком этого процесса является то, что из-за агломерации и флотации сульфидов и оксидов значительная часть потенциальных частиц, формирующих центры графитизации, вымывается из чугуна.

Обработка чугуна сплавами ферросилиция с магнием протекает менее бурно без существенного вымывания центров графитизации. Кроме того, силикаты магния образуют меньшие по размеру частицы по сравнению с оксидами магния.

Таким образом, после обработки расплава большая часть оксидов остается в виде мелкодиспергированных частиц. Обычная плотность таких частиц составляет 100 тыс/мм³. Средний диаметр частиц колеблется от 0,5 до 1 мкм. Благодаря малому размеру, частицы всплывают медленно и, следовательно, остаются в расплаве в течение длительного времени.

Графитизирующие элементы повышают и снижают эвтектические температуры графита и карбида. Стабилизаторы карбида уменьшают эвтектическую температуру графита и повышают эвтектическую температуру карбида.

Сегрегация, сопровождающая кристаллизацию, особенно в толстых сечениях, может способствовать образованию карбида между ячейек. Элементы-стабилизаторы карбида сегрегируют к границе ячейек, в то время как графитизирующие элементы сегрегируют от ячейек. Как результат, возникает существенная разница в двух эвтектических температурах в зонах между ячейками. Образование графита происходит по различным причинам. Повышение уровня графитизаторов в чугуне является эффективным способом снижения отбела. Однако это необязательно лучший способ устранения карбида, формирующегося между ячейками, поскольку графитизаторы сегрегируют в направлении от границ ячейек. Более эффективным решением представляется снижение уровня стабилизаторов карбида, особенно тех, которые обладают ярко выраженной сегрегацией. Кроме того, рекомендуется уменьшить степень сегрегации за счет повышения скорости кристаллизации и сократить диффузионные расстояния уменьшением расстояний между диффузионными частицами. Это можно обеспечить высокоэффективным модифицированием чугуна.

Традиционно, модификаторами были сплавы FeSi, содержащие металлические добавки, как кальций (Ca), барий (Ba), стронций (Sr), марганец (Mn) и цирконий (Zr). Цель этих активных элементов заключается в реакции с S и O в чугуне и образовании потенциальных разнородных центров кристаллизации для графита. Число возможных центров кристаллизации, которые могут образоваться после обработки, показывают эффективность модификаторов [1], [2], [3].

Для увеличения эффективности было представлено новое использование модифицирующих материалов Ce, Ca. Модификаторы, содержащие Ce, Ca, которые применялись при производстве чугуна с шаровидным графитом, показали более однородную микроструктуру, малую тенденцию к образованию усадочных дефектов, трещин и улучшенную его обрабатываемость.

Модификатор в комбинации с Ca - Ce состоит из разных уровней Ca и Ce, которые регулируют скорость охлаждения и нейтрализуют демодифицирующие рассеянные элементы, которые предотвращают образование шаровидного графита в чугуне. Модификатор содержит малые и контролируемые количества S и O, необходимые для реакции с Ca и Ce в период введения в расплавленный чугун.

Первичным объектом модификатора с Ca, Ce является взаимодействие контролируемых концентраций неметаллических элементов, таких как S и O с металлическими. Сбалансированное и контролируемое образование включений увеличивает плотность центров кри-

сталлизации графита при реакции между высоко активными металлическими элементами Са, Се и неметаллическими S и О модификатора. S облегчает образование зародышей графита, О играет значительную роль в процессе модифицирования.

Комбинированное использование и обработка обоих элементов через последующую модификацию предназначено для получения выгоды от Са, Се, S и О при одновременном образовании зародышей графита. Са используется как первичный активный элемент в модифицировании, и он оказался решающим для эвтектического образования зародышей графита. Сбалансированное количество Се нейтрализует демодифицирующие элементы для получения стабильных интерметаллических соединений, а также имеет сильное сродство к S и О, действующее на формирование высокостойких оксидов Се, сульфидов и оксисульфидов. Эти соединения Се действуют на улучшение образования зародышей при кристаллизации [4].

Дополнительные центры кристаллизации затем будут действовать параллельно с традиционными, образованными в период реакций между сферидизатором, модификатором и основным материалом.

Состав модификатора предназначен для облегчения условий образования зародышей графита в чугуне с шаровидным графитом, уменьшения переохлаждения и уменьшения образования усадочных раковин.

Модификатор с Са, Се образует дополнительные центры кристаллизации в чугуне с шаровидным графитом в дополнение к тем, которые образовались при обработке магнием. Это может быть полезно для получения большой пластичности и ударной вязкости ферритного чугуна.

Модификатор особенно эффективен в чугунах с шаровидным графитом с низким содержанием S и в чугунах, обработанных Mg в конвертерах или инъекционным методом.

Литой чугун модифицируется:

- для улучшения обрабатываемости, без образования карбидов;
- активизации образования графита и феррита;
- уменьшения тенденции легирования и ликвирования примесных элементов;
- уменьшения образования усадочных раковин в период кристаллизации и повышения пластичности;
- создания более однородных структур и свойств в различных зонах разностенных отливок.

Установили, что модификатор с Са, Се улучшил основные свойства чугуна, так как увеличилось число мелких включений шаровидного графита в пластичных чугунных отливках.

Доказано, что модификатор с Са, Се был удачен для образования новых центров кристаллизации в чугуне с шаровидным графитом с большим временем выдержки в том случае, когда основной чугун или чугун, обработанный Mg, обрабатывался перед добавлением модификатора. Известно, что длительные периоды выдержки уменьшают возможности полного образования зародышей графита в чугуне [5].

Действие мощного источника образования зародышей и большее число шаровидных включений являются предпосылками увеличения количества феррита при производстве ферритных марок чугуна с шаровидным графитом.

Модификатор с Са, Се действует на размер графита и распределение шаровидных включений, который препятствует образованию усадки и большего феррита, действуя как эффективное графитизирующее образование в сегрегированных зонах, обогащенных перлитостабилизирующими элементами. Это косвенно улучшает обрабатываемость чугуна с шаровидным графитом.

Пример 1. Литейное производство использовало метод электрической индукционной плавки и процесс получения чугуна с шаровидным графитом в промежуточном ковше. Ис-

следовали проблемы карбидов и повышенной усадки в разностенных отливках с тонкими стенками. Использовалась обычная струйная модифицирующая добавка, содержащая Zn, Mn, Ca. Когда модификатор с Ca, Ce был сравнен со струйной добавкой, результаты показали, что новый модификатор ограничивал карбиды в тонких стенках. Микропористость была достаточно мала, что позволило избежать шероховатых внутренних поверхностей после сверления выпуклых секций в разностенных отливках. Исследование 2-3 мм стенок отливок из чугуна с шаровидным графитом показало, что модификатор с Zn, Mn, Ca дает 305 шаровидных включений на кв. мм, а модификатор с Ca, Ce – 620 включений на кв. мм.

После перехода производства на новый модификатор значительно уменьшился брак отливок и улучшилось их качество. В настоящее время количество модификатора с Ca, Ce также уменьшили на 25%.

Пример 2. Другое литейное производство, которое использовало индукционную плавку и слоистую обработку (sandwich treatment), испытывало модификаторы для своего автоматического разлива и струйного модифицирования.

Число шаровидных включений сравнивалось в плоских стенках толщиной в 5, 10, 20 и 40 мм. Новый модификатор имел больше шаровидных включений на кв. мм, чем модификатор со Sr. Использование модификатора с Ca, Ce в 40 мм стенке показало число плотности включений 330 на кв.мм, а в 5 мм – 308 включений на кв.мм. Это предполагает второй тип образования зародышей, более позднее в процессе охлаждения, дающий максимум преимуществ в толстых стенках отливок.

В ребристых отливках модификатор с Ca, Ce дает равномерное распределение крупных шаровидных включений и множество малых шаровидных включений, которые образуются позднее, в период кристаллизации, что уменьшает усадку чугуна.

Введение Ce в комбинацию S и O в модификатор с Ca, Ce также создает второй тип образования зародышей, активированных во время кристаллизации.

После перехода на модификатор с Ca, Ce литейное производство уменьшило проблемы, связанные с усадкой, и поддерживало минимальный уровень добавки модификатора.

Пример 3. Это литейное производство производило крупные отливки из чугуна с шаровидным графитом методом индукционной плавки и промежуточной обработкой. Проблемы крупных отливок включали флотацию графита, сегрегацию, усадочные дефекты и относительно малую степень шаровидности включений. Модификаторы с Ca, Ce и Ba исследовались как добавки для ковша.

Результаты показали, что модификатор с Ca, Ce производит 368 включений/кв.мм, а с Ba – 178 включений/кв.мм.

Новый модификатор показал большее число малых размеров шаровидных включений с характеристиками равномерного распределения и уменьшение усадки чугуна.

Модификатор с Ca, Ce на 15% улучшил шаровидность графита. Новый модификатор также уменьшает межзеренный перлит с 24% до 12%. Связанная сетка перлита при 24% (и выше) разрывается на малые фрагменты перлита в доминирующей ферритной матрице.

В результате литейное производство производит отливки с лучшими свойствами на растяжение и удар с однородным распределением шаровидных включений. Оказалось, что новый модификатор увеличивает срок службы заготовок на 45% при улучшении механической обработки.

Пример 4. Литейное производство, использующее индукционную плавку и слоистую обработку Mg, производило отливки с усадочными дефектами: с большими раковинами в толстых стенках.

Модификатор с Ca, Ce был испытан на специальном опытном образце. Прибыль была уменьшена наполовину, а отливка оценена на пористость и наличие раковин. Была выявлена

очень малая пористость внутри отливки. Литейное производство перешло на новый модификатор для разрешения проблемы с усадочными дефектами.

Для полного исключения усадочной пористости в сложных разностенных отливках типа «ступицы» был применен новый модификатор с элементами La-Ca [6]. Лантан способствовал еще более позднему образованию зародышей графита, что усиливало графитизацию, уменьшило усадку чугуна и, соответственно, исключило усадочные дефекты в отливках.

Для повышения хладостойкости чугуна необходимо было повысить ударную вязкость и пластичность.

Известны различные способы повышения ударной вязкости, начиная от обработки жидкого расплава разными химическими элементами (*Ti*, *Ba*, *Mo*, *Zr* [7-10]) и заканчивая термической обработкой (например, отжиг – нагрев до 760 °С, выдержка 6 ч, охлаждение с печью [11]).

Одним из наиболее распространенных является способ комплексного воздействия на сплав: сфероидизация графита осуществляется путем обработки жидкого чугуна магнийсодержащими присадками или комплексными модификаторами с последующей термической обработкой (ферритизирующий отжиг при 680-800 °С) [12]. Достигаемая при этом ударная вязкость для высокопрочного чугуна составляет КСУ 150-170 кДж/м², что, по данным работы [7], не является достаточной.

Авторам работы [13] удалось вообще обойтись без термообработки и обеспечить ударную вязкость чугуна порядке 310-350 кДж/м² при температурах выше -40°С. Однако при снижении температуры наблюдалось резкое падение (более чем в два раза) ударной вязкости до 150 и 130 кДж/м² при температуре -40 и -60 °С соответственно.

В условиях металлургического производства ОАО «ГАЗ» основным технологическим процессом, позволяющим обеспечить требуемый уровень ударной вязкости, является внутриформенное модифицирование высокопрочного чугуна магнийсодержащим модификатором с последующей выдержкой отливок в форме в течение 60 мин. Недостатком данного процесса является нестабильность значений ударной вязкости при температурах ниже -40 °С.

Авторы предлагают повысить и стабилизировать значения ударной вязкости высокопрочного чугуна в области отрицательных рабочих температур микродобавками бора, используя гибкость и универсальность технической схемы внутриформенного модифицирования.

Бор уже получил признание производителей как эффективный микролегирующий элемент. Так, в работах [14-16] была установлена возможность активного воздействия малых добавок бора на стойкость к коррозии нержавеющей сталей, технологическую пластичность труднодеформируемых сталей и сплавов, длительную прочность жаропрочных сталей, склонность к графитизации белого чугуна и на ряд других характеристик железоуглеродистых сплавов. Использование бора при выплавке качественной стали, серого и ковкого чугуна связано с рядом факторов и прежде всего с модифицирующим влиянием бора на процессы кристаллизации сплавов, приводящих в ряде случаев к значительному измельчению зерен; с высокой химической активностью бора по отношению к кислороду и азоту; с резким повышением устойчивости аустенита к распаду при переохлаждении и т.д.

Авторы данной статьи провели исследование совместного влияния комплексного модификатора (КМ) и микродобавок бора на ударную вязкость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) базовой марки ВЧ40 (ГОСТ 7293-85) на примере отливки «Анкер» массой около 5 кг. Количество вводимого бора варьировалось от 0,003 до 0,01 % при неизменном содержании КМ на уровне 0,8-1,2 %. Обработку чугуна проводили внутриформенно, форма изготавливалась из ХТС, модифицирование осуществлялось магнийсодержащим комплексным модификатором ФСМг5 (44-48 % *Si*, 5,5-6,5 % *Mg*, 0,8-1,2 % *P3M*, 0,8-1,2 % *Ca*, ост. *Fe*), после модифицирования проводилась выдержка отливок в форме. Всего было изготовлено 24 опытные отливки.

Из полученных отливок были изготовлены образцы двух видов с надрезом U-образной формы и без него, размером 10x10x50 мм. Для охлаждения образцов использовался термостат с возможностью замера температуры, в который была помещена смесь твердой углекислоты («сухого льда») с этиловым спиртом. Испытания проводили на маятниковом копре в следующем диапазоне температур – от +20 °С до -80 °С* с шагом в 20 °С.

Изготовление, охлаждение и испытание образцов на ударную вязкость проводили в соответствии с ГОСТом 9454-78.

Установили, что содержание бора, соответствующее максимальным значениям ударной вязкости в области отрицательных рабочих температур, находится в интервале от 0,005 до 0,007 % включительно.

Бор совместно с комплексным магнийсодержащим модификатором оказывает влияние на процесс кристаллизации высокопрочного чугуна, которое проявляется в значительном измельчении зерен и повышении устойчивости аустенита к распаду при переохлаждении. Согласно работе [17], это объясняется тем, что микродобавки бора концентрируются в тонких пограничных слоях зерна аустенита и снижают скорость зарождения центров кристаллизации перлита.

Содержание бора на уровне 0,01 % и выше приводит к карбидостабилизирующему эффекту и резкому снижению пластических характеристик. Снижение содержания бора до 0,003 % и менее не оказывает никакого влияния на ударную вязкость опытных отливок в области отрицательных рабочих температур, так как, вероятно, весь бор идет на нейтрализацию кислорода в чугуне [18].

В ходе экспериментальных исследований определяли также технологические ограничения на содержание в хладостойком чугуне кремния, марганца и фосфора.

Для того чтобы исключить отрицательное влияние на ударную вязкость и с целью снижения порога хладноломкости, содержание кремния в чугуне не должно превышать 2,9 %. Для обеспечения высокой пластичности (на уровне 20-24 %) необходимо ограничить содержание кремния в чугуне в пределах от 2,1 до 2,7 %.

Марганец оказывает на структуру чугуна влияние, противоположное влиянию кремния, уменьшая количество феррита и увеличивая количество перлита. В связи с этим с целью снижения порога хладноломкости его содержание не должно превышать 0,3 %.

Для получения высокой ударной вязкости верхний предел содержания фосфора должен быть ограничен 0,05 %.

Графит, который формально относится к группе неметаллических включений, имеющих прочность на разрыв, близкую к нулю, в чугуне выступает в роли основного регулятора уровня механических свойств металла. В связи с этим в работе изучали совместное влияние комплексного модификатора и микродобавок бора на форму, размер и характер распределения графита в высокопрочном чугуне с ВЧШГ.

Очевидно, что бор оказывает существенное влияние на металлическую основу ВЧШГ. При содержании бора в пределах от 0,005 до 0,007 % содержание феррита было максимальным и составило 100 %, при более высоком содержании бора количество феррита снижалось более чем на 20 %.

Микродобавки бора влияют также на размер и распределение графитовых включений. При содержании бора в пределах 0,005-0,007 % графит укрупняется, но его распределение остается равномерным; при повышении содержания бора (> 0,01 %) количество крупных глобул графита увеличивается, однако распределение их носит неравномерный характер.

Таким образом, максимальные значения ударной вязкости ВЧШГ базовой марки ВЧ40 в области отрицательных рабочих температур, соответствующие наибольшей хладостойкости материала отливок, обеспечиваются комплексным введением 0,005-0,007 % бора и мо-

дификатора ФСМг5 в ходе внутриформенного модифицирования. При этом содержание феррита составило 100 %; графит укрупнился (но его распределение осталось равномерным); на образцах с U-образным надрезом ударная вязкость чугуна повысилась (по сравнению с вариантом без использования микродобавок бора): при +20 °С на 1-10 %; при -20 °С на 15-17 %; при -40 °С на 17-20 %; при -60 °С на 27-30 % и при -80 °С на 11 %; на образцах без надреза ударная вязкость чугуна повысилась: при +2- °С на 4-6 %; при -20 °С на 6-10 %; при -40 °С на 6-14 % и при -60 °С на 20-26 %.

Результаты исследований использовались при разработке усовершенствованной технологии производства отливок ответственного назначения из высокопрочного чугуна для деталей, работающих в условиях низких температур. Это позволило решить проблемы обеспечения необходимого уровня хладостойкости литых заготовок из ВЧШГ в условиях металлургического производства ОАО «ГАЗ».

Библиографический список

1. **Жуков, А.А.** Встречное модифицирование чугуна с шаровидным графитом / А.А. Жуков [и др.] // Вестник машиностроения. № 5. 1987.
2. **Трухов, А.П.** Особенности усадочных процессов в отливках из высокопрочного чугуна в сырых песчано-глинистых форма / А.П. Трухов, Е.А. Шибеев // Литейное производство. № 7. 1994.
3. **Макаревич, А.П.** Влияние способа ввода модификатора на структуру высокопрочного чугуна / А.П. Макаревич [и др.] // Литейное производство. 2004. № 9.
4. **Косилов, А.А.** Эффективный способ улучшения качества металла / А.А. Косилов [и др.] // Литейное производство. 2002. № 5.
5. **Торбьерн, Скаланд.** Исследование продолжительности действия модификаторов в чугуне с графитом разной формы // Литейное производство. 1999. № 6.
6. Пат. на изобретение № 2358032. «Чугун» высокопрочный для отливок без усадочных дефектов / Зиновьев Ю.А. [и др.]. 2009.
7. **Шебастинов, М.П.** Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М.П. Шебастинов, Ю.Е. Абраменко, Н.И. Бех. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
8. Пат. 773121 СССР: С22 С37/10. Высокопрочный чугун / Д.Н. Худокормов, В.М. Королев, С.М. Леках, И.Ю. Сапонько; заявитель и патентообладатель Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический ин-т - № 2738219/22-02; заявл. 21.03.79; опубл. 23.10.80, Бюл. № 39.
9. Пат. 2267542 РФ: С22 С37. 10Чугун, способ его получения и способ термической обработки отливок из него / Г.И. Сильман, В.В. Камынин, С.А. Харитоненко; заявитель и патентообладатель Брянская государственная инженерно-технологическая академия - № 200412239 / 02; заявл. 19.07.04; опубл. 10.01.06, Бюл. № 3.
10. Пат. 2313603 РФ; С 22 С 37 /10. Чугун / Ю.А. Щепочкина; заявитель и патентообладатель Ю.А. щепочкина - № 2006113333/02; заявл. 19.04.06; опубл. 28.12.07, Бюл. № 45.
11. **Александров, Н.Н.** Повышение хладостойкости высокопрочного чугуна / Н.Н. Александров [и др.] // Литейное производство. 1981. № 1. С. 4–5.
12. **Шерман, А.Д.** Чугун: справочник / А.Д. Шерман, А.А. Жуков. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
13. **Яковлев, М.И.** Хладостойкий чугун с шаровидным графитом / М.И. Яковлев, Е.С.Петров, А.Д. Андреев // Литейное производство. 2001. № 3. С 6–7.
14. **Аникеев, В.В.** О модифицировании стальных отливок // Литейное производство. 2010. № 4. С. 6–10.
15. **Михайловский, В.М.** Проблема отбела в отливках из чугуна и методы его устранения / В.М. Михайловский, С.П. Королев, О.А. Константинович // Литейное производство. 2008. № 3. С. 4–6.
16. **Лякишев, Н.П.** Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
17. **Гуляев, А.П.** Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

18. Тимофеев, А.М. Повышение физико-механических свойств высокопрочного чугуна посредством микролегирования бором / А.М. Тимофеев, И.О. Леушин, Ю.А. Зиновьев // Матер. X съезда литейщиков России. – Казань: Вертолет, 2011. С. 153–155.

*Дата поступления
в редакцию 16.04. 2015*

Yr.A. Zinoviev¹, A.A. Kolpakov², S.V. Kuznetsov¹, V.D. Shvetsov¹, G.I. Belyavsky¹

**CREATING THE BASE TECHNOLOGY OF PRODUCING SAME-HEAT LOW-SULFUR
AND HIGH-SULFUR IRONS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
GAZ Corp²

This paper addresses the peculiarities of the impact of a new complex inoculant with cerium (Ce) and calcium (Ca) on the properties of high-duty ductile iron. The proportioned amount of Ce neutralizes the de-inoculation elements to obtain stable intermetallic compounds of Ce oxides, sulphides, and oxysulphides. These Ce compounds ameliorate the graphite nucleation during crystallization. Ca is used as the primary active element in inoculation, and it (Ca) proved to be decisive for eutectic graphite nucleation. Sulphur (S), combining with Ce, Ca, and other metals facilitates graphite nucleation. This complex inoculant shifts graphite separation to a later while of crystallization, which diminishes the given alloy's shrinkage volume and, consequently, the amount of shrinkage defects in the casting. For complete preclusion of shrinkage defects in high-duty iron, Ce was substituted for lanthanum (La).

Key words: high-duty iron, complex inoculant, cerium, calcium, lanthanum, shrinkage defects.

УДК 621.74

П.А. Слузов, В.К. Седунов

**ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ЧУГУНА**

ОАО «ЛМЗ», г. Семенов Нижегородской области

Проведен анализ процессов модифицирования и микролегирования чугуна с позиции природы, возможностей и воздействия на расплав. Приведены исследования по эффективности обработки расплава карбонатами бария, стронция и кальция. Рассмотрен вопрос микролегирования хромистых чугунов ванадием и молибденом.

Ключевые слова: модифицирование, микролегирование, расплав, чугун, карбонаты, графит, структура, свойства.

В настоящее время для повышения качества и механических свойств чугунов очень часто используют технологические приемы модифицирования и микролегирования. «Под модифицированием понимается процесс активного регулирования первичной кристаллизации или (и) изменения степени дисперсности кристаллизующихся фаз путем введения в расплав малых добавок отдельных элементов или их соединений. Эффективность воздействия модификаторов может быть оценена по изменению ими поверхностного натяжения на границе жидкой и твердой фаз, а так же по устойчивости такого изменения во времени (термовременного эффекта)» [1].

Микролегирование – введение в расплав небольшого количества (до 0,1% его массы) добавок легирующих элементов для изменения его свойств в нужном направлении, например хладостойкости, жаропрочности и т.д.

Часто в понятие «микролегирование» ошибочно включают процессы раскисления и модифицирования, отличающихся механизмом влияния на структуру и свойства сплавов. Роль малых добавок при микролегировании проявляется преимущественно в результате их воздействия на твердое состояние металла (образование твердого раствора внедрения или замещения; размер вторичных зерен; дисперсность, форму и распределение неметаллических включений: строение границ и тонкую структуру зерен; снижение отрицательного влияния вредных примесей).

Эффективность модифицирования и микролегирования можно значительно расширить, применяя сложные модификаторы: составные и комплексные [2]. Составные модификаторы получают из обычных однотипных модификаторов. Комплексные включают в себя добавки, проявляющие различное по характеру влияние на кристаллизацию чугуна. Использование составных модификаторов позволяет улучшить модифицирующий эффект единичных модификаторов, так как повышается уровень графитизации чугуна, который определяется характером зародышевой фазы в расплаве. Сложные по составу модификаторы эффективнее уменьшают отбел, измельчают эвтектическое зерно, улучшают механические свойства чугуна. Эффект модифицирования графитизирующими добавками зависит от склонности исходного расплава к переохлаждению. Так, *при увеличении перегрева и выдержки* жидкого чугуна число зародышей *уменьшается*, что ведет к увеличению переохлаждения. *При увеличении скорости охлаждения* отливки *увеличивается переохлаждение и число зародышей графита*. Однако при модифицировании чугунов с высоким углеродным эквивалентом C_3 данные методы модифицирования малоэффективны.

Была высказана идея [2,3], что способность ряда легирующих элементов увеличивать переохлаждение, можно использовать для регулирования структуры и свойств чугуна с высоким C_3 . Небольшие добавки таких легирующих элементов, как Cr, Mn, Mg, Sb и др. по-

верхностно-активные элементы (ПАЭ) совместно с графитизирующими модификаторами могут создавать условия такого глубокого переохлаждения сплава, что он кристаллизуется мелкозернистым, при этом расширяются возможности регулирования структуры и повышения механических свойств чугуна.

Исследовано комплексное модифицирование (КМ) чугуна сильнодействующими графитизирующими присадками с антиграфитизирующими добавками. Модификаторы-антиподы взаимно усиливают положительные эффекты модифицирования. ПАЭ обладают отбеливающим действием по отношению к графитной фазе, что проявляется в осаждении этих элементов на поверхности графитных включений и их блокированием. В результате центры графитизации дезактивируются и не перерастают в зародыши сверхкритического размера. Одновременно эти элементы препятствуют их растворению в расплаве, в результате чего происходит их консервация. Центры кристаллизации графита освобождаются от адсорбированного слоя атомов (ионов) ПАЭ при вводе в чугун графитизирующих модификаторов.

Такое комплексное модифицирование получило название «встречное». Рассмотрим влияние различных модифицирующих и микролегирующих элементов на структуру и свойства чугунов. Кальций и барий образуют в чугуне устойчивые соединения с кислородом, серой, азотом, и водородом. Они химически очень активны, не образуют соединений с железом и устойчивых карбидов, но обладают повышенной сорбционной склонностью [4]. Они широко используются для рафинирования и модифицирования чугуна. Данные элементы очень часто вводятся в состав комплексных модификаторов типа Fe-Si – Mg-Ba. Наличие РЗМ позволяет не только снизить содержание магния в комплексном модификаторе и нейтрализовать, вредное действие демодифицирующих элементов, но так же увеличивает продолжительность сохранения в чугуне при его выдержке в ковше графита шаровидной формы. Наличие кальция более 2,5% в составе комплексного модификатора: типа Fe-Si – Mg-Ba также вызывает повышение графитизирующей способности. Число графитных включений резко, возрастает, что способствует уменьшению усадочных дефектов и повышению выхода годного [6].

Хром способствует значительному уменьшению количества графитовых включений и их измельчению, увеличению отбела. При содержании до 1% хром стабилизирует цементит и измельчает перлит в чугуне, повышая его прочность [7]. Для подавления сильного карбидообразующего действия хрома вместе с ним в расплав вводят никель в соотношении Ni:Cr=1:2. Растворение хрома в феррите практически не вызывает искажения кристаллической решетки и не снижает пластичность чугуна, так как кристаллические параметры и атомные радиусы хрома и α -Fe практически равны. Присадка хрома повышает твердость чугуна не только за счет увеличения количества карбидов, но и в результате увеличения твердости феррита [8].

Молибден способствует повышению временного сопротивления чугуна на 40-70 Мпа при содержании 0,5...0,6%, а также увеличивает его прокаливаемость. При повышенных температурах влияние молибдена на прочность чугуна проявляется более заметно. Так, при температуре 600⁰С чугун, легированный 0,78% молибдена, имеет в два раза более высокие показатели прочности, чем нелегированный [9]. При содержании 0,2...0,5% молибдена несколько повышается износостойкость чугуна без проявления отбела [10].

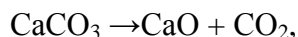
Марганец повышает растворимость углерода в аустените, тем самым способствуя уменьшению количества графита. Марганец повышает количество перлита в матрице чугуна, что снижает его пластичность и вязкость, но повышает прочность и твердость. Он увеличивает прокаливаемость чугуна и его склонность к отбелу при содержании более 0,5%. Марганец в количестве 1,2% полностью подавляет формирование феррита в тонких частях отливок, охлаждаемых со скоростью 0,25...1,3 ⁰С/с [11]. Марганец образует с серой прочный сульфид, который устраняет красноточность деталей. При этом необходимое для связывания серы количество марганца рассчитывается из соотношения %Mn / %S = 4 – 5 [12].

Ванадий способствует измельчению графитовых пластин, завихрению их ориентации. При содержании более 0,12% ванадия вызывает образование междендритного графита и, в целом, уменьшение его количества [13]. Отбеливающее действие ванадия вдвое сильнее графитизирующего воздействия кремния. При введении 0,15–0,25% V резко увеличивается количество перлита и его дисперсность в металлической основе, измельчаются пластинки графита, что значительно увеличивает прочность чугуна. При содержании более 0,5% V в структуре появляются крупные включения цементита, значительно снижающего механические свойства чугуна [14]. При этом, ванадий способствует повышению структурной стабильности чугуна при высоких температурах. Повышение эффективности происходит при вводе в исходный расплав чугуна кремнистых модификаторов, содержащих такие активные элементы, как кальций, стронций, барий, РЗМ, последние вступают в реакцию с компонентами чугуна и образуют оксиды, сульфиды и карбиды.

Термодинамический анализ реакций взаимодействия, например бария при температурах расплава, показывает наибольшее сродство бария к кислороду, затем к сере и далее к углероду [15]. Графитизирующий эффект активных элементов очевидно связан с тем, что после введения в жидкий чугун частиц ферросплава, по мере их растворения в непосредственной близости, образуются локальные зоны расплава с повышенным содержанием кремния и пониженным кислорода. Это стимулирует в этих микрообъемах активацию имеющихся и самопроизвольное зарождение новых зародышей, на основе которых при последующей эвтектической кристаллизации образуется вермикулярный графит (ВГ).

Авторами проанализированы результаты модифицирования и микролегирования чугуновых отливок. Для реализации комплексного модифицирования чугуна предложены модификаторы на основе карбонатов бария, стронция и кальция. При вводе в исходный расплав группы карбонатов будет идти реакция диссоциации. Например, при использовании карбоната кальция CaCO_3 в жидком металле происходит термическая диссоциация с образованием большого количества рафинирующих высокодисперсных газовых пузырьков CO_2 .

Диссоциация карбоната кальция протекает по реакции



$$\Delta Z = 162340 - 140,81T,$$

где ΔZ – изменение изобарно – изотермического потенциала; Дж / моль; T – температура, К.

Графитизирующий эффект рассмотренных карбонатов, очевидно, связан с тем, что после введения в жидкий чугун в результате диссоциации карбонатов идет эффективная обработка металла с образованием соответственно локальных зон расплава с изменившейся концентрацией кремния и кислорода, что стимулирует в этих зонах активизацию образования графитовых включений.

Это подтверждается опытом обработки ваграночного чугуна карбонатами бария, стронция и кальция. В качестве базового расплава использовался серый ваграночный чугун марки Сч 20 ГОСТ 1412 – 85. Модифицирующая обработка осуществлялась в ковше путем введения модификатора в реакционную камеру.

1. Введение в ковш 0,5 % BaCO_3 .

- а. Емкость ковша – 150 кг.
- б. Количество модификатора – 0,75 кг.
- в. Параметры металла (табл.1).
- д. Механические свойства образцов:
Образец № 1 – 1560 кгс / 19,86 кг/мм² – 194,6 Мпа - до модифицирования.
Образец № 2 – 1970 кгс / 21,01 кг/мм² – 205,9 Мпа - после модифицирования.
- е. Микроструктура образцов (рис. 1).

Таблица 1

Содержание химических элементов, %					Температура заливки	Твердость
C	Si	Mn	S	Cr	°C	HB
3,45	2,43	0,68	0,14	0,05	1345	201

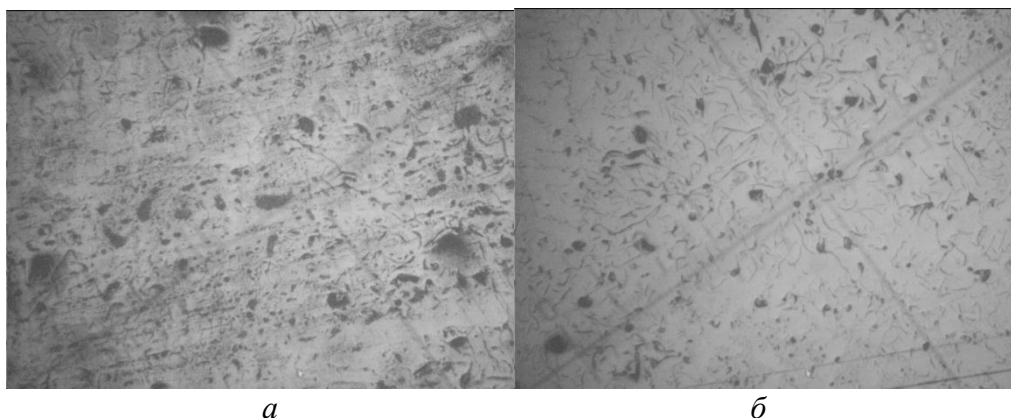


Рис. 1. Влияние карбоната бария на микроструктуру отливок:
a – до модифицирования; *б* – после модифицирования

2. Введение в ковш 0,5 % SrCO₃.

- Емкость ковша – 150 кг.
- Количество модификатора – 0,75 кг.
- Параметры металла (табл. 2).

Таблица 2

Содержание химических элементов, %					Температура заливки	Твердость
C	Si	Mn	S	Cr	°C	HB
3,39	2,24	0,88	0,10	0,04	1340	207

- Механические свойства образцов:
 Образец № 3 – 2510 кгс / 31.96 кг/мм² – 313,2 МПа- до модифицирования.
 Образец № 4 – 1850 кгс / 23.55 кг/мм² – 230,2 МПа- после модифицирования.
- Микроструктура образцов (рис. 2).

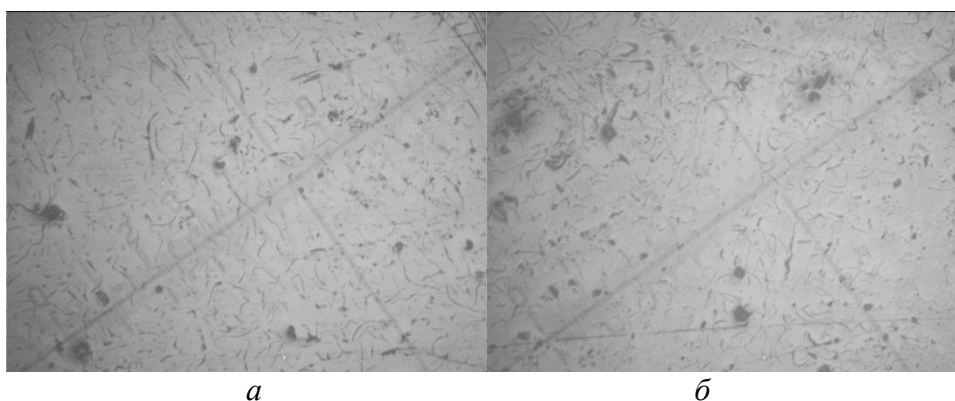


Рис. 2. Влияние карбоната стронция на микроструктуру отливок:
a – до модифицирования; *б* – после модифицирования

3. Введение в ковш 0,5 % CaCO₃.

- а. Емкость ковша – 150 кг.
- б. Количество модификатора – 0,75 кг.
- с. Параметры металла (табл. 3).

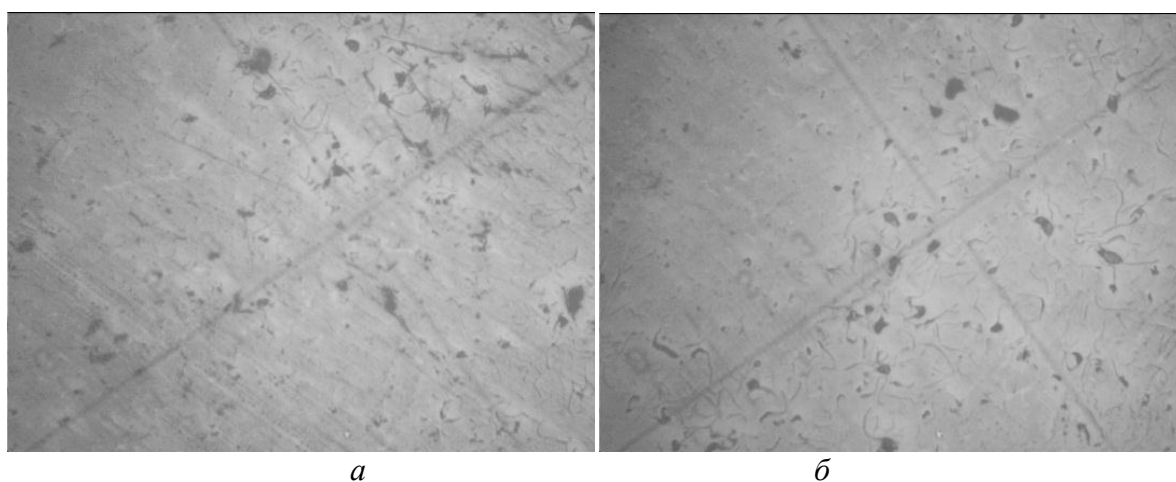
Таблица 3

Содержание химических элементов, %					Температура заливки	Твердость
С	Si	Mn	S	Cr	°С	НВ
3,37	2,05	0,5	0,13	0,05	1340	229

d. Механические свойства образцов:

Образец № 5 – 1600 кгс / 20.37 кг/мм² – 199,6 МПа- до модифицирования

Образец № 6 – 2350 кгс / 29.92 кг/мм² – 293, 2 МПа - после модифицирования

e. Микроструктура образцов (рис. 3).**Рис. 3. Влияние карбоната кальция на микроструктуру отливок:**

а – до модифицирования; *б* – после модифицирования

4. Введение в ковш 0,5 % BaCO₃ +0.5 % CaCO₃.

- а. Емкость ковша – 150 кг.
- б. Количество модификатора – 0,75кг.
- с. Параметры металла (табл. 4).

Таблица 4

Содержание химических элементов, %					Температура заливки	Твердость
С	Si	Mn	S	Cr	°С	НВ
3,31	2,59	0,56	0,13	0,05	1348	217

d. Механические свойства образцов:

Образец № 7 – 2100 кгс / 26.74 кг/мм² – 262,1 МПа- до модифицирования.

Образец № 8 – 2250 кгс / 28.65 кг/мм² – 280,7 МПа - после модифицирования.

e. Микроструктура образцов (рис. 4).

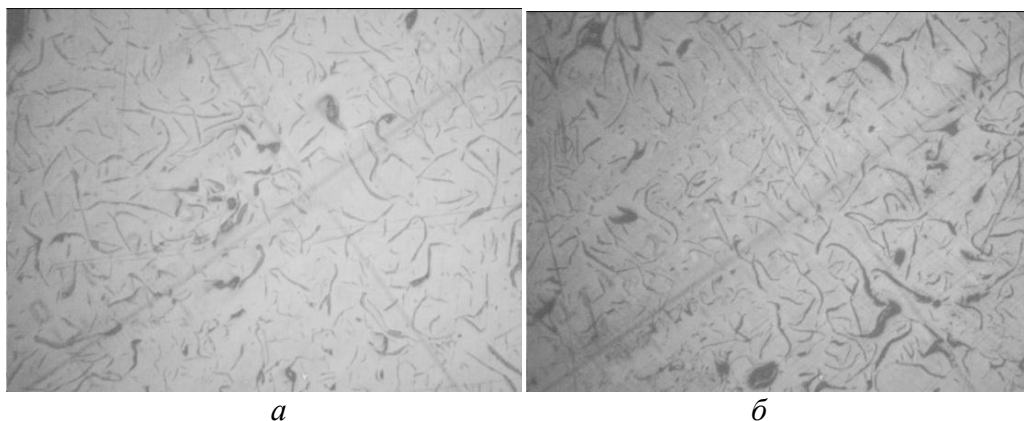


Рис. 4. Влияние составных модификаторов (0,5 % BaCO₃ + 0,5 % CaCO₃) на микроструктуру отливок:
a – до модифицирования; *б* – после модифицирования

5. Введение в ковш 0,5 % SrCO₃ + 0,5 % CaCO₃.

- Емкость ковша – 150 кг.
- Количество модификатора – 0,75 кг.
- Параметры металла (табл. 5)

Таблица 5

Содержание химических элементов, %					Температура заливки	Твердость
C	Si	Mn	S	Cr	°C	НВ
3,42	2,46	0,48	0,13	0,04	1350	197

- Механические свойства образцов:
 Образец № 9 – 2270 кгс / 28.9 кг/мм² – 283,2 МПа - до модифицирования.
 Образец № 10 – 2000 кгс / 25.46 кг/мм² – 249,5 МПа - после модифицирования.
- Микроструктура образцов (рис. 5).

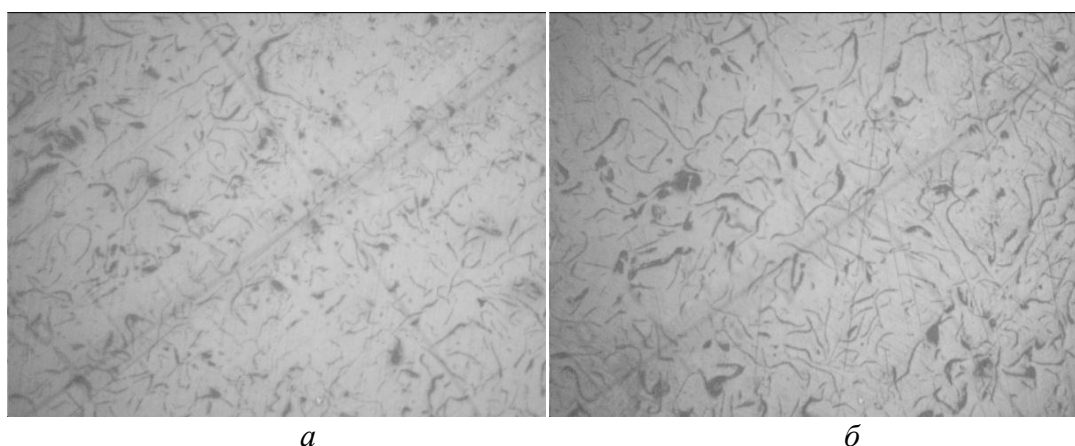


Рис. 5. Влияние составных модификаторов (0,5 % SrCO₃ + 0,5 % CaCO₃) на микроструктуру отливок:
a – до модифицирования; *б* – после модифицирования

Микролегирование является мощным фактором, влияющим на изменение условий кристаллизации, строение пограничных зон и объема зерна, получение однородной структуры и повышение физико – механических свойств.

Микролегирование высокохромистых чугунов (ЧХ16) ванадием и молибденом раздельно или в комплексных добавках в количестве по 0,1% каждого элемента приводит к получению мелкозернистой структуры с равномерным распределением составляющих. Ввод 0,1 – 0,25% V и 0,1 – 0,3% Mo размельчает структуру ледебурита и повышает износостойкость и ударопрочность отливок.

Дополнительное микролегирование ванадием и молибденом низкохромистого чугуна (Cr – 3,0 – 5,0%) позволяет получить в его структуре эвтектическую составляющую на базе карбидов Me_3C_3 , так как ванадий растворяется в карбидах и значительно снижает их скорость растворения в процессе перлитно – эвтектической реакции. Такие карбиды обладают аномально высокой пластичностью при нормальной температуре, они могут деформироваться и фрагментироваться под действием нагрузки без трещинообразования. Наблюдаемый эффект позволяет значительно увеличить прочностные характеристики чугуна.

Таким образом, расширение спектра модифицирующих и микролегирующих элементов и установление их влияния на расплав в различных соотношениях является одной из важных задач при металлургической обработке расплавов. Приведенные рекомендации можно брать за основу при разработке технологии модифицирования и микролегирования.

Библиографический список

1. **Гольдштейн, Я.Е.** Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
2. **Шевчук, Л.А.** Структура и свойства чугуна / Л.А. Шевчук. – М.: Наука и техника. 1978. – 216 с.
3. **Шевчук, Л.А.** Эвтектическая кристаллизация и структура модифицированного чугуна / Л.А. Шевчук, Л.З. Писаренко // Литейное производство. 1979. №8. С. 3–5.
4. Высококачественные чугуны для отливок / под ред. Н.Н. Александрова. – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
5. **Ланда, А.Ф.** Основы получения чугуна повышенного качества / А.Ф. Ланда – М.: Машгиз, 1960. – 166 с.
6. **Волощенко, М. В.** Барий содержащие комплексные модификаторы для получения высокопрочного чугуна / М. В. Волощенко, Г. Н. Хубенов // Литейное производство. 1981. №12. С. 7–9
7. **Гуляев, А. П.** Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Машиностроение 1977. – 648 с.
8. **Сомин, В.З.** Производство отливок из сложнелегированного чугуна с высокими параметрами специальных свойств / В.З. Сомин, А.Д. Андреев, В.И. Куликов // Литейное производство. – 2002. №11. С. 16–25.
9. **Болдырев Д.А.** Комбинированное влияние технологических параметров модифицирования и микролегирования на структуру и свойства конструкционных чугунов: дисс... . докт. техн. наук / Д.А. Болдырев. – М., 2009. – 294 с.
10. **Носкова, Е.В.** Повышение износостойкости тормозных дисков легковых автомобилей / Е.В. Носкова, Л.А. Солнцев, Н.М. Журавлев // Автомобильная промышленность. 1983. №6. С. 28–29.
11. **Литовка, В.И.** Структура и свойства легированного высокопрочного чугуна в отливках / В.И. Литовка, Н.И. Щеглюк // Металловедение и термическая обработка металлов. 1989. №4. С. 17–20.
12. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении: учеб. пособие / В.М. Воздвиженский, В.А. Грачев, В.В. Спасский. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
13. **Асташкевич, Б.М.** Прочность и износостойкость чугуна для втулок цилиндров двигателей / Б.М. Асташкевич // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. №7. С. 31–34.

-
14. Довгопол, В.И. Эффективность использования ванадийсодержащих чугуновых отливок / В.И. Довгопол [и др.] // Литейное производство. 1981. №5. С. 6–7.
15. Андреев, В.В. Роль активных элементов в повышении эффективности графитизирующих модификаторов / В.В. Андреев, Л.С. Капустина // Литейное производство. 2006. №4. С. 18–20.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

P.A. Sluzov, V.K. Sedunov

**ABOUT THE EFFECTIVENESS OF MODIFICATION AND
MICROALLOYING OF IRON**

JSC "LMZ", Semyonov (Nizhny Novgorod region)

There was conducted the analysis of processes of inoculation and micro alloying of cast irons as far as nature, opportunities and impact on the alloy are concerned. Researches on efficiency of processing of alloy by barium carbonate, strontium and calcium are presented. The question of micro alloying of chromic irons by vanadium and molybdenum is considered.

Key words: inoculation, micro alloying, alloy, cast iron, carbonates, graphite, structure, behavior.

УДК 669.15.786-194

Н.С. Тумакова¹, В.П. Тихонов¹, А.С. Смирнов¹, С.Г. Самохвалов,¹ А.А. Большаков²,
В.Г. Назаров³, И.О. Леушин⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВОЙСТВ СУПЕРДУПЛЕКСНОЙ И СЕРИЙНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНЫХ ОТЛИВОК КОРПУСОВ АРМАТУРЫ

ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»¹,

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»²,
ООО Научно-производственный центр «Эпсилон»³,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева⁴

Приводятся результаты сравнительных исследований жидкотекучести, стойкости против образования трещин, литейной усадки перспективной супердуплексной стали аустенитно-ферритного класса и серийной аустенитной стали 12X18H12M3TЛ применительно к изготовлению судовой арматуры в условиях отечественного литейного производства взамен приобретаемой по импорту.

Показано, что супер - дуплексная сталь по сравнению с аустенитной сталью имеет несколько большие значения температур ликвидус, солидус и усадки, меньшую жидкотекучесть и существенно меньшую склонность к образованию горячих трещин. Даны технологические рекомендации, изготовлены опытные литые заготовки корпусов судовой арматуры и выполнена оценка их качества. Таким образом, подтверждена возможность организации производства арматуры с применением перспективной стали взамен дорогостоящей арматуры, приобретаемой за границей.

Ключевые слова: супердуплексная сталь, литейные свойства, судовая арматура, коррозионная стойкость, прочность

Введение

Постоянно возрастающие параметры эксплуатации кораблей, морских сооружений, установок ТЭК (силовые нагрузки и агрессивность рабочей среды) предъявляют высокие требования к материалам для изготовления корпусной и регулирующей арматуры [1]. Отечественная судовая и энергетическая арматура с корпусами из бронзы, латуни и титановых сплавов и арматура, приобретаемая в настоящее время по импорту, с корпусами из аустенитной стали 316Ti (стандарт США AISI) отличаются высокой стоимостью, а применение для изготовления корпусов арматуры более дешевой стали типа 08X18H9TЛ (ГОСТ 977) не обеспечивает необходимую стойкость к локальным видам коррозии [2].

Поэтому создание отечественного производства судовой и энергетической арматуры с корпусами и другими деталями из перспективных материалов взамен, арматуры, приобретаемой по импорту, является чрезвычайно актуальной научно-технической задачей.

ОАО ННИИММ «Прометей» ранее были сформулированы [3] следующие основные технические требования к материалам корпусов судовой арматуры: материал должен быть технологичным, экономнолегированным, стойким против коррозии в морской воде и других рабочих средах, иметь комплекс высоких прочностных и пластических свойств.

На основании этих требований была выбрана для исследований высокопрочная азотистая хромоникельмолибденовая супердуплексная сталь аустенито-ферритного класса (далее супердуплексная), повышенной коррозионной стойкости, близкая по составу к сталям 1.4501, S 32760 (ASTM) [4]. Ранее проведенные лабораторные испытания показали, что такая сталь по физико-механическим и коррозионным свойствам отвечает предъявляемым требованиям, благодаря введению азота, а также дуплексной структуре металла (50% аустенита + 50% феррита). Информация о литейных свойствах стали в литературе крайне ограничена.

Из серийных сталей по композиции легирования наиболее близка к выбранной стали широко освоенная промышленностью сталь марки 12Х18Н12М3ТЛ, уступающая новой стали по прочности, коррозионной стойкости и стоимости.

Цель настоящей работы: на основании исследований литейных свойств выбранных материалов выбрать параметры технологии по критериям жидкотекучести, трещиностойкости и усадки металла и разработать технологию изготовления опытных литых заготовок корпусов судовой арматуры.

Методика проведения исследований

Исследования литейных свойств стали включали определение критических температур стали, ее жидкотекучести, трещиностойкости, линейной усадки и относительного объема усадочной раковины.

Выплавку стали для экспериментов проводили в условиях литейного производства ННИИММ «Прометей» на свежих материалах в индукционной печи ИСТ-0,25 повышенной частоты с основной футеровкой. Химический состав металла плавов для исследования литейных свойств соответствовал заданному.

Критические температуры определяли как расчетным путем, так и путем термометрирования затвердевания металла в формах из ХТС.

Расчет проводили по методике [5], основанной на влиянии легирующих элементов на снижение температуры ликвидус (T_L) сплава Fe–C. Согласно методике, при наличии нескольких химических элементов T_L будет снижаться на суммарную величину действия каждого из них. Таким образом, расчетная температура ликвидус определится по формуле

$$T_L = 1539 - \sum(\Delta T_{Li} \cdot [X_i]),$$

где T_L – температура ликвидус сплава; ΔT_{Li} – температура, на которую снижается температура ликвидус при введении в сплав 1% i -го легирующего элемента; $[X_i]$ – концентрация i -го легирующего элемента, выраженная в %.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.

Таблица 1

Коэффициенты влияния содержания легирующих элементов на снижение температуры ликвидуса системы Fe-C

	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	N	V	Cu	Ti
ΔT_{Li}	70	3	12	1,5	3,5	3	30	30	90	2	4,7	18

Температура начала затвердевания железа принята равной 1539°C. При этом принимали, что все остальные критические точки диаграммы Fe–C, в том числе солидус, смещаются вниз по вертикали на такое же количество градусов, что и температура ликвидус, не меняя своего положения по горизонтали.

При определении критических температур сталей путем термометрирования затвердевания металла измерение температуры производили с помощью вольфрам-рениевых термопар. Термопару в расплав погружали сверху и удерживали с помощью штатива. Регистрацию показаний осуществляли с помощью электронного прибора МЕТАКОН.

Определение жидкотекучести сплава производили с помощью спиральных проб по ГОСТ 16438. Проба представляет собой спиральный трапециевидный канал площадью сечения 0,56 см² (основания 8 и 5 мм, высота 8 мм), длиной 1500 мм, стояк, выпор и заливную чашу со стопором. Использование стопора обеспечивало заливку определенной порции расплава во всех пробах. Заливку проб производили из ковша в стержни из ХТС. Длина залитой спирали являлась показателем жидкотекучести при данной температуре.

Определение склонности сталей к трещинообразованию выполняли с помощью тех-

нологических проб «решетка». Проба (рис 1) представляет собой сочетание вертикальных цилиндрических стержней различных диаметров (10, 12, 14, 16, 18 мм), имеющих со стороны заливки общий литниковый канал, а с противоположной – цилиндрические головки, обеспечивающие затрудненную высокотемпературную деформацию кристаллизующегося металла. Место перехода от литникового канала к цилиндрическим стержням провоцировало образование в этой зоне горячих трещин [5].



Рис. 1. Вид образца пробы горячие трещины

Исследовано четыре пробы с общим количеством образцов 20 шт.

Образцы с диаметром цилиндрического стержня до 14 мм с целью «раскрытия» горячих трещин доламывались на разрывной машине ИР-5143-200-11. Образцы диаметром больше 14 мм с целью обнаружения горячих трещин разрезали вдоль оси стержня.

Определение величины линейной усадки производили с помощью пробы длиной 490 мм с сечением 33x33 мм [5]. Расплавленный металл заливался в форму из ХТС через литник расположенный посередине пробы.

Общий вид образца пробы на определение линейной усадки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Образец пробы на линейную усадку



Рис. 3. Общий вид проб для определения объемной усадочной раковины

Определение объемной усадочной раковины. Склонность сталей к образованию усадочных раковин определяли с помощью конусной пробы путем измерения относительно объема концентрированной усадочной раковины.

Образец для определения объемной усадочной раковины представляет собой конус высотой 120 мм, диаметром 36 мм и 100 мм. Образцы для измерений получали путем заливки металла в сухие формы из ХТС, теплоизолированные сверху стержнем из песчано-масляной смеси с древесными опилками. Ровную поверхность верхнего торца пробы обеспечивал кольцевой холодильник толщиной 6 мм, установленный вокруг стержня.

Вид проб для определения объемной усадочной раковины представлен на рис. 3.

После заливки образцов при различной температуре проводили прямые измерения объема усадочных раковин и рассчитывали их относительную величину. Определение объема усадочных раковин проводили путем измерения расхода керосина на их заполнение.

Образцы пробы были разрезаны для осмотра формирования усадочной раковины.

Расчетное и экспериментальное определение температур ликвидус и солидус сталей

В результате выполненных расчетов установлено, что в зависимости от химического состава стали интервал изменения T_L составляет для супердуплексной стали 1455 – 1428⁰С, для стали 12Х18Н12М3ТЛ 1452 – 1412⁰С, среднее значение температуры T_L составляет у супердуплексной стали 1442⁰С, у стали 12Х18Н12М3ТЛ 1432⁰С.

Экспериментальное определение критических температур показало, что для супердуплексной стали – $T_L = 1450^0\text{C}$, для стали 12Х18Н12М3ТЛ – $T_L = 1445^0\text{C}$.

С учетом многолетнего опыта производства стальных отливок из нержавеющей аустенитных сталей, содержащих легирующие элементы, способствующие пленообразованию, температуру заливки опытных отливок приняли на 100⁰ выше, чем T_L .

Расчетную температуру солидус принимали: для супердуплексной стали среднее значение $T_S = 1398^0\text{C}$; для стали 12Х18Н12М3ТЛ среднее значение $T_S = 1361^0\text{C}$.

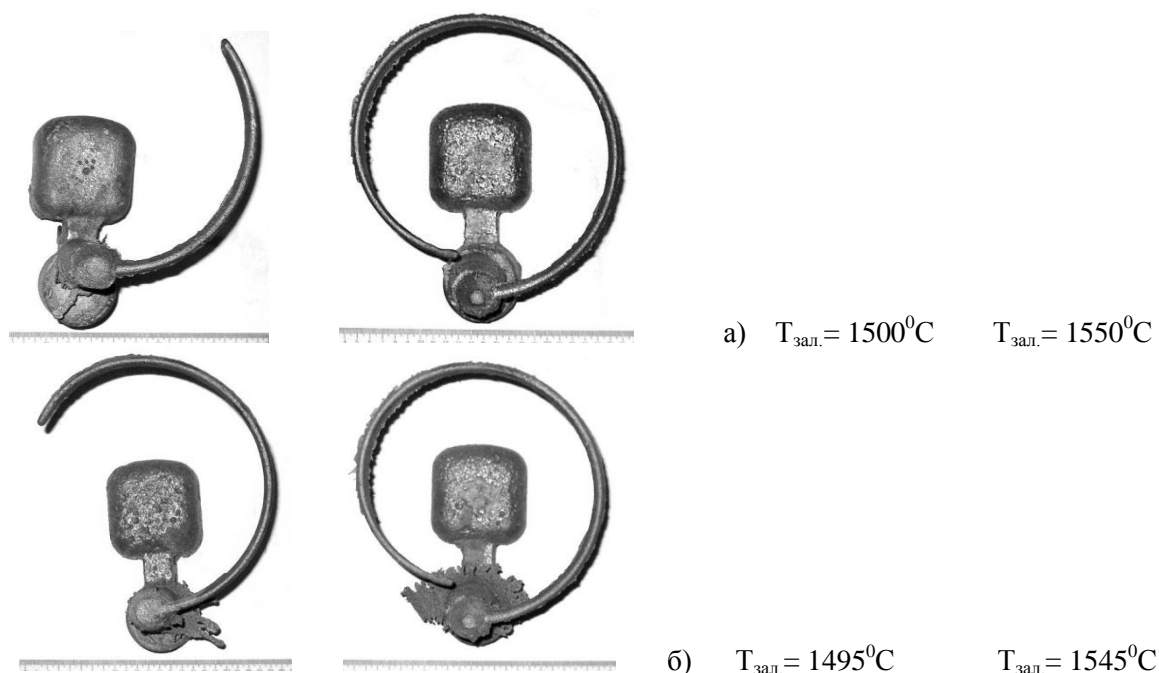


Рис. 4. Вид образцов пробы при определении жидкотекучести стали:
а – сталь супердуплексная; *б* – сталь 12Х18Н12М3ТЛ

Результаты определения жидкотекучести металла. Вид образцов пробы при определении жидкотекучести стали представлен на рис. 4. Результаты определения жидкотекучести металла в зависимости от температуры заливки и величины перегрева 50 и 100⁰С над температурой ликвидус приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные по влиянию температуры заливки на длину спирали

Марка стали	Супер-дуплексная сталь		Сталь 12Х18Н12М3ТЛ	
	$T_{\text{зал.}}, ^\circ\text{C}$	1500	1550	1495	1545
Температура перегрева над линией ликвидус, $^\circ\text{C}$	50	100	50	100
Длина спирали, мм	295	630	460	650

Из табл. 2 видно, что при температурах заливки металла в форму (температура перегрева над температурой ликвидус 100⁰С и 50⁰С) величина жидкотекучести супердуплексной стали меньше в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ.

Результаты определения склонности стали к трещинообразованию

При внешнем осмотре поверхности образцов из супердуплексной стали после разрыва на разрывной машине ИР-5143-200-11 и разрезки трещин не обнаружено. В результате осмотра образцов из стали марки 12Х18Н12М3ТЛ после разрыва и разрезки обнаружено восемь отдельных горячих трещины в местах затрудненной усадки.

Фотографии изломов образцов из стали 12Х18Н12М3ТЛ представлены на рис. 5.



Рис. 5. Горячие трещины в образцах диаметром 10 и 12 мм из стали марки 12Х18Н12М3ТЛ

Относительную трещиностойчивость сталей можно определить как соотношение количества образцов без трещин к общему количеству образцов. В результате расчета установлено, что относительная трещиностойчивость у аустенитной стали в 2,5 раза ниже, чем у супердуплексной стали.

По результатам определения трещиностойкости можно сделать вывод, что супердуплексная сталь не склонна, а сталь 12Х18Н12М3ТЛ склонна к образованию горячих трещин.

Полученные данные не противоречат общепринятым представлениям, так как из тео-

рии и практики известно, что двухфазные аустенитно-ферритные стали менее подвержены образованию горячих трещин, чем однофазные аустенитные. Следовательно, выбранная проба позволяет определять склонность сталей к образованию горячих трещин.

Результаты определения линейной усадки металла приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения линейной усадки металла (%)

№ образца	Супердуплексная сталь	Сталь 12X18H12M3T
1	2,4	2,0
2	2,2	2,1
3	2,5	2,1
Средние значения	2,4	2,1

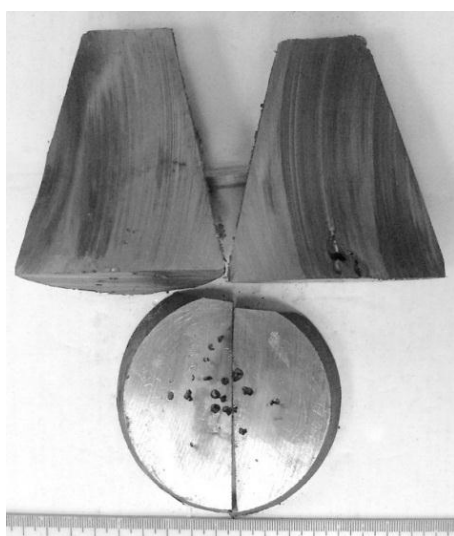


Рис. 6. Вид усадочных раковин в образце пробы из супердуплексной стали

Как следует из приведенных данных, линейная усадка супердуплексной стали заметно больше, чем у аустенитной стали 12X18H12M3TЛ, что необходимо учитывать при разработке литейной технологии.

Результаты определения объемной усадочной раковины

Установлено, что при температуре заливки супердуплексной стали, близкой к температуре ликвидус, концентрированная усадочная раковина отсутствует, возникает усадочная пористость (рис. 6). Глубина залегания пористости по высоте пробы ~ (30 – 46)%.

В образцах проб из стали 12X18H12M3TЛ наблюдаются усадочные раковины открытого типа (рис. 7). Глубина залегания усадочных раковин по высоте пробы 20–38%.

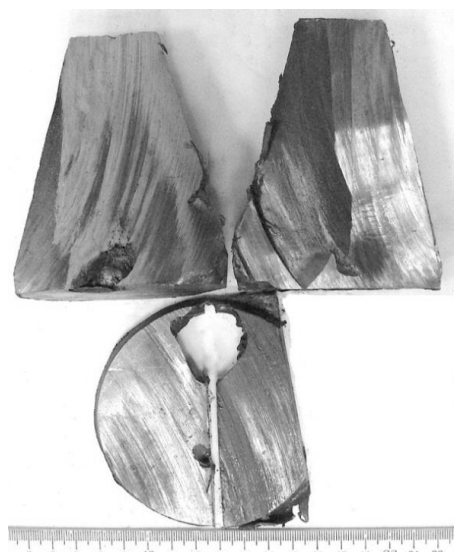


Рис. 7. Вид усадочных раковин в образцах проб из стали 12Х18Н12М3ТЛ

В табл. 4 представлены результаты измерения усадочных раковин, полученных при различных температурах металла.

Таблица 4**Влияние температуры металла на объем усадочной раковины $V_{ус}$**

Марка стали	Супердуплексная сталь			Сталь 12Х18Н12М3ТЛ		
	1450	1480	1513	1431	1460	1500
$T, ^\circ\text{C}$	1450	1480	1513	1431	1460	1500
$V_{ус}, \%$	1,92	2,32	2,70	1,72	1,93	2,20

Относительный объем усадочной раковины супердуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ больше на 8% при температуре заливки 1450°C и на 17% при температуре заливки 1500°C .

Технологические рекомендации и указания

На основании сравнения литейных свойств исследуемых сталей рекомендуется при разработке технологических процессов изготовления отливок предусматривать следующее:

- увеличенный радиус галтелей во внутренних углах и литейные ребра жесткости, особенно для стали марки 12Х18Н12М3ТЛ, т.к. эта сталь обладает пониженной трещиностойкостью;
- температуру металла в процессе плавки не выше 1650°C , а перед выпуском – не выше 1600°C ;
- увеличенную высоту прибылей на отливках из супердуплексной стали на 8 – 10% по сравнению с прибылями на отливках из стали 12Х18Н12М3ТЛ;
- температуру заливки стали в зависимости от толщины стенки и массы отливки выбирать в диапазоне $1540\text{--}1560^\circ\text{C}$ для супердуплексной стали, $1530\text{--}1550^\circ\text{C}$ для стали 12Х18Н12М3ТЛ.

Разработаны технологические указания на выплавку супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ в индукционных печах и отливку заготовок в песчаные формы, которые содержат требования по химическому составу выплавляемых сталей, к исходным шихтовым материалам, ферросплавам и шлакообразующим, к порядку ведения плавки, к выпуску и разливке стали.

Внедрение разработанной технологии

Изготовлены в соответствии с разработанными технологическими указаниями опытные литые заготовки–представители судовой арматуры из супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ для стендовых испытаний и выполнена оценка качества металла.

Внешний осмотр не выявил на поверхности металла недопустимых дефектов.

При гидравлических испытаниях корпусов на давление 40 кгс/см^2 протечек не обнаружено.

Термическая обработка заготовок корпусов судовой арматуры была проведена по ГОСТ 977. Супердуплексную сталь термически обрабатывали по режимам стали 12Х18Н9ТЛ.

Выполнена оценка механических свойств металла проб на растяжение по ГОСТ 1497 и на ударный изгиб по ГОСТ 9454 после термической обработки показала, что механические свойства металла соответствуют требованиям, предъявляемым к литой стали для изделий судовой арматуры.

Вид заготовок корпусов арматуры представлен на рис. 8.

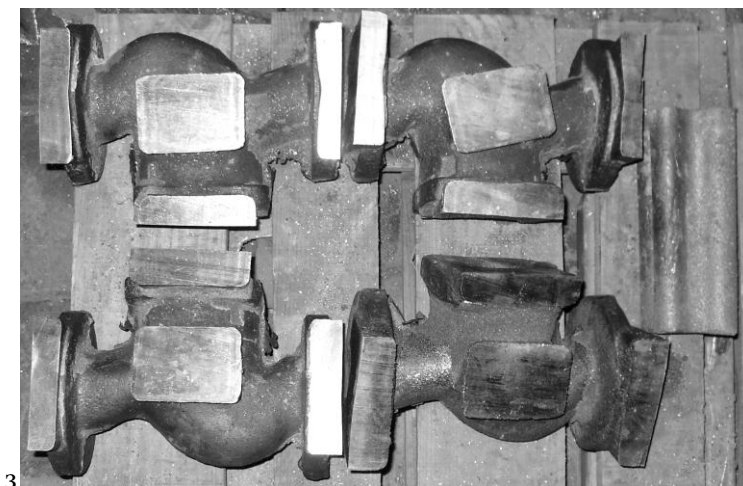


Рис. 8. Заготовки корпусов арматуры

Выводы

По литейным свойствам исследованные стали отличаются друг от друга следующим образом:

1. Большие значения температуры ликвидус T_L 1450⁰С и солидус T_S 1398⁰С (расчет) соответствуют супер - дуплексной стали, меньшие – $T_L = 1445^0$ С, $T_S = 1361^0$ С (расчет) у стали 12Х18Н12М3ТЛ.

2. При температуре заливки металла в форму с перегревом над T_L на 50⁰С величина жидкотекучести дуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ существенно меньше.

3. Супердуплексная сталь более стойкая к образованию горячих трещин, чем сталь марки 12Х18Н12М3ТЛ.

4. Линейная усадка супердуплексной стали составила 2,2–2,5%, стали 12Х18Н12М3ТЛ 2, – 2,1%;

5. Относительный объем усадочной раковины супердуплексной стали в сравнении со сталью марки 12Х18Н12М3ТЛ больше на 8% при температуре заливки 1450⁰С и на 17% при температуре заливки 1500⁰С.

6. Разработана технология на выплавку супердуплексной стали и стали 12Х18Н12М3ТЛ в индукционных печах и отливку. Технология внедрена при изготовлении опытных литых заготовок корпусов судовой арматуры из этих сталей для стендовых испытаний.

Библиографический список

1. **Калинин, Г.Ю.** Исследования структуры и свойств высокопрочной азотистой стали 04Х20Н6Г11М2АФБ / Г.Ю. Калинин [и др.]. // Вопросы материаловедения, 2006. №1(45). С. 45–59.
2. **Приданцев, М.В.** Высокопрочные аустенитные стали / М.В. Приданцев [и др.]. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
3. Научно-технический отчет ОАО ННИИММ «Прометей». 1994.
4. Сайт компании (США) Swagelok.com.
5. **Грузных, И.В.** Литейные свойства сталей и повышение качества отливок / И.В. Грузных, Г.П. Кочкарева. – Ленинград: ЛДНГП, 1975. – 24 с.

Дата поступления
в редакцию 16.04.2015

**N. Tumakova¹, V. Tikhonov¹, A. Smirnov¹, S. Samokhvalov¹, A. Bolshakov²,
V. Nazarov³, I. Leushin⁴**

**RESEARCH CASTING PROPERTIES OF SUPER DUPLEX AND SERIAL
AUSTENITIC STEEL, TECHNOLOGY
DEVELOPMENT AND MANUFACTURING OF CASTINGS, VALVE BODIES**

JSC Nizhny Novgorod scientific research Institute of machine-building materials "Prometey",
Nizhny Novgorod¹,

JSC "Experimental design Bureau of machine building them. I. I. Afrikantov", Nizhny Novgorod²,
LLC Scientific-production center "Epsilon", Nizhny Novgorod³,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev⁴

The results of comparative studies of fluidity, resistance to cracking, mold shrinkage promising super - duplex steels austenitic - ferritic class and series austenitic steel 12X18H12M3TЛ in relation to the development of manufacturing technology of ship fittings in the domestic foundry acquired in exchange for imports . It is shown that super - duplex steel in comparison with austenitic steel has several large values of temperatures of liquidus, solidus and shrinkage, less fluidity and significantly less prone to hot cracking. Given technological recommendations made by experienced cast billet housings ship fittings and evaluated their quality . Thus, confirmed the possibility of producing valves with application of advanced steel instead of expensive fittings to be purchased abroad.

Key words: super - duplex steel, casting properties, ship fittings, corrosion resistance, durability.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК. 539.3

В.Я. Козлов¹, А.Н. Паутов², И.Н. Толкачев³

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОЙ КВАДРАТНОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОДКРЕПЛЕННЫМ ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ВЫРЕЗОМ

Вятский государственный технический университет¹,
НИИ Механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Рассматривается задача определения критической нагрузки для пластинки с эллиптическим вырезом, подкрепленным по краю ребром. Задача решается методом конечных элементов. Приводятся результаты расчетов для различных вариантов нагружения и параметров ребра и выреза.

Ключевые слова: устойчивость, метод конечных элементов, эллиптический вырез, пластина, ребро.

Одной из задач плоской теории упругости является анализ деформированного состояния пластин, имеющих вырезы, т.е. поверхность пластины представляет собой неодносвязную область. Под действием приложенной к границам области сил (если силы достаточно велики) пластина может потерять устойчивость, т.е. перестанет сохранять свою плоскую форму (образуется вспучивание).

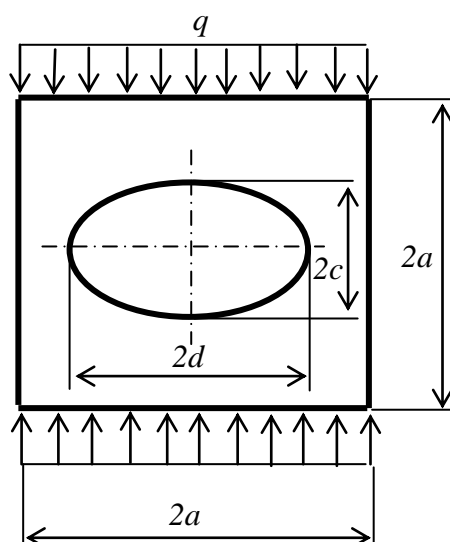


Рис. 1

Задача усложняется, если вырезы подкрепляются по краю ребрами. Ребро также может изменить свою первоначальную форму: может получить прогибы, а также закручивание.

В данной работе рассматривается квадратная пластина с центральным эллиптическим вырезом, подкрепленным ребром прямоугольного поперечного сечения (рис. 1). Пластина шарнирно оперта по наружному контуру и сжата в одном направлении равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q .

Под действием контурной нагрузки, задаваемой параметром q , пластина испытывает плоское напряженное состояние так, что при некоторых значениях нагрузки возможна потеря устойчивости ее плоской формы равновесия.

Принимаются обычные допущения теории тонких жестких пластин. Предполагается также, что:

- 1) пластина соприкасается с ребром по контуру его оси;
- 2) ребро рассматривается как тонкий криволинейный стержень, обладающий жесткостью на растяжение-сжатие, кручение и изгиб в двух плоскостях;
- 3) напряженно-деформированное состояние ребра определяется в рамках кинематической гипотезы Кирхгофа-Клебша.

При определении докритического (плоского напряженно-деформированного) состояния для пластины используется треугольный конечный элемент с шестью степенями свободы, подкрепляющее ребро аппроксимируется совокупностью балочных элементов [1]. Узловые точки элементов подкрепления совпадают с узловыми точками треугольных элементов пластины.

В задаче устойчивости для пластины используется треугольный конечный элемент с постоянными моментами [2]. За узловые неизвестные принимаются значения функции прогиба в вершинах и нормальные углы поворота в средних точках сторон треугольника. Для прямолинейного элемента ребра вдоль оси элемента принимается кубический закон изменения прогибов и кусочно-линейный закон изменения углов закручивания [3].

В результате задача устойчивости приводится к обобщенной проблеме собственных значений для системы линейных алгебраических уравнений:

$$[K_u]\{\bar{x}\} - \lambda[K_y]\{\bar{x}\} = 0,$$

где $[K_u]$ – матрица жесткости изгибаемой пластины с учетом жесткостных характеристик ребер;

$[K_y]$ – матрица устойчивости;

$\{\bar{x}\}$ – вектор узловых перемещений.

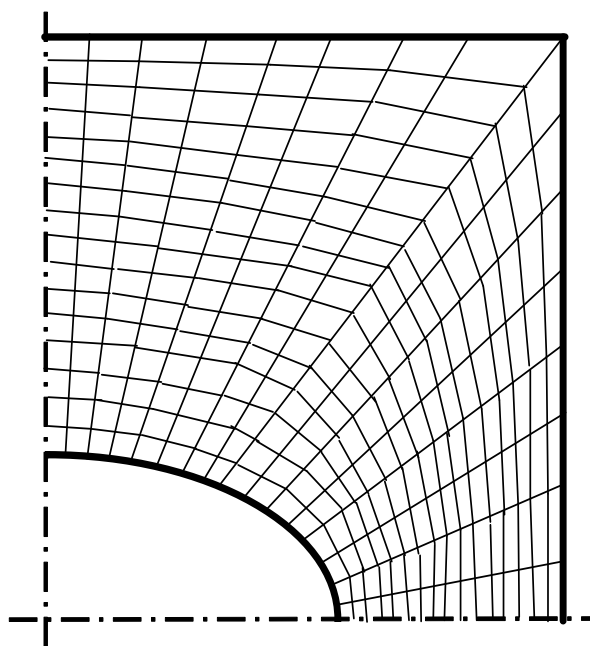


Рис. 2

Для решения обобщенной проблемы собственных значений предложен ряд алгоритмов как прямых, так и итерационных [4, 5]. В данной работе, в целях построения единой вычислительной схемы в плоской задаче и задаче устойчивости, для нахождения наименьшего критического значения параметра внешней нагрузки $\min \lambda_{кр}$ используется пошаговый процесс, заключающийся в последовательном вычислении значения определителя $\det/[K_u] - \lambda[K_y]$ при заданных значениях λ до смены знака и последующего уточнения значения $\min \lambda_{кр}$ по методу хорд. Компоненты собственного вектора, соответствующего значению $\min \lambda_{кр}$ и характеризующего форму потери устойчивости, определяются обратным ходом матричной прогонки [6]. В целях уменьшения объема входной информации и получения решений задач с большим числом степеней свободы реализуется алгоритм подструктур (суперэлементов) [7].

Ввиду симметрии расчетной схемы рассматривается четверть подкрепленной пластины с сеткой элементов 16×16 (рис. 2).

Модуль упругости материала пластины и ребра $E=1,96 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. Для случая кругового выреза (при $c/d=1$) на рис. 3 приведены зависимости относительной критической нагрузки $\bar{q} = q/q_0$ (q – критическая нагрузка для пластины с вырезом, q_0 – для сплошной пластины) от отношения диаметра выреза к стороне пластины при различных значениях площади поперечного сечения ребра f : кривая 1 соответствует значению $f=0$, кривая 2 – значению $f=0,5$, кривая 3 – значению $f=1,0$.

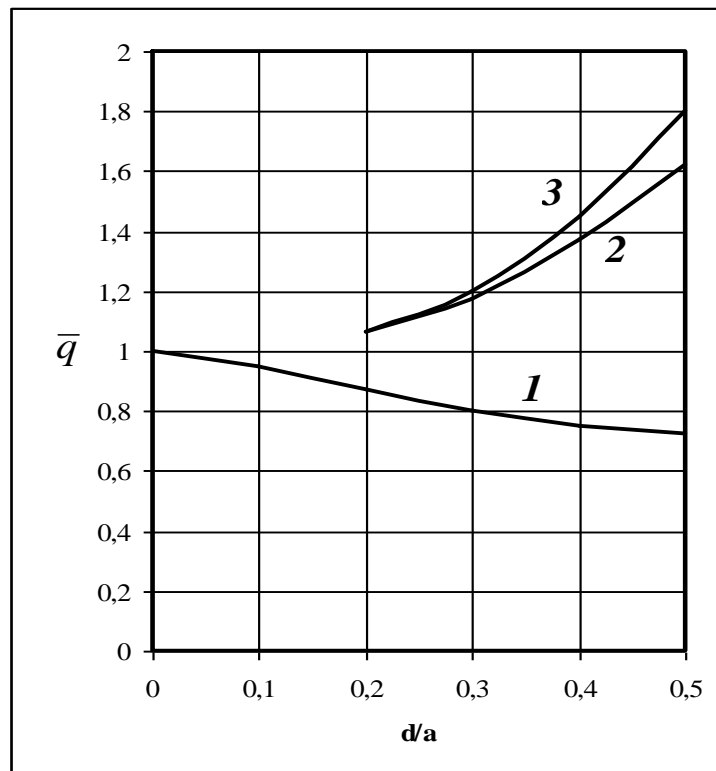


Рис. 3

Зависимости относительной критической нагрузки от отношения малой и большой полуосей эллипса при $f=0,5$ показаны на рис. 4. Расчеты выполнены для двух вариантов нагрузок (кривые 1 и 3 соответствуют равномерному сжатию вдоль малой оси эллипса, кривые 2 и 4 – вдоль большой оси) и двух значений площади поперечного сечения ребра: $f=0$ (кривые 1 и 2), $f=1$ (кривые 3 и 4).

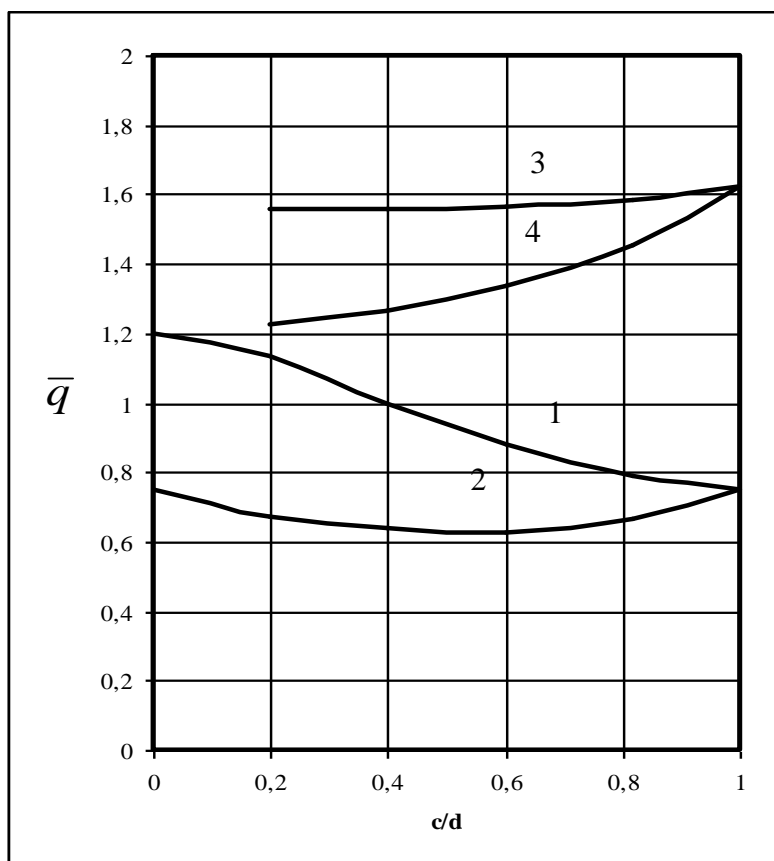


Рис. 4

Из анализа полученных результатов видно, что, как и следовало ожидать, ребро повышает критическую нагрузку, в известной степени компенсируя наличие выреза. Результаты расчетов получены в относительных единицах и могут быть использованы при анализе подобных элементов конструкций в различных областях машиностроения.

Библиографический список

1. Козлов, В. Я. Исследование плоского поля напряжений пластин с подкрепленными отверстиями методом конечных элементов // Прикладные проблемы прочности и пластичности: сб. – Горький, ГГУ. 1976. Вып. 2. С. 134–137.
2. Morley, L. S. D. The constant moment plate-bending element // The Journal of Strain Analysis. N 1, 1971. V. 6. P. 20–24.
3. Козлов, В. Я. К решению задачи устойчивости пластин с ребрами жесткости на основе треугольных конечных элементов с постоянными моментами / В.Я. Козлов, А.Н. Паутов // Прикладные проблемы прочности и пластичности: сб. – Горький: ГГУ, 1975. Вып. 2. С. 128–133.
4. Волынский, М. И. Алгоритм итерационного поиска собственных значений в задачах устойчивости упругих систем // Строительная механика и расчет сооружений. 1978. № 3. С. 44–48.
5. Фадеев, Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фадеев, В. Н. Фадеева // Записки научных семинаров ЛОМИ. – Л.: Наука, 1975. Т. 54. С. 3–228.
6. Годунов, С. К. Введение в теорию разностных схем / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – М.: ФМ, 1962. – 340 с.
7. Williams, F. W. Comparison between sparse stiffness matrix and sub – structure methods // Inf. J. Num. Meth. Engng. 1973. V. 5. N 3. P. 383–394.

V.J. Kozlov¹, A.N. Pautov², I.N. Tolkachev¹

**THE STUDY OF THE STABILITY OF THE ELASTIC SQUARE PLATE WITH
SUPPORTED ELLIPTIC CUTOUT**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State University»¹,
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod²,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev³

Purpose: The stability problem of a deformed flat plate with cutout is investigated.

Design/methodology/approach: The finite elements method is used for the solving of this problem.

Findings: The effective calculation method of the flat plates with cutouts is proposed.

Research limitations/implications: There are some unresolved questions concerning the effects in the plastic theory.

Originality/value: The results can be used in the design of mechanical engineering.

Key words: stability, finite element method, elliptical, cutout, plate, edge.

УДК 517.587

В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева, В.И. Сухов

ОРТОГОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МНОГОЧЛЕНОВ С ВЕСОМ $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Строится система ортогональных многочленов на интервале $(-\infty, +\infty)$ с весом $\varphi(x) = \frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$. Находятся производящая функция, рекуррентные соотношения. Указывается связь с непрерывными дробями.

Ключевые слова: вес, ортогональность, рекуррентное соотношение, непрерывная дробь

Настоящая статья, по существу, представляет одно целое с [1], где без доказательств были приведены сведения об ортогональных многочленах для веса $1/\operatorname{ch} \pi x$. Эти доказательства проводятся аналогично тому, как проделывается ниже для вводимых многочленов. Если многочлены из [1] имеют отношение к математической статистике, более точно к вероятностному распределению Коши, то мотивированием введения новых многочленов служит факт выражаемости через степени числа π сумм рядов $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{2k}}$ и $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{(2n-1)^{2k-1}}$ при $k=1, 2, \dots$

1. Приведем необходимые для дальнейшего сведения из общей теории ортогональных многочленов ([2], [3]).

Последовательность многочленов $P_0(x), P_1(x), \dots, P_n(x), \dots$, где P_n имеет степень n , ортогональна на интервале $[a, b]$ с весом $\varphi(x) > 0$, если

$$\int_a^b P_n(x) P_m(x) \varphi(x) dx = 0, \text{ при } n \neq m. \quad (1)$$

Существуют два подхода к изучению ортогональных многочленов. Один из них использует известный процесс ортогонализации Грама-Шмидта. С его помощью легко доказывается, что многочлены $P_n(x)$ определяется с точностью до числовых множителей. В частности, если потребовать равенства 1 старшего коэффициента у $P_n(x)$, то последний определяется однозначно.

Второй подход, применявшийся математиками петербургской школы (19 век), использует разложение в непрерывную дробь

$$\int_a^b \frac{\varphi(t) dt}{x-t} = \frac{b_0}{x-a_0} - \frac{b_1}{x-a_1} - \frac{b_2}{x-a_2} - \dots \quad (2)$$

Знаменатели подходящих дробей в этом разложении дают нужную систему ортогональных многочленов. В этом подходе устанавливается наличие рекуррентного соотношения вида

$$P_{n+1} = (x - a_n) P_n - b_n P_{n-1}. \quad (3)$$

Оба подхода в общем случае не позволяют дать явные выражения соответствующих формул и при построении конкретных систем (например, классических систем Лежандра, Чебышева, Эрмита и др.) приходится применять различные искусственные приемы.

2. В системе, которая изучается в этой статье $\varphi(x) = \frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$, а интервал интегрирования

в (1) есть $(-\infty, +\infty)$. Старший коэффициент в P_n фиксируем, полагая его равным 1.

Предложение 1. $P_n(-x) = (-1)^n P_n(x)$, т.е. $P_n(x)$ – четная функция при четном n и нечетная при n нечетном. Рекуррентное соотношение (3) превращается в

$$P_{n+1} = xP_n - b_n P_{n-1}. \tag{4}$$

Для доказательства надо сделать замену $x \rightarrow -x$ в (1) и воспользоваться четностью $\varphi(x)$. То же надо проделать в (3).

Эффективное использование процесса Грама-Шмидта требует вычисления скалярных произведений

$$(f, q) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)q(x)\varphi(x)dx \tag{5}$$

для степенных функций f и q , т.е. вычисления моментов

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k \varphi(x) dx. \tag{6}$$

Эти вычисления можно провести двумя способами. Один из них основывается на формуле ([4]) $\int_0^{\infty} \frac{\sin xt}{\operatorname{sh} \frac{\pi t}{2}} dt = \operatorname{th} x$, где $\sin xt$ и $\operatorname{th} x$ следует разложить в степенные ряды. Тогда M_k при четном k выражается через коэффициенты разложения $\operatorname{th} x$ и оказывается рациональным числом. При нечетном k M_k , очевидно, равен нулю. Связь M_k с рядами Дирихле, указанными ранее такова:

$$M_k = 2 \int_0^{\infty} \frac{x^{k+1} dx}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}} = 2 \int_0^{\infty} x^{k+1} \left(e^{-\frac{\pi x}{2}} + e^{-\frac{3\pi x}{2}} + e^{-\frac{5\pi x}{2}} + \dots \right) = \frac{2}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^{k+2}} \left(1 + \frac{1}{3^{k+2}} + \frac{1}{5^{k+2}} + \dots \right)$$

для четного k .

Значения нескольких первых моментов таковы:

$$M_0 = 2, M_2 = 4, M_4 = 32, M_6 = 544.$$

Их значения и процесс ортогонализации позволяет найти несколько первых многочленов (табл. 1). В равенстве (4) оказывается, что $b_1 = 2, b_2 = 6, b_3 = 12, b_4 = 20$. Это наводит на предположение, что $b_n = n(n+1)$ для произвольного n . Мы утверждаем, что это предположение истинно, т.е. имеет место.

Предложение 2. Многочлены $S_0(x), S_1(x), \dots, S_n(x), \dots$, удовлетворяющие условиям:

- 1) $S_{n+1} = xS_n - n(n+1)S_{n-1}$;
- 2) старший коэффициент S_n равен 1;

3) $S_0 = 1, S_1 = x,$

совпадают с многочленами $P_0, P_1, \dots, P_n, \dots$

Предварительно докажем.

Предложение 3. Имеет место тождество

$$\frac{e^{x \operatorname{arctg} t}}{1+t^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{S_n(x)}{n!} t^n. \tag{7}$$

Доказательство. Из рекуррентного соотношения для $S_n(x)$ следует

$$\sum_1^{\infty} S_{n+1} \frac{t^n}{n!} = x \sum_1^{\infty} S_n \frac{t^n}{n!} - \sum_1^{\infty} \frac{n(n+1)}{n!} S_{n-1} t^n. \tag{8}$$

Если обозначить правую часть в (7) через $V = V(t)$, то (8) переписывается как

$$V' - x = x(V - 1) - (t^2 V)'$$

или

$$(1+t^2)V' = (x-2t)V.$$

Интегрирование этого уравнения при начальном условии $V|_{t=0} = 1$ дает нужный результат, т.е. равенство (7). Левую часть в (7) принято называть производящей функцией многочленов $S_n(x)$.

Теперь, чтобы доказать предложение 2 достаточно установить ортогональность системы $\{S_n\}$.

Из (7) находим $\frac{S_n(x)}{n!} = \frac{1}{2\pi i} \oint \frac{e^{x \operatorname{arctg} t}}{1+t^2} \frac{dt}{t^{n+1}}$, где интегрирование ведется по достаточно малому контуру, охватывающему начало координат. Поэтому

$$\left(\frac{S_n(x)}{n!}, \frac{S_m(x)}{m!} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(2\pi i)^2} \oint \oint \frac{x \operatorname{arctg} t}{1+t^2} \cdot \frac{e^{x \operatorname{arctg} s}}{1+s^2} \varphi(x) dx dt ds. \tag{9}$$

Интегрирование по x внутри контурных интегралов выполняется с помощью формулы из [4]: $\int_0^{\infty} \frac{\operatorname{sh} px}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}} dx = \operatorname{tg} p$, которую следует продифференцировать по p .

Тогда

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{x(\operatorname{arctg} t + \operatorname{arctg} s)} \varphi(x) dx = 2 \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(x(\operatorname{arctg} t + \operatorname{arctg} s))}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}} x dx = 2 \frac{(1+t^2)(1+s^2)}{(1-ts)^2}$$

и

$$\left(\frac{S_n}{n!}, \frac{S_m}{m!} \right) = 2 \oint \oint \frac{(1-ts)^{-2}}{t^{n+1} s^{m+1}} dt ds \frac{1}{(2m)^2}$$

равно удвоенному коэффициенту при $t^n s^m$ в разложении $(1-ts)^{-2} = 1 + 2ts + 3(ts)^2 + 4(ts)^3 + \dots$. Очевидно, что этот коэффициент равен нулю при $n \neq m$ и S_n и S_m ортогональны. Предложение 2 доказано.

Отметим, что при $n = m$ коэффициент равен $2(n+1)$, а $\|S_n\|^2 = (S_n, S_n) = 2(n+1)n!^2$.

Остановимся еще на разложении в непрерывную дробь. Для введенной системы многочленов (2) переписывается как

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x-t} \cdot \frac{xdx}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}} = \frac{2}{x} - \frac{1 \cdot 2}{x^3} + \frac{2 \cdot 3}{x^5} - \frac{3 \cdot 4}{x^7} + \dots$$

Левую часть можно преобразовать с помощью вычетов, и она оказывается равной

$$8 \sum_1^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{xn}{x^2 + (2n)^2} = \frac{M_0}{x} + \frac{M_2}{x^3} + \frac{M_4}{x^5} + \dots \tag{10}$$

Разложение (9) понимается в формально-алгебраическом смысле. Вопрос об области сходимости непрерывной дроби здесь не рассматривается.

Сформулируем одну задачу, связанную с введенными многочленами, а также с многочленами из [1]. Известно, что классические ортогональные многочлены удовлетворяют дифференциальным уравнениям 2-го порядка. Этот факт означает, что эти многочлены являются собственными функциями дифференциального (и даже эрмитова) оператора.

Возникает вопрос: нельзя ли найти подходящий оператор для наших многочленов? В такой формулировке ответ тривиален. Надо задать последовательность действительных чисел $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \dots$ и положить $L(P_n) = \lambda_n P_n$. Далее действие L распространяется на функции, разлагаемые в ряды по системе $\{P_n\}$.

Однако гораздо интереснее искать операторы, например, в базисе $1, x, x^2, \dots$. По-видимому дифференциальным оператором L быть не может, но, возможно, имеются различные интегральные операторы типа Вольтерра или Фредгольма.

Таблица 1

n	$P_n(x)$
0	1
1	x
2	$x^2 - 2$
3	$x^3 - 8x$
4	$x^4 - 20x^2 + 24$
5	$x^5 - 40x^3 + 184x$
6	$x^6 - 70x^4 + 784x^2 - 720$
7	$x^7 - 112x^5 + 2464x^3 - 8448x$
8	$x^8 - 168x^6 + 6384x^4 - 52352x^2 + 40320$
9	$x^9 - 240x^7 + 14448x^5 - 229760x^3 + 648576x$
10	$x^{10} - 330x^8 + 29568x^6 - 804320x^4 + 536025x^2 - 3628800$
11	$x^{11} - 440x^9 + 55968x^7 - 2393600x^5 + 30633856x^3 - 74972160x$
12	$x^{12} - 572x^{10} + 99528x^8 - 6296576x^6 + 136804096x^4 - 782525952x^2 + 479001600$

Библиографический список

1. **Galkin, V.M.** Orthogonal polynomials associating with Cauchy distribution / V.M. Galkin, L.N. Erofeeva, S.V. Lescheva // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2014: материалы межд. научно-практической конференции, сборник научных трудов SWorld, Вып. 3(36). Т. 2. С. 83–85, Одесса: С.В. Куприенко. 2014.

2. Серё, Г. Ортогональные многочлены / Г. Серё. – М., 1962.
3. Чебышев, П.Л. Избранные математические труды / П.Л. Чебышев. – М.–Л., 1946.
4. Рыжик, И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.М. Рыжик, И.С. Градштейн. – М.–Л., 1951.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2015*

V.V. Anikovskiy, L.N. Erofeeva, S.V. Leshcheva

THE ORTHOGONAL POLYNOMIALS SYSTEM WITH THE WEIGHT $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$

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

Purpose: The construction of new orthogonal polynomials system is given. These polynomials are associated with some questions from mathematical statistics.

Design/methodology/approach: The recurrence relation is reconstructed that permit to apply the function theory methods.

Findings: The explicit expressions of the analogues of the classical formulas are derived.

Research limitation/ implications: There are some unresolved questions.

Originality/value: The connections with L -functions are founded.

Key words: Weight, orthogonality, recurrence, relation, continued fraction.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 330.332.21

Е.А. Дубик, Л.Н. Басова

ИНВЕСТИЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКЕ РОССИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье с помощью анализа инвестиций в основной капитал за период с 2008–2013 гг. выделены факторы позитивного изменения инвестиционной деятельности России и рассмотрены пути дальнейшего развития инвестиционной деятельности в условиях инновационной экономики страны.

Ключевые слова: инвестиционная деятельность, инвестиции в основной капитал, промышленные инвестиции, человеческий капитал, инновационный сценарий развития.

Введение

Согласно Концепции долгосрочного социально-экономического развития страны до 2020 года, инновационное формирование российской экономики основано на высоких темпах роста инвестиций в основной капитал и обновления основных фондов. По прогнозным данным, «в 2008–2020 годах среднегодовой прирост объемов инвестиций в основной капитал составит 11%. В результате объем инвестиций в основной капитал возрастет к 2020 г. в четыре раза по сравнению с уровнем 2007 г. (при норме накопления основного капитала 32–35 % валового внутреннего продукта)» [1].

Анализ динамики макроэкономических показателей с 2008–2013 гг. показывает, что объем инвестиций в основной капитал увеличился в 1,5 раза, а ВВП – 1,6 раза (табл. 1). Всего, по сравнению с 2008 г., в 2013 г. сумма инвестиций была больше на 4 473 млрд руб. Темпы прироста инвестиций за этот период в среднем составляют 21,1% в год. Доля инвестиций в основной капитал в ВВП на уровне – 20,4% [2]. Экономическое развитие современной России, характеризуется позитивными изменениями инновационной деятельности.

Таблица 1

Макроэкономические показатели, характеризующие инвестиционную деятельность России

Показатели	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
ВВП, млрд руб.	41277	38786	44939	55967	62218	66755
Темпы роста ВВП, %	103,2	93,9	113,7	124,5	111,2	107,3
Инвестиции в основной капитал, млрд руб.	8782	7976	9151	11036	12586	13255
Темпы роста инвестиций в основной капитал, %	132,5	90,8	114,7	120,6	114,0	105,3
Инвестиции в основной капитал к ВВП, %	21,3	20,6	20,4	19,7	20,2	19,9
Степень обновления основных фондов, %	4,4	4,1	3,7	4,6	4,8	4,7

Анализ и факторы позитивного изменения инвестиционной деятельности

К позитивным изменениям в инвестиционной деятельности можно отнести:

- усиление инвестирования организациями российской собственностью. По данным Росстата, на долю организаций российской собственности в 2013 г. приходилось 88,7% инвестиций в основной капитал страны, что на 57,6% больше, чем в 2008 г., и основной объем инвестирования осуществлялся организациями частной формы собственности, на их долю приходится – 59,9%;
- увеличение финансирования инвестиций в основной капитал за счет собственных средств предприятий (рис. 1). В 2013 г., по сравнению с 2008 г., доля собственных средств в общем объеме инвестиций выросла на 6,6 %. Соотношение между собственными и привлеченными средствами в структуре инвестиций в основной капитал с 2008–2013 гг. поменялось с 1:1,5 на 1:1,2;
- рост инвестиций в основной капитал за счет федерального бюджета страны. Бюджетные средства всех уровней в 2013 г. составили 19% от общего объема инвестиций в основной капитал, доля федерального бюджета увеличилась с 8 (2008 г.) до 10% (2013 г.), доля бюджетов субъектов Российской Федерации уменьшилась с 11,3 до 7,5%. В 2012 г. из общего объема федеральных бюджетных инвестиций 65% приходилось на реализацию более 40 федеральных целевых программ, которые направлены на развитие социальной сферы, системы жизнеобеспечения и инфраструктуры, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, промышленного и агропромышленного комплекса регионов Российской Федерации. Наибольший удельный вес в объемах финансирования действующих федеральных целевых программ имеет Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)» (50,7% от общей суммы расходов на федеральные целевые программы за рассматриваемый временной период) [3].

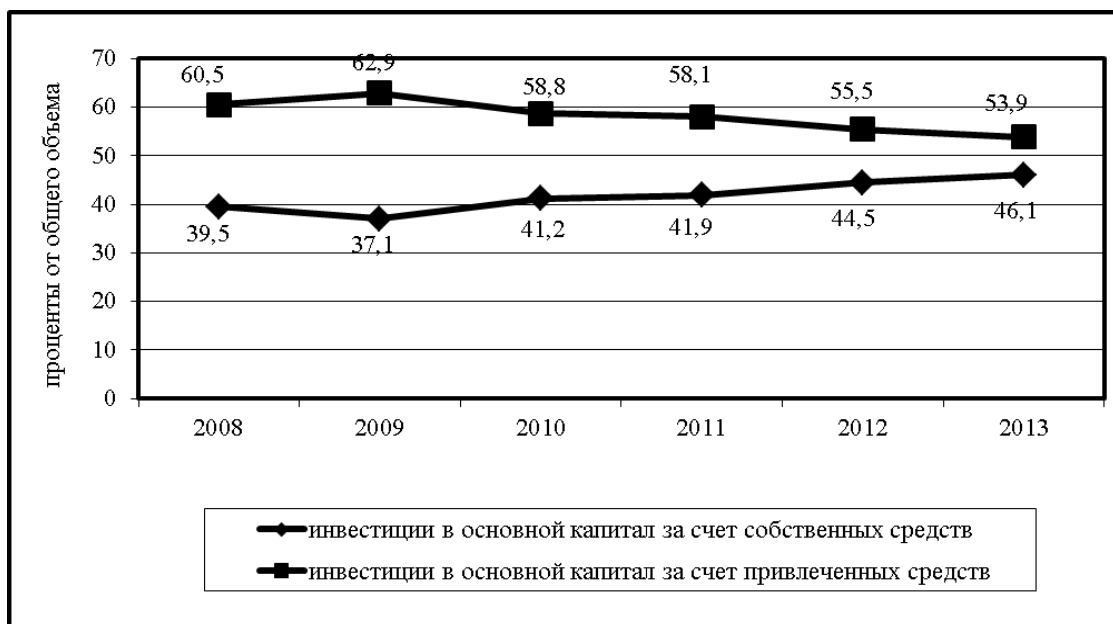


Рис. 1. Инвестиции в основной капитал по источникам финансирования

В 2012 г. на выполнение федеральных целевых программ было использовано 511 млрд руб. за счет всех источников финансирования, на объекты сельского и лесного хозяйства, охоты – 1%, рыболовства и рыбоводство – 0,3%, обрабатывающего производства – 0,7%, производство и распределение электроэнергии, газа и воды – 7,8%, строительства – 2,8%, транспорт и связь – 48,2%, операции с недвижимым имуществом, аренда и предостав-

ление услуг – 7,7%, государственное управление и обеспечение военной безопасности, а также социальное страхование – 9,4%, образование – 6,3%, здравоохранение и предоставление социальных услуг – 8,7%, предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг – 7,8%;

В 2012 г. доля федеральных бюджетных средств в общем объеме инвестиций в основной капитал на территории Центрального федерального округа составила 10,8%, 9,7% – на территории Северо-Западного федерального округа, 13% – Южного федерального округа, 33,3% – Северо-Кавказского федерального округа, 9% – Приволжского федерального округа, 2,4% – Уральского федерального округа, 9,4% – Сибирского федерального округа.

Наибольший объем средств из федерального бюджета в Северо-Кавказском федеральном округе направлен на осуществление федеральных региональных программных мероприятий: «Социально-экономическое развитие Чеченской Республики на 2008–2012 гг.» (17 809,9 млн руб. использовано бюджетных инвестиций за весь период работы программы) и «Социально-экономическое развитие Республики Ингушетия на 2010–2016 гг.» (4 537 млн руб.) для радикального решения проблемы межрегиональной асимметрии;

- инвестиционная активность с 2008–2013 гг. в экономических видах деятельности (табл. 2):

- 1) в сельском хозяйстве, охоте и лесном хозяйстве объем инвестиций в основной капитал возрос на 26,2%;
 - 2) рыболовстве, рыбоводстве – на 179,1%;
 - 3) добыче полезных ископаемых – на 61,9%;
 - 4) обрабатывающем производстве – на 35,9%, наиболее прогрессивные изменения в росте инвестиционной деятельности в производстве кокса и нефтепродуктов – на 236,2%;
 - 5) производстве и распределении электроэнергии, газа и воды – на 78,8%;
 - 6) строительстве – на 19,7%;
 - 7) оптовой и розничной торговле; ремонте автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования – на 85,2%;
 - 8) гостиницах и ресторанах – на 132,5%;
 - 9) транспорте и связи – на 55,2%;
 - 10) финансовой деятельности – на 116,3%;
 - 11) операциях с недвижимым имуществом, аренды и предоставления услуг – на 45,7%;
 - 12) государственном управлении и обеспечении военной безопасности; социальном страховании – на 55,4%;
 - 13) образовании – на 28,6%;
 - 14) здравоохранении и предоставлении социальных услуг – на 6,3%;
 - 15) предоставлении прочих коммунальных, социальных и персональных услуг – на 61,2%;
- приток иностранных инвестиций. Объем инвестиций, поступивших от иностранных инвесторов в экономику России с 2008–2013 гг., в денежном выражении вырос на 40,7% и общая сумма рублевых капиталовложений составила 8 555 094 млн руб.

Таблица 2

Инвестиций в основной капитал по видам экономической деятельности, млрд руб.

Год	2008		2013	
	Всего	С участием иностранного капитала	Всего	С участием иностранного капитала
1	2	3	4	5
Инвестиции в основной капитал – всего	8764,9	1176,2	13255,5	1841,9
В том числе по видам экономической деятельности:				
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	386,4	29,0	487,7	34,7
Рыболовство, рыбоводство	4,3	0,1	12,0	0,09

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Добыча полезных ископаемых	1234,0	251,8	1997,4	420,5
Обрабатывающие производства из них:	1372,1	425,8	1865,2	593,6
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	670,8	48,9	1199,7	161,3
Строительство	298,1	54,0	356,7	49,0
Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования	277,1	77,7	513,1	166,4
Гостиницы и рестораны	32,6	5,2	264,4	17,0
Транспорт и связь	2174,6	92,1	3374,3	244,5
Финансовая деятельность	86	50,4	186,0	-
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	1463,6	135,1	2132,5	147,0
Государственное управление и обеспечение военной безопасности; обязательное социальное обеспечение	144,8	-	225,0	-
Образование	173,5	0,01	223,1	-
Здравоохранение и предоставление социальных услуг	206,9	1,1	219,9	3,5
Предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг	240,1	4,9	387,1	4,2

Таблица 3

Объем инвестиций, поступивших от иностранных инвесторов по типам

Годы	2008		2009		2010		2012		2013	
	млн долл. США	в % к ито-гу	млн долл. США	в % к ито-гу	млн долл. США	в % к ито-гу	млн долл. США	в % к ито-гу	млн долл. США	в % к ито-гу
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Всего инвестиций в том числе:	120941	100	81927	100	103769	100	154570	100	170180	100
Прямые инвести- ции, из них:	27797	23,0	15906	19,4	27027	26,0	18666	12,1	26118	15,4
Взносы в капитал	14794	12,2	7997	9,8	15883	15,3	9248	6,0	9976	5,9
Кредиты, получен- ные от зарубежных совладельцев орга- низаций	11664	9,7	6440	7,8	9781	9,4	7671	5,0	14581	8,6
Прочие прямые ин- вестиции	1339	1,1	1469	1,8	1363	1,3	1747	1,1	1561	0,9
Портфельные инве- стиции из них:	4194	3,5	882	1,1	1415	1,4	1816	1,2	1092	0,6

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Акции и паи	4057	3,4	378	0,5	1126	1,1	1533	1,0	895	0,5
Долговые ценные бумаги	128	0,1	496	0,6	286	0,3	282	0,2	186	0,1
Прочие инвестиции, из них:	88950	73,5	65139	79,5	75327	72,6	134088	86,7	142970	84,0
Торговые кредиты	14012	11,6	13941	17,0	16168	15,6	28049	18,1	27345	16,1
Прочие кредиты	73765	61,0	50830	62,0	57895	55,8	97473	63,1	113950	66,9
Прочее	1173	0,9	368	0,5	1264	1,2	8566	5,5	1675	1,0

В табл. 3 представлены инвестиции, поступившие от иностранных инвесторов, по типам. Наибольший удельный вес в инвестициях, поступивших от иностранных инвесторов, приходится на прочие инвестиции, осуществляемые на возвратной основе (кредиты международных финансовых организаций, торговые кредиты и пр.), и в 2013 г. величина данных инвестиций составляла 84%.

Более половины объема иностранных инвестиций, поступивших в Россию в 2008–2013 гг., направлены в обрабатывающее производство (табл. 2), где топливный сектор лидирует. Все остальные виды экономической деятельности обладают существенно меньшими объемами иностранных инвестиций.

Основные страны-инвесторы в 2013 г. – Великобритания, Кипр, Нидерланды, Люксембург, Франция, Швейцария, Германия, США. На долю этих стран приходилось 74,1% от общего объема накопленных иностранных инвестиций. Значительный объем накопленных иностранных инвестиций за период 2008–2013 гг. приходится на Великобританию – 10,8% (88725 млн долл. США), Нидерланды – 9,1%, (74821 млн долл. США), Кипр – 9% (73869 млн долл. США), Германия – 5,6% (45982 млн долл. США), Люксембург – 4,9% (40375 млн долл. США);

- обширная законодательная база, регламентирующая инвестиционную деятельность в стране [4].

В структуре инвестиций в основной капитал по видам основных фондов большой удельный вес занимают нежилые здания и сооружения, а также машины, оборудование и транспортные средства. Однако за период 2008–2013 гг. наблюдается их сокращение: зданий (кроме жилых) и сооружений с 42,6 (2008 г.) до 42,1% (2013 г.), а машин, оборудования и транспортных средств с 37,7 до 35,3%. За рассматриваемый период в структурном соотношении увеличился объем инвестирования в жилища – с 13,6 до 16%. Важным фактором является то, что капитальные вложения направляются на строительство новых жилых и нежилых зданий. Доля инвестиций в прочие виды основных фондов изменилась с 6,2 до 6,6%.

По данным Росстата, сильно ограничивают инвестиционную деятельность в стране недостаток собственных финансовых средств, инвестиционные риски, неопределенность экономической ситуации в стране, высокий процент коммерческого кредита.

Развитие инвестиционной деятельности

Проведенный анализ показывает, что рост инвестиционной деятельности в стране происходит, но не по плану инновационного сценария развития России до 2020 г. [5]. В Концепции развития РФ предполагается увеличение расходов на человеческий капитал: образование и здравоохранение.

В современных экономических условиях более половины всех инвестиций в основной капитал направляются:

- на добычу полезных ископаемых (средний показатель за 2008–2013 гг. составляет 14,4% от общего показателя инвестиций в основной капитал по РФ), преимущественно в топливно-энергетические полезные ископаемые;
- в обрабатывающее производство (большим удельным весом в общей величине анали-

зируемого показателя в данной отрасли выделяется производство кокса и нефтепродуктов) (14,1%);

- транспорт и связь (26,1%);
- операции с недвижимым имуществом, аренду и предоставление услуг (15,7%).

В образовании доля в общем объеме инвестиций в основной капитал за рассматриваемый период времени уменьшалась с 2,3 до 1,7%, а в здравоохранение и предоставление социальных услуг – с 2,7 до 2,0%.

Таблица 4

**Инвестиции в основной капитал по источникам финансирования
в отрасли социальной сферы**

	2008 г.		2012 г.	
	млн руб.	в % к итогу	млн руб.	в % к итогу
Образование	173500	100	213200	100
Собственные средства	7806	5,2	8241,1	4,1
Привлеченные средства, из них:	141831	94,8	195123,8	95,9
Бюджетные средства, в том числе:	128238	85,7	176731,5	86,9
федерального бюджета	37290	24,9	70865,2	34,9
бюджетов субъектов РФ	72464	48,4	81373,6	40,0
Здравоохранение и предостав- ление социальных услуг	206900	100	255500	100
Собственные средства	12622	7,1	18042,6	7,4
Привлеченные средства, из них:	164427	92,9	226605,6	92,6
Бюджетные средства, в том числе:	144962	81,9	200276,4	81,9
федерального бюджета	47401	26,8	96185,8	39,3
бюджетов субъектов РФ	80574	45,5	93725,8	38,3

Данные табл. 4 показывают, что отрасли социальной сферы инвестируются в основном за счет бюджетных средств страны. С 2008 по 2013 гг. перераспределялась нагрузка инвестирования в общем объеме между источниками бюджетных средств. Наблюдался активный рост средств из федерального бюджета, и за рассматриваемый промежуток времени финансирование образования увеличилось на 90,0%, в здравоохранения и предоставления социальных услуг – на 102,9%. Прирост инвестиционных вложений из бюджетов субъектов РФ в образование составил 12,3%, здравоохранение и предоставление социальных услуг – 16,3%. В 2013 г. инвестиции из федерального бюджета и бюджетов субъектов РФ в социальные отрасли экономики достигли практически одинаковых денежных средств.

В целом из табл. 4 видно, что за анализируемый период времени наблюдается рост инвестиций в основной капитал в системе образования и здравоохранения по всем источникам финансирования. Частные инвестиции имеют тенденцию к росту, так как бюджетных средств недостаточно для решения финансовых и материально-технических проблем.

В системе образования в последнее время используются собственные коммерческие средства, которые связаны с широким распространением платных форм обучения – это привлеченные частные школы и детские сады, коммерческие средние специальные и высшие учебные заведения или платные институты (факультеты), специальности (направления) в вузах. Численность студентов, обучающихся с полным возмещением затрат с 2005/2006 по 2012/13 уч. гг. в общей численности студентов в высших учебных заведениях возросла на 11,7%. В 2005/06 уч. г. рассматриваемый показатель составлял 49,8%, а в 2012/13 уч. г. – 61,5%.

В здравоохранении наметилась тенденция расходов населения на платные медицин-

ские услуги и приобретение лекарств, добровольное медицинское страхование. В среднем на одного члена домашнего хозяйства РФ денежные расходы на платные услуги в области здравоохранения и отдыха в 2012 г. составили 39 367,6 руб. Важным источником финансирования здравоохранения стала система обязательного медицинского страхования (ОМС). В 2012 г. средства территориальных филиалов ОМС составили 32% всех средств, израсходованных в здравоохранении.

В современных экономических условиях расширенная деятельность «коммерциализации» в образовании и здравоохранении – это одно из направлений увеличения инвестиций в данные отрасли народного хозяйства за счет средств потребителей социальных услуг, где активным потребителем в инновационной среде могут выступать не только домашнее хозяйство, государство, регионы, но и промышленные предприятия.

Доказано, что вложенные промышленные инвестиции в образовательную подготовку и физическое здоровье работников предприятий – в человеческий капитал – увеличивают производительность труда, что способствует эффективной промышленной деятельности [6]. Однако роль государственного финансирования на всех уровнях управления не должна уменьшаться, а также государство политическими, экономическими, управленческими и финансовыми факторами должно поддерживать развитие промышленных инвестиций в отрасли социальной сферы.

Выводы

Проведенный анализ состояния и развития инвестиционной деятельности показал, что преимущественным направлением для обеспечения основного долгосрочного сценария развития России является разработка инновационных платформ в системе образования и здравоохранения в форме частно-государственного партнерства.

Библиографический список

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г.
2. Российский статистический ежегодник: стат. сб. / Росстат. – М., 2009–2014.
3. Инвестиции в России: стат. сб./ Росстат. – М., 2009–2013.
4. **Юрлов, Ф.Ф.** Инвестиционная и инновационная деятельность экономических систем на разных уровнях управления: вчера, сегодня и завтра: монография / Ф.Ф. Юрлов, Е.А. Дубик, Н.Г. Котомина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2012. – 194 с.
5. **Дубик, Е.А.** Развитие человеческого капитала в условиях инновационной экономики: монография / Е.А. Дубик; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2014. – 180 с.
6. **Дубик, Е.А.** Инвестиции в человеческий капитал на разных стадиях жизненного цикла / Е.А. Дубик, С.Н. Митяков // Экономические науки. 2013. №5, С. 22–26.

*Дата поступления
в редакцию 09.04.2015*

E.A. Dubik, L.N. Basova

INVESTING ACTIVITIES of INNOVATION RUSSIA

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

In article by analyzing the investment in fixed assets for the period from 2008-2013 are identified factors of positive change in investment activity in Russia and discussed ways to further develop investment in the innovation economy.

Keywords: investment, fixed investment, industrial investment, human capital, innovation scenario.

УДК 332.1

Г.А. Морозова

РОЛЬ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В АКТИВИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС

Рассмотрены теоретические аспекты научной деятельности как сферы активной государственной политики.

Ключевые слова: инновационный менеджмент, инновационная деятельность, государственная инновационная политика, инновационные комплексы, научно-технический прогресс.

Научная деятельность традиционно считается сферой активной государственной политики. Дело в том, что научные идеи не могут быть непосредственно использованы в хозяйственной деятельности, целью которой является прибыль. Поэтому организации и компании весьма сдержанно идут на прямое финансирование исследований, хотя испытывают большую потребность в их результатах. В современных условиях государство во многом берет на себя функцию обеспечения бизнеса одним из важнейших ресурсов инновационного процесса - научными знаниями и идеями. Именно поэтому НТП в официальных документах ведущих стран рассматривается как единая цепь: научные идеи и разработки - инновационный бизнес - широкомасштабное использование.

Государство призвано формировать цели и принципы своей политики и собственные приоритеты в этой области. Целями научной и инновационной политики ведущих стран мира, как правило, являются увеличение вклада науки и техники в развитие экономики страны; обеспечение прогрессивных преобразований в сфере материального производства; повышение конкурентоспособности национального продукта на мировом рынке; укрепление безопасности и обороноспособности страны; улучшение экологически обстановки; сохранение и развитие сложившихся научных школ.

Для выхода из кризиса необходимо разработать стратегию сохранения и развития научно-технического и инновационного потенциала страны по следующим направлениям [1]:

- реструктуризация научно-технического потенциала в различных отраслях экономики с учетом концентрации материальных, финансовых и интеллектуальных ресурсов на прорывных направлениях науки и техники;
- создание фонда имущества науки и инноваций за счет объектов науки, являющихся государственной собственностью и не используемых по назначению;
- разработка системы использования лизинга как эффективного рыночного механизма для субъектов инновационной деятельности, разрабатывающих и производящих наукоемкую продукцию с использованием дорогостоящих приборов и оборудования;
- совершенствование механизмов системы привлечения банковского кредита для расширения инновационной деятельности и создания условий для развития рынка капитала;
- разработка и использование системы обязательных отчислений части прибыли от экспорта нефти, нефтепродуктов, газа и минерального сырья для создания фонда инноваций в топливно-энергетический комплекс;
- создание в финансово-промышленных группах наряду с системой консолидации финансовых и производственных потенциалов специальных инновационных центров,

- координирующих и реализующих инновационные проекты;
- формирование института разработчиков и управляющих инновационными проектами из числа научно-технических работников, ученых и специалистов;
- образование на базе фондов, поддерживающих инновационную деятельность ассоциации фондов с развитым финансовым капиталом для помощи прорывным проектам;
- формирование системы целевого использования средств амортизационного фонда на финансирование мероприятий, связанных с проведением НИОКР, экспериментальных и других видов работ, освоением инноваций, патентованием новых решений, приобретением и освоением отечественных и зарубежных патентных и беспатентных лицензий;
- разработка предложений об изменении налогового законодательства, обеспечивающих значительное повышение инновационной активности

Инструментами государственного регулирования должны стать:

- социально-экономические и научно-технические прогнозы государственной политики в области финансов, цен, денежного обращения, воспроизводственной, структурной политики и др.;
- государственно-административные, общеэкономические и рыночные регуляторы;
- федеральные и региональные программы, балансы и модели оптимизации экономических процессов;
- государственные заказы и современные контрактные системы;
- индикативные механизмы и регуляторы деятельности государственных предприятий и организаций и других форм собственности;
- механизм интеграции регуляторов и структур.

Государственная научно-техническая программа - комплекс взаимосвязанных по ресурсам, срокам и исполнителям мероприятий, обеспечивающих эффективное решение важнейших научно-технических проблем на приоритетных направлениях развития науки и техники. Отбор программ осуществляется, исходя из социально-экономических приоритетов, прогнозов, целей структурной политики, международных обязательств, при соблюдении следующих условий: существенной их значимости для крупных структурных изменений, направленных на формирование нового технологического уклада, принципиальной новизне и взаимосвязанности программных мероприятий (проектов), необходимых для широкомасштабного распространения прогрессивных научно-технических достижений.

К основным функциям государственных органов в инновационной сфере относятся следующие [2]:

- аккумуляция средств на научные исследования и инновации;
- координация инновационной деятельности;
- стимулирование инноваций, конкуренции в данной сфере, страхование инновационных рисков, введение государственных санкций за выпуск устаревшей продукции;
- создание правовой базы инновационных процессов, особенно системы защиты авторских прав инноваторов и охраны интеллектуальной собственности;
- кадровое обеспечение инновационной деятельности;
- формирование научно-инновационной инфраструктуры;
- институциональное обеспечение инновационных процессов в отраслях государственного сектора;
- обеспечение социальной и экологической направленности инноваций;
- повышение общественного статуса инновационной деятельности;
- региональное регулирование инновационных процессов;
- регулирование международных аспектов инновационных процессов.

Государство в первую очередь осуществляет программы развития приоритетных

направлений науки и техники. В их числе программы по созданию высокоэффективных процессов производства для агропромышленного комплекса, экологически чистых и ресурсосберегающих, технология в энергетике, химии, металлургии; новых материалов; технологий и оборудования для строительства, транспорта, создание технологи, машин для производств будущего, перспективных информационных технологий. В рамках государственных научно-технических программ предусматриваются также создание новых лекарственных средств, развитие медицины и здравоохранения, решение социальных проблем. Статистическое наблюдение за ходом выполнения государственных научно-технических программ осуществляется в рамках статистики ассигнований на научные исследования и разработки. Внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки рассматривания в разрезе направлений (программ) и крупных областей науки.

Государственная научно-техническая политика не может и не должна ограничиваться лишь финансовой поддержкой научно-технических программ и предоставлением различных льгот хозяйствующим субъектам, которые осуществляют инновационную деятельность. Государство обязано выполнять (посредством своих уполномоченных исполнительных органов прежде всего инновационных научно-технических фондов) функции экономической (коммерческой) реализации научно-технических новшеств, выступать основным инвестором интеллектуального капитала, субъектом присвоения экономических эффектов НТП.

Библиографический список

1. **Морозова, Г.А.** Управление современной организацией: монография / Г.А. Морозова. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2013. – 136 с.
2. **Морозова, Г.А.** Инновационное развитие промышленных комплексов в регионе: монография / Г.А. Морозова [и др.]. – Нижний Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2010. – 160 с.

*Дата поступления
в редакцию 27.04.2015*

G.A. Morozova

ROLE OF PUBLIC ADMINISTRATION IN INNOVATIVE ACTIVITIES

Nizhny Novgorod institute of management – branch RANEPА

The article considers the theoretical aspects of scientific activity as a sphere of active government policy. The fact that scientific ideas cannot be directly used in the economic activity, the purpose of which is profit. Therefore, organizations and companies are very reserved on the direct funding of research, although a great need in their results. In modern conditions the state is largely takes over the function of providing the business with one of the most important resources of the innovation process - scientific knowledge and ideas. That is why the STP in the official documents of the leading countries is considered as a unified chain: scientific ideas and developments - an innovative business - large-scale use.

Key words: innovation management, innovation, state innovation policy, innovation centers, scientific and technological progress.

УДК 338.001.36

М.Ю. Маркитанов

ПРИНЯТИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АНТАГОНИЗМА ИНТЕРЕСОВ. ПРАКТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Установить область практического применения аппарата антагонистических игр к решению конкретных задач экономики и менеджмента.

Методология: Теория игр с нулевой суммой.

Результаты: Выявлены основные типы конфликтных ситуаций в экономике, показана математическая сводимость конфликтов разных типов друг к другу, предложена практическая интерпретация понятий «стратегия игроков», «критерий оптимальности» и «выигрыш», доказана возможность применения аппарата антагонистических игр к задачам принятия решений в условиях олигополии, к задачам распределения ресурсов и разрешения трудовых конфликтов.

Выводы: Теория игр с нулевой суммой может найти применение к достаточно широкому кругу задач. Это не только принятие решений в условиях олигополии, но и решение трудовых конфликтов, и выстраивание отношений предприятия с государством, и другие задачи, требующие распределения ограниченных ресурсов между разными участниками экономической деятельности. Проблема требует дальнейшего исследования.

Ключевые слова: антагонистические игры, конфликт, конфликтная ситуация, критерий оптимальности, стратегия, олигополия, трудовой конфликт, ресурсы.

Постановка задачи Д. Нейманом и О. Моргенштерном

Отличительной особенностью конфликтных ситуаций в экономике является наличие двух сторон, принимающих решение в общем случае независимо друг от друга и располагающих каждая собственным набором альтернатив. Причём интересы этих сторон являются диаметрально противоположными, и положительный результат одной из них автоматически оборачивается ущербом для другой.

Первыми исследователями проблемы принятия решений в конфликтных ситуациях в экономике стали американский математик Д. Нейман и его соотечественник, экономист О. Моргенштерн. В своей монографии «Теория игр и экономическое поведение» [1] они дают понятию «конфликт» следующую интерпретацию.

Пусть имеются два участника конфликта (участник 1 и участник 2). Каждый из них располагает набором «стратегий», т.е., возможных вариантов действий. Эти стратегии можно обозначить соответственно $\vec{X} = \{X_i, i = \overline{1, N}\}$ и $\vec{Y} = \{Y_j, j = \overline{1, M}\}$. Поскольку участники конфликтуют между собой, то, очевидно, результаты, достигаемые каждым из них, зависят не только от его собственного выбора, но и от выбора противника:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= \mathcal{E}_1(X, Y), \\ \mathcal{E}_2 &= \mathcal{E}_2(X, Y). \end{aligned}$$

Каждый из участников конфликта стремится таким образом подобрать собственную стратегию, чтобы обеспечить максимальный эффект:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1(X_{opt}, Y) &= \max_X \mathcal{E}_1(X, Y), \\ \mathcal{E}_2(X, Y_{opt}) &= \max_Y \mathcal{E}_2(X, Y). \end{aligned}$$

Цели участников конфликта диаметрально противоположны друг другу. Это означает, что положительный результат, достигаемый одним из конкурентов, неизбежно приводит к ущербу для другого. Нейман и Моргенштерн предложили для этого факта следующую математическую модель:

$$\mathcal{E}_1(X, Y) = -\mathcal{E}_2(X, Y) \quad (1)$$

при $\forall X, Y$, то есть результаты участников конфликта равны по модулю и противоположны по знаку. Это позволяет использовать при анализе таких задач одну единственную матрицу выбора для обоих участников конфликта, как в случае «игр с природой» [2].

Рассмотрим матрицу выбора.

	Y_1	Y_2	...	Y_M
X_1	$\mathcal{E}_{1,1}$	$\mathcal{E}_{1,2}$	...	$\mathcal{E}_{1,M}$
X_2	$\mathcal{E}_{2,1}$	$\mathcal{E}_{2,2}$	...	$\mathcal{E}_{2,M}$
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
X_N	$\mathcal{E}_{N,1}$	$\mathcal{E}_{N,2}$	...	$\mathcal{E}_{N,M}$

Ввиду конфликтной постановки задачи можем записать:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_1(X_i, Y_j) = \mathcal{E}_{i,j} \\ \mathcal{E}_2(X_i, Y_j) = -\mathcal{E}_{i,j} \end{cases}$$

Каждый из участников конфликта принимает решение на основе принципа гарантированного результата.

Возможны три ситуации:

а) участники конфликта принимают решения одновременно и независимо друг от друга;

б) участник 1 начинает действовать первым, участник 2 делает выбор, исходя из известной стратегии участника 1;

в) участник 2 начинает действовать первым, участник 1 делает выбор исходя из известной стратегии участника 2.

Рассмотрим первый случай. Стратегия участника 1 определяется принципом гарантированного результата:

$$\mathcal{E}_1(X_{\text{опт}}) = \mathcal{E}_{e1} = \max_X \min_Y (\mathcal{E}_{i,j}).$$

Обозначим через $i_{\text{опт}}$ номер стратегии $X_{\text{опт}}$.

Аналогично, участник 2 будет стремиться максимизировать собственный результат в соответствии с тем же самым принципом гарантированного результата:

$$\mathcal{E}_2(Y_{\text{опт}}) = \mathcal{E}_{e2} = -\min_Y \max_X (\mathcal{E}_{i,j}),$$

в силу того, что $\mathcal{E}_2(X_i, Y_j) = -\mathcal{E}_{i,j}$. Обозначим номер стратегии $Y_{\text{опт}}$ через $j_{\text{опт}}$.

Совокупность стратегий участников конфликта $X_{\text{опт}}$ и $Y_{\text{опт}}$ определяет экономический эффект (в терминологии Неймана – выигрыш) каждой из конфликтующих сторон. Эффект участника 1 составляет величину $\mathcal{E}_{10} = \mathcal{E}_{i_{\text{опт}}, j_{\text{опт}}}$, эффект участника 2 – величину $\mathcal{E}_{20} = -\mathcal{E}_{i_{\text{опт}}, j_{\text{опт}}}$.

Следует отметить, что, поскольку каждый из участников конфликта реализует принцип гарантированного результата, то величина \mathcal{E}_{e1} – наименьший возможный результат участника 1 при $X = X_{\text{опт}}$, а величина \mathcal{E}_{e2} – наименьший возможный результат участника 2 при $Y = Y_{\text{опт}}$. Поэтому можно записать: $\mathcal{E}_{10} \geq \mathcal{E}_{e1}$, $\mathcal{E}_{20} \geq \mathcal{E}_{e2}$, следовательно, при независимом принятии решений каждая сторона получает результат, не уступающий по величине гарантированному, а, как правило, даже превосходящий его.

Рассмотрим второй случай. Участник 1 по-прежнему выбирает свою стратегию на основании принципа гарантированного результата, следовательно, его стратегия остается

прежней – X_{opt} . Участник 2 теперь принимает решение в условиях известной стратегии противника, следовательно, не имеет факторов неопределенности.

	Y_1	Y_2	...	Y_M
X_{opt}	$\mathcal{E}_{0,1}$	$\mathcal{E}_{0,2}$	...	$\mathcal{E}_{0,M}$

Стремясь максимизировать свой результат, участник 2 одновременно, вследствие условия (1), минимизирует результат противоположной стороны:

$$\mathcal{E}_2(Y_{opt}) = \max_Y (\mathcal{E}_2(X_{opt}; Y)) = -\min(\mathcal{E}_1(X_{opt}; Y)).$$

Поскольку стратегия X_{opt} выбрана участником 1 в соответствии с принципом гарантированного результата, то

$$\min(\mathcal{E}_1(X_{opt}; Y)) = \mathcal{E}_{1_2},$$

следовательно, экономический эффект участника 1 будет равен его гарантированному результату, а $\mathcal{E}_2 = -\mathcal{E}_{1_2}$. Это означает, что в случае, когда один из участников конфликта располагает информацией о стратегии своего противника, участник, вынужденный принимать решение независимо, проигрывает в экономическом эффекте, по сравнению со случаем независимого принятия решений обоими противниками.

Третий случай аналогичен второму с тем, что участник 1 и участник 2 меняются ролями.

Случай, когда $\mathcal{E}_{1_2} = \mathcal{E}_{2_2}$ имеет особое название – задача с седловой точкой. В этом случае шансы конфликтующих сторон равны. Если первый участник раньше времени обнаружит свою стратегию, он получит тот же результат (как правило, отрицательный), что и второй участник, если первым обнаружит свои планы он.

Равновесными называются стратегии участников конфликта X_i^* и Y_j^* , такие, для которых справедливы неравенства:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1(X_i^*; Y_j^*) &\geq \mathcal{E}_1(X_i; Y_j^*) \text{ при любых } X_i; \\ \mathcal{E}_2(X_i^*; Y_j^*) &\leq \mathcal{E}_2(X_i^*; Y_j) \text{ при любых } Y_j. \end{aligned}$$

Первое неравенство означает невыгодность уклоняться от равновесных стратегий для первого участника конфликта, второе – для второго.

Задачи, в которых есть равновесные стратегии – это и есть задачи с седловой точкой.

Практическая интерпретация конфликтных ситуаций по Нейману

В теории и практике менеджмента рассматриваются следующие виды конфликтов:

- внутриличностный конфликт;
- конфликт между отдельными личностями;
- конфликт между личностью и группой;
- межгрупповой конфликт.

Внутриличностный конфликт означает противоречивые цели, преследуемые одним и тем же субъектом. Подобного рода конфликты в теории антагонистических игр не рассматриваются.

Межличностный конфликт – конфликт между физическими лицами. Такие конфликты – предмет, скорее, психологии и менеджмента, нежели экономической науки. Конфликт между личностью и группой может возникнуть в том числе и из-за экономических причин. Это может быть, например, конфликт между предприятием и сотрудником из-за величины заработной платы.

Наибольший интерес в рамках настоящего исследования представляет конфликт межгрупповой. Именно такого рода конфликты наиболее удобно анализировать с помощью матричных игр.

Самая очевидная интерпретация антагонизма в экономике – это борьба между конкурентами за рынок в условиях олигополии и, в частности, дуополии. Если рынок поделён между конкурирующими фирмами полностью, то какую долю рынка дополнительно приобретает одна из фирм, точно такую же долю теряет другая. Так выполняется условие (1).

В качестве стратегий X_i и Y_j могут рассматриваться:

- варианты рекламной кампании, направленной на подрыв позиций конкурента на рынке;
- варианты ценовой политики во временном (стратегия стандартных или изменяющихся цен) или географическом аспекте;
- уровень канала распределения товара;
- способ его продажи;
- технологическая политика предприятия.

Рассмотрим в качестве примера следующую задачу. Пусть рынок полностью поделён между двумя конкурирующими компаниями. Каждая из них может реализовывать свою продукцию одним из трёх способов: со склада самовывозом, с доставкой конечному потребителю или через дилерскую сеть. В табл. 1 приведены значения изменения доли первой фирмы на рынке для всех возможных случаев.

Таблица 1

1-я фирма \ 2-я фирма	Самовывоз	Доставка	Дилеры
Самовывоз, %	+4	- 12	- 5
Доставка, %	+ 10	- 1	+ 3
Дилеры, %	+ 5	- 7	+ 8

Требуется выбрать оптимальную стратегию реализации продукции для трёх случаев:

- а) фирмы принимают решения одновременно и независимо друг от друга;
- б) первая фирма узнаёт стратегию конкурента прежде, чем выберет свою;
- в) вторая фирма узнаёт стратегию конкурента прежде, чем выберет свою;

а также проверить наличие в задаче седловой точки.

В случае (а) обе фирмы ничего не знают о стратегии конкурента, которая для них выступает в качестве фактора неопределённости. Поэтому им приходится пользоваться принципом гарантированного результата. Первая фирма стремится максимизировать собственную долю на рынке, поэтому

$$\Delta D_{21}(X_{opt}) = \max_i \min_j (\Delta D_{i,j}).$$

Таблица 2

1-я фирма \ 2-я фирма	Самовывоз	Доставка	Дилеры	min
Самовывоз, %	+4	- 12 %	- 5 %	-12 %
Доставка, %	+ 10	- 1 %	+ 3 %	-1 %
Дилеры, %	+ 5	- 7 %	+ 8 %	-7 %

Поскольку $\Delta D_{21} = -1\%$, оптимальной стратегией первой фирмы является продажа продукции с доставкой (см. таблицу).

Поскольку рынок поделён между конкурирующими фирмами поровну, то сколько процентов рынка выиграет первая фирма, столько ж процентов потеряет вторая и наоборот. Матрица выбора для второй фирмы будет совпадать с первой по модулю, но иметь противоположные знаки. Поэтому для второй фирмы принцип гарантированного результата приобретает вид

$$\Delta D_{22}(Y_{opt}) = \min_j \max_i (\Delta D_{i,j}).$$

1-я фирма \ 2-я фирма	Самовывоз	Доставка	Дилеры
Самовывоз, %	+4	- 12	- 5
Доставка, %	+ 10	- 1	+ 3
Дилеры, %	+ 5	- 7	+ 8
max, %	+10	-1	+8

Поскольку $\Delta D_{22} = -1\%$, оптимальной стратегией первой фирмы является продажа продукции с доставкой.

Теперь рассмотрим случай (б). Поскольку первая фирма узнаёт стратегию конкурента раньше, чем выберет свою, то вторая фирма стратегии конкурента не знает, а, следовательно, вынуждена опираться на принцип гарантированного результата. Как и в случае (а), она выберет работу с доставкой. Для первой же фирмы неопределённости уже не существует. Она знает, что вторая фирма работает с доставкой, и располагает набором детерминированных значений изменения доли на рынке (второй столбец матрицы выбора), (табл. 3).

Таблица 3

1-я фирма	2-я фирма	Доставка
Самовывоз		- 12 %
Доставка		- 1 %
Дилеры		- 7 %
max		-1%

Максимальное значение в этом столбце (-1%) обеспечивает продажа с доставкой, которую и предпочитает первая фирма.

В случае (в) в условиях неопределённости вынуждена действовать первая фирма, которая по принципу гарантированного результата выбирает продажу с доставкой (как в случае (а)). У второй фирмы в этом случае уже нет неопределённости – она располагает строкой детерминированных значений (вторая строка матрицы выбора), (табл. 4).

Таблица 4

1-я фирма	2-я фирма	Самовывоз	Доставка	Дилеры
Доставка, %		+ 10	- 1	+ 3

Минимальное значение в этой строке (-1%) обеспечивает продажа с доставкой, которая и выбирается второй фирмой в качестве оптимальной.

Видим, что в рассмотренной задаче имеет место пара равновесных стратегий, от которых не выгодно уклоняться ни одному из участников конфликта, то есть в задаче есть седловая точка.

Вторая практическая интерпретация классической антагонистической игры связана с отношениями между продавцом и покупателем в процессе торга. Если стратегии продавца и покупателя связаны с корректировкой цены, то изменение цены может рассматриваться в качестве элемента матрицы, т.е. в качестве экономического эффекта «игроков». В качестве стратегий в простейшем случае могут рассматриваться два варианта действий – согласиться или торговаться.

Рассмотрим следующую задачу.

Пусть фирма и её поставщик ведут переговоры о цене партии сырья. Если оба участника переговоров торгуются, то первоначальная цена будет снижена на 10 %, если фирма торгуется, а поставщик уступает, то цена будет снижена на 20 %, а если поставщик торгуется, а фирма уступает, то первоначальная цена будет повышена на 25 %. Какой вариант действий – уступать или торговаться – выберет каждый партнёр по переговорам, и как изменится первоначальная цена, если её назначит: а) поставщик; б) фирма?

Первым делом, отметим, что если оба партнёра предпочитают уступить, то первоначальная цена не изменится. Составим матрицу (табл. 5).

Таблица 5

Поставщик	Фирма	Уступить	Торговаться
Уступить, %		0	- 20
Торговаться, %		+ 25	- 10

Если первоначальную цену назначает поставщик, то первым свою стратегию должна выбрать фирма – ей предстоит решить, как реагировать на ценовое предложение – согласиться ли (т.е., уступить) или торговаться. Поскольку стратегия поставщика ей неизвестна, то фирма пользуется принципом гарантированного результата. Фирме цену необходимо снижать, поэтому её выбор подчиняется минимаксному критерию:

$$\Delta P_{22}(Y_{opt}) = \min_j \max_i (\Delta P_{i,j}).$$

Согласно этому правилу, оптимальной стратегией фирмы будет торговаться (табл. 6).

Таблица 6

Поставщик	Фирма	Уступить	Торговаться
Уступить, %		0	- 20
Торговаться, %		+ 25	- 10
Max, %		+ 25	- 10

Поставщик знает, что фирма торгуется, следовательно, вместо ситуации неопределённости он имеет набор детерминированных значений (табл. 7).

Таблица 7

Поставщик	Фирма	Торговаться
Уступить, %		- 20
Торговаться, %		- 10

Если поставщик начнёт уступать, то ему придётся сбавить 20 % с цены, а если он будет торговаться, то только 10 %, поэтому поставщик выберет торговаться.

Если первоначальную цену назначает фирма, то свою стратегию первым выбирает поставщик. Поставщику цену следует максимизировать, поэтому он будет пользоваться максиминным критерием (табл. 8):

$$\Delta P_{21}(X_{opt}) = \max_i \min_j (\Delta P_{i,j}).$$

Таблица 8

Поставщик	Фирма	Уступить	Торговаться	min
Уступить, %		0	- 20	-20
Торговаться, %		+ 25	- 10	-10

Согласно максиминному критерию, поставщику целесообразнее торговаться. Если фирма будет знать, что поставщик торгуется, то она имеет строку детерминированных значений, из которых ей нужно выбрать минимум:

Таблица 9

Поставщик	Фирма	Уступить, %	Торговаться, %
Торговаться		+ 25	- 10

Для того чтобы снизить цену фирме тоже следует торговаться. Видим, что в данной задаче присутствует седловая точка. Более сложная постановка может быть связана с появлениями дополнительных стратегий участников конфликта – например, уступить после двух шагов, уступить после трёх шагов, прервать переговоры и т.п.

Наконец, пример конфликтной ситуации даёт задача антикризисного управления, если рассматривать взаимоотношения руководства предприятия с профсоюзом или с трудовым коллективом непосредственно. В качестве стратегий предприятия могут рассматриваться различные варианты антикризисного управления, а в качестве стратегий профсоюза (трудо-вого коллектива) – согласиться с руководством, вступить в переговоры, начать забастовку или инициировать судебное разбирательство. В качестве «предмета игры», т.е. экономического эффекта участников рассматривается сокращение или увеличение числа рабочих мест (предприятие стремится к сокращению, трудовой коллектив – к увеличению, т.е. условие конфликта выполняется), сокращение или увеличение зарплаты, сокращение или увеличение других расходов на социальные нужды (например, стоимости объектов социальной сферы, находящихся на балансе предприятия). При такой постановке задачи часто одна из сторон (трудо-вой коллектив) при любой стратегии оказывается в проигрыше, и задача её – этот про-игрыш минимизировать.

Рассмотрим следующую задачу. Пусть предприятие сравнивает между собой три ва-рианта антикризисного управления, связанные сокращением численности рабочих мест. Профсоюз может либо санкционировать такое решение администрации предприятия, либо вступить с ней в переговоры, либо объявить забастовку. Процент сокращения рабочих мест для всех возможных случаев приведён в табл. 10.

Таблица 10

профсоюз	Фирма	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Согласие, %		12	25	28
Переговоры, %		10	15	20
Забастовка, %		33	5	1

Определить, какой вариант действий выберет каждая стороны данного конфликта, ес-ли а) они принимают решение одновременно и независимо друг от друга; б) администрация предприятия заблаговременно узнаёт решение профсоюза; в) профсоюз заблаговременно узнаёт решение администрации.

В первом случае оба участника конфликта пользуются принципом гарантированного результата (табл. 11).

Таблица 11

профсоюз	Фирма	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Max
Согласие, %		12	25	28	28
Переговоры, %		10	15	20	20
Забастовка, %		33	5	1	33
Min, %		10	5	1	

Сокращение рабочих мест представляет собой проигрыш для профсоюза и выигрыш для фирмы, поэтому профсоюз пользуется минимаксным критерием выбора оптимального решения, а фирма – максиминным.

Если администрация фирмы знает «стратегию» профсоюза прежде, чем выберет свою (вариант (б)), то профсоюз пользуется принципом гарантированного результата и выбирает переговоры. Администрация знает, что профсоюз вступит в переговоры, и для неё неопреде-лённости нет. Администрация располагает строкой детерминированных значений (табл. 12).

Таблица 12

профсоюз	Фирма	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
	Переговоры, %	10	15	20

Максимальное значение в этой строке соответствует 3-му варианту, который предприятие и выберет в качестве оптимального.

В случае (в) администрация фирмы пользуется принципом гарантированного результата и, следовательно, выбирает вариант 1. Профсоюз располагает столбцом детерминированных значений (табл. 13).

Таблица 13

профсоюз	Фирма	Вариант 1
	Согласие, %	12
	Переговоры, %	10
	Забастовка, %	33

Из этого столбца ему следует выбрать минимум, которому соответствует стратегия «переговоры».

Итак, оптимальной стратегией профсоюза во всех трёх случаях будут переговоры, а оптимальной стратегией фирмы в первом и третьем случае является вариант 1, а во втором – вариант 3.

Конфликтные ситуации второго рода и применение для них аппарата теории антагонистических игр. Сводимость конфликта второго рода к традиционной трактовке

Ситуацию конфликта, по Нейману-Моргенштерну, описанную в предыдущих разделах статьи, можно назвать конфликтными ситуациями первого рода. Однако такие ситуации представляют собой весьма узкий и специфический класс задач. В той же самой олигополии, например, конкуренты чаще стремятся максимизировать собственную прибыль, чем вытеснить с рынка конкурента или нанести ему экономический ущерб, а такие задачи не описываются математическим аппаратом антагонистических игр. Есть, однако, некий дополнительный класс задач, который может быть описан данной моделью, хотя условие конфликта по Нейману ($\mathcal{E}_1 = -\mathcal{E}_2$) для них не выполняется. Данный класс задач можно условно назвать конфликтными ситуациями второго рода.

Ситуация конфликта второго рода была достаточно подробно рассмотрена автором данных строк в работе [3]. Пусть имеются два участника некоего экономического процесса. Первый из них располагает набором вариантов действий (стратегиями) $\{X_1; X_2; \dots; X_N\}$, второй – соответственно, стратегиями $\{Y_1; Y_2; \dots; Y_M\}$, где M и N – натуральные числа. Оба участника оценивают экономический эффект от реализации своих стратегий одним и тем же критерием $K(X_i; Y_j)$, причём первому участнику необходимо данный критерий максимизировать, а второму – минимизировать. В этом случае также можно считать интересы участников противоположными. Рассмотрим методологию принятия решения в таких условиях.

Поскольку критерий эффективности K является функцией стратегий обоих участников конфликта, то его возможные значения можно свести в матрицу (табл. 14).

Таблица 14

1-й участник	2-й участник	Y_1	Y_2	....	Y_M
X_1		$K_{1,1}$	$K_{1,2}$	...	$K_{1,M}$
X_2		$K_{2,1}$	$K_{2,2}$	...	$K_{2,M}$
·		·	·	·	·
·		·	·	·	·
·		·	·	·	·
X_N		$K_{N,1}$	$K_{N,2}$	...	$K_{N,M}$

При использовании принципа гарантированного результата правило выбора оптимального решения для первого участника (максимизирует критерий K) будет иметь вид:

$$K_1(X_{opt}) = K_{z1} = \max_X \min_Y (K_{i,j}),$$

Для второго участника (минимизирует критерий K) следующий вид:

$$K_2(Y_{opt}) = K_{z2} = \min_Y \max_X (K_{i,j}).$$

Эти правила, как видим, аналогичны конфликтным ситуациям первого рода, следовательно, и весь методологический аппарат будет таким же.

С помощью модели конфликтной ситуации второго рода можно описывать существенно более широкий круг задач, нежели с помощью модели Неймана-Моргенштерна. Например, это касается трудовых конфликтов, споров из-за ресурсов, конфликта интересов между иностранными инвесторами и областной администрацией и тому подобное.

Пример 1. Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть предприятие сравнивает несколько вариантов реструктуризации: преобразование в холдинг, создание ТПЗ или выделение ряда производств и служб в дочерние общества. Местная администрация может поддерживать проводимые мероприятия за счёт средств бюджета одним из трёх возможных способов – налоговыми льготами, льготным кредитованием или дотациями. Величина бюджетных капиталовложений для всех возможных случаев приведена в табл. 15.

Таблица 15

Варианты реструктуризации	Бюджетная поддержка	Налоговые льготы	Льготное кредитование	Дотации
Холдинг		18	7	12
ТПЗ		8	3	20
Дочерние общества		5	10	15

Очевидно, что руководство предприятия стремится максимизировать бюджетные капиталовложения (чем больше вложит бюджет, тем меньше денег нужно вкладывать самому предприятию), а местная администрация – минимизировать их. Поэтому правило выбора оптимального решения предприятием по принципу гарантированного результата будет выглядеть следующим образом:

$$K_1(X_{opt}) = \max_X \min_Y (K_{i,j}).$$

Для местной администрации аналогичное правило имеет вид

$$K_2(Y_{opt}) = \min_Y \max_X (K_{i,j}).$$

Пример 2. Предприятие рассматривает три варианта выхода из кризиса, сопряжённые с сокращением находящихся на балансе предприятия объектов социального назначения (таких, как дворец культуры, дом отдыха, больница, детский сад, общежитие и т.п.). Профсоюз может либо согласиться с планами руководства предприятия, либо вступить с ним в переговоры, либо призвать сотрудников к забастовке. Стоимость объектов социальной сферы на балансе предприятия для всех возможных вариантов приведена в табл. 16.

Таблица 16

Профсоюз	Администрация	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Согласие		10	7	8
Переговоры		4	9	8
Забастовка		15	5	12

Профсоюз, очевидно, будет стремиться сохранить как можно больше объектов социальной сферы на балансе. Поэтому его критерий выбора оптимального решения будет максиминным:

$$K_1(X_{\text{опт}}) = \max_X \min_Y (K_{i,j}).$$

Администрация предприятия, напротив, стремится эти объекты «сбросить» с баланса, поскольку предприятие находится в кризисе, а эти объекты не приносят прибыли. Поэтому критерий оптимальности для администрации предприятия – минимаксный:

$$K_2(Y_{\text{опт}}) = \min_Y \max_X (K_{i,j}).$$

Однако конфликтные ситуации второго рода легко свести к конфликтным ситуациям первого рода. Для этого достаточно перейти от абсолютных значений критерия к его приращениям, отсчитываемым от определённого порога.

Если предметом конфликта является распределение ресурсов между двумя сторонами, как это имеет место в примере 1 (ресурс – капиталовложения, стороны – предприятие и местный бюджет), то можно определить среднее арифметическое всех возможных значений ресурса, достигающегося одной из сторон, а затем вычислить разность между всеми значениями матрицы и средним арифметическим, сведя полученные разности в новую матрицу. Тогда положительная разность будет означать дополнительный объем ресурсов, получаемый данным участником конфликта, то есть его выигрыш. А отрицательная разность – объем ресурсов, уступленных сопернику, то есть выигрыш соперника и собственный проигрыш. Условие Неймана-Моргенштерна ($E_1 = -E_2$) полностью выполняется.

Вернёмся к примеру 1. В этом случае среднее арифметическое всех возможных значений бюджетных капиталовложений составляет 10,9 млн руб. Тогда матрица преобразуется к виду (табл. 17).

Таблица 17

Варианты Реструктуризации	Бюджетная поддержка	Налоговые льготы	Льготное кредитование	Дотации
Холдинг		7,1	-3,9	1,1
ТПЗ		-2,9	-7,9	9,1
Дочерние общества		-5,9	-0,9	4,1

Дальше с этой матрицей можно работать как с обычной антагонистической игрой.

В ситуациях трудовых конфликтов порог, от которого можно отсчитывать приращение, не обязательно будет являться среднеарифметической величиной. Например, если конфликт между трудовым коллективом и администрацией предприятия разгорается из-за величины заработной платы или из-за стоимости объектов социального назначения, как в примере 2, за пороговое значение принимается первоначальное значение критерия.

Допустим, если в примере 2 первоначальная стоимость объектов социального назначения составляла 10 млн руб., то матрица выбора приобретает вид (табл. 18).

Таблица 18

Профсоюз	Администрация	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Согласие		0	-3	-2
Переговоры		-6	-1	-2
Забастовка		5	-5	2

Положительное приращение означает, что профсоюзу удалось добиться дополнительных финансовых вложений на социальные нужды, то есть выигрыш профсоюза. Отрицательное приращение означает, что предприятие сбрасывает с баланса объекты социальной сферы, и это приращение – проигрыш профсоюза и выигрыш администрации предприятия.

Выводы

1. Модель конфликтной ситуации на основе теории антагонистических игр, предложенная Д. Нейманом и О. Моргенштерном и развитая Ф.Ф. Юрловым, может иметь реальное применение в экономике.

2. С помощью модели антагонистических игр можно анализировать следующие классы задач:

а) конкуренция на олигополистическом рынке при условии, что борьба между конкурентами идёт за долю на этом рынке,

б) торг между продавцом и покупателем за цену партии товара,

в) трудовые конфликты (между администрацией предприятия и персоналом – или профсоюзом – из-за сокращения рабочих мест, уменьшения или увеличения зарплаты, сокращения объектов социального назначения на балансе предприятия и т.п.

г) конфликты из-за дележа ресурсов.

3. Конфликтные ситуации бывают двоякого рода. Конфликт первого рода предусматривает выполнение условия антагонизма по Нейману – Моргенштерну ($E_1 = -E_2$). Конфликты второго рода выполнения этого условия не требуют, но исходят из того, что участникам конфликта необходимо оценивать свои результаты с позиций одного и того же критерия, причём одна из конфликтующих сторон стремится этот критерий максимизировать, а другая – минимизировать.

4. Модель конфликтной ситуации второго рода описывает многие из этих ситуаций точнее, нежели модель антагонистических игр Неймана-Моргенштерна, причём хотя условие антагонизма в такой модели не выполняются, методологически она ничем не отличается от антагонистических игр с нулевой суммой.

5. Модель конфликтной ситуации второго рода путём несложных математических преобразований быть сведена к классической игре с нулевой суммой.

6. Вопросы применения теории антагонистических игр в экономике требуют дальнейшей разработки.

Библиографический список

1. **Нейман, Д.** Теория игр и экономическое поведение / Д. Нейман, О. Моргенштерн. – М.: 1970.
2. **Юрлов, Ф.Ф.** Выбор эффективных решений в экономике / Ф.Ф. Юрлов, А.Ф. Плеханова, М.Ю. Маркитанов. – Нижний Новгород: НГТУ, 2004.
3. **Маркитанов, М.Ю.** О необходимости уточнения понятия конфликтных ситуаций в экономике // Актуальные аспекты экономики, менеджмента и образования: материалы Российской научно-практической конференции; НГТУ. – Нижний Новгород, 2011.

*Дата поступления
в редакцию 27.04.2015*

M.Yu. Markitanov

**MAKING OPTIMAL DECISIONS IN CONDITIONS OF ANTAGONISM
OF INTERESTS. PRACTICAL INTERPRETATION**

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

Propose: To establish the area of practical application of the apparatus of zero-sum games to solve specific problems of economics and management.

Methodology: Theory zero-sum games.

Results: identified the main types of conflict situations in the economy, is a mathematical reducibility conflicts of different types to each other, to offer practical interpretation of the concepts of "strategy players", "optimality criterion" and "win", proved the possibility of application of the zero-sum games to problems of decision making under oligopoly, to the problems of resource allocation and settlement of labor disputes.

Conclusions: The theory of zero-sum games can be applied to a wide enough, though a limited number of tasks. This will not only make decisions under conditions of oligopoly, but the decision of labor conflicts, and building relationships with the state enterprises, and other tasks that require allocation of scarce resources between different economic actors. The problem requires further investigation.

Key words: zero-sum games, conflict, conflict situation, criterion of optimality, strategy, oligopoly, labor conflict, resources.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 324

А.В. Крылова¹, В.В. Мишин², О.С. Рыбкина³, А.А. Фоменков⁴, В.М. Яскевич⁵

ВЫБОРНЫЕ КАМПАНИИ В ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЕ СОБРАНИЕ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ И ГОРОДСКУЮ ДУМУ ГОРОДА НИЖНЕГО НОВГОРОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский филиал гуманитарного университета²,
Нижегородский институт управления Российской академии
народного хозяйства и государственной службы³,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского⁴,
Нижегородский филиал университета Российской академии образования⁵

Статья посвящена особенностям выборных кампаний в Законодательное собрание Нижегородской области и Городскую Думу города Нижнего Новгорода в 2000-е – 2010-е годы. Выявлены общие тенденции проведения выборных кампаний

Ключевые слова: Законодательное собрание Нижегородской области, Городская Дума г. Нижнего Новгорода, выборы, правовая база, избирательные технологии.

Как известно, в демократическом государстве выборы являются единственной возможностью формирования представительных органов власти. Применительно к Российской Федерации это касается не только нижней палаты Федерального Собрания Российской Федерации, но также представительных органов субъектов федерации и представительных органов местного самоуправления.

Представляется актуальным как с научной, так и с прикладной точек зрения рассмотреть наиболее важные особенности выборов в законодательные органы Нижегородской области и областного центр, прошедшие в последние десять с небольшим лет. В XXI веке уже прошли три выборные кампании в Законодательное собрание Нижегородской области (в 2002, 2006 и 2011 годах) и две – в Городскую Думу г. Нижнего Новгорода (2005 и 2010 годах). Нами были выявлены основные их особенности, которые могут быть полезны специалистам и в будущем при проведении выборных кампаний в Нижегородской области и г. Нижнем Новгороде.

Во-первых, следует отметить, что в соответствии с законодательством выборы Законодательного Собрания Нижегородской области и Городской Думы (г. Нижний Новгород) проводились в начале 2000-х годов по мажоритарной системе простого большинства, что позволяло в большинстве случаев проводить выборы в один тур (для сравнения – ранее выборы в областной совет народных депутатов и в городской совет народных депутатов проводились по мажоритарной системе абсолютного большинства). Это позволило удешевить процедуру выборов. Впоследствии были внесены изменения в законодательство, регламентирующее выборы в Нижегородское ОЗС и Городскую Думу г. Нижнего Новгорода. Начиная с 2005 года, выборы стали проводиться не по мажоритарной,

а по смешанной системе. В Законодательное собрание Нижегородской области 25 депутатов стали избираться по одномандатным избирательным округам и 25 депутатов избираются по единому (областному) избирательному округу пропорционально числу голосов, поданных за списки кандидатов, выдвинутые избирательными объединениями [1]. При этом в Нижегородской области было принято решение о факультативном праве политических партий разбивать свои списки на территориальные группы, но этим правом воспользовались не все партии [2, с. 73].

В Городскую Думу г. Нижнего Новгорода большая часть депутатов – 28 – избиралась по одномандатным округам, меньшая – 14 – по партийным спискам [3, с. 20]. Кроме того, была отменена норма о возможности использования избирательного залога. Важно также отметить, что был отменён порог минимальной явки избирателей: выборы признавались состоявшимися при любом количестве проголосовавших.

Таким образом, вследствие достаточно низкого интереса со стороны избирателей к выборам регионального и муниципального уровней, мы вынуждены констатировать отчуждение населения от законодательных органов власти.

Во-вторых, в ходе выборных кампаний в Законодательное собрание Нижегородской области и Городской Думы г. Нижнего Новгорода применялся широкий спектр различных технологий, включая НЛП. Кандидаты в основном позиционировали себя в качестве выходцев из народа, хорошо знающие проблемы простых людей. В качестве поводов для обращения к избирателям активно использовались праздники, круглые даты какого-либо значимого события и т.п. В некоторых случаях на старт предвыборной кампании выходили совсем экзотические кандидаты (например, 2002 году на выборах в ЗС НО в округе № 35 участвовал россиянин с африканскими корнями). Такого рода технологии усиливали интерес населения к выборам.

В-третьих, политические партии, формирующиеся по брендинго-франчайзинговому принципу, во многом ещё не готовы в той же степени отстаивать интересы избирателей, как это делают (пусть и не всегда) депутаты, избранные по мажоритарной системе. В отдельных случаях политические партии использовали манипулятивные технологии – имеется в виду «Партия пенсионеров» на выборах в ЗС НО в 2002 году, от которой в региональный парламент баллотировались в основном бизнесмены отнюдь не преклонного, а порой даже вполне молодого возраста [4, с. 5].

В-четвёртых, начиная со второй половины 2000-х годов, активно использовался административный ресурс. Наиболее яркий пример: в ходе предвыборной кампании 2006 года с дистанции был снят список партии «Родина», что объяснялось, с одной стороны, общефедеральной тенденцией, а, с другой, – наличие среди нижегородских кандидатов в депутаты ОЗС от этой партии харизматического внесистемного политика А.А. Климентьева. Для сравнения: до этого случаи снятия кандидатов с предвыборной гонки были редчайшим случаем.

В-пятых, во второй половине 2000-х годов накал предвыборной борьбы снизился, агитация стала носить зачастую полуритуальный характер. Так, политтехнологи партии «Единая Россия» сделали ставку на общероссийскую известность партии, а так же на то, что «партия делает дело, а остальные лишь критикуют... У «Единой России» есть стратегия развития региона, она конструктивно работает» [5, с. 3].

В целом, если вести речь о ресурсных возможностях, то «Единая Россия» имела подавляющее преимущество над соперниками в трех из пяти видах ресурсов избирательной кампании. Прежде всего, имело место явное преимущество в административном ресурсе (пожалуй, только представители СПС считали, что «Единая Россия» своим административным ресурсом им не мешала [6, с. 2]). Кроме того, наличествовало явное преимущество в СМИ-ресурсе, поскольку помимо обычной рекламной кампании, оплачиваемой из избирательного фонда, партия пользовалась косвенной рекламой через бесплатное освещение деятельности губернатора, председателя ОЗС, мэра Нижнего Новгорода и т.д. Имелось также и преимущество в личном ресурсе. Личный рейтинг губернатора, на момент старта изби-

рательной кампании, был наиболее высоким в области, а личный рейтинг нижегородского мэра, по официальным результатам избирательной кампании октября 2005 года, существенно превышал отметку 50%. В то же время ни губернатор, ни мэр не собирались реально становиться депутатами. В финансовом ресурсе отделение партии, как минимум, не проигрывала соперникам.

В-шестых, в выборных кампаниях борьба политических идей в целом была незначительной. Разумеется, политические партии в ходе предвыборных кампаний периодически заявляли о необходимости поддержать того или иного кандидата, но в целом следует согласиться с В.А. Сергеевой, писавшей, что «роль и значение политической идеологии в региональном избирательном процессе в Нижегородской области [было] невелико» [7, с. 129]. Это обстоятельство было связано не только с одним из проявлений усталости населения от политики, в том числе и от борьбы идей (так, по мнению специалистов, выборы в Государственную думу 1993 года оказались самыми идеологически детерминированными в новейшей российской истории [8, с. 73], а затем идеологический накал снижался от выборов к выборам), но также и тем, что уже в 2003–2004 годах были сформированы консолидирующие общество ценности («Родина», «патриотизм», «возрождение Отечества») [9, с. 12], причём разделялись таковые практически всеми политическими партиями и независимыми кандидатами, участвующими в выборах.

В-седьмых, в 2010-м–2011-м годах ситуация с политической коммуникацией в регионе могла быть охарактеризована как крайне плачевная. Наглядным подтверждением продолжения данной тенденции могли служить предвыборная кампания в Нижегородское ОЗС в начале 2011 года. Практически ни на одном из агитплакатов с фотографиями соответствующих персон не было никакого упоминания о том, что они рекламируют себя именно в качестве будущих нижегородских законодателей. На улицах и в подъездах просто появлялись лица с нарочито минимальным словесным сопровождением (типа «Характер. Знания. Опыт»), но обязательным партийным логотипом, который, вероятно, с точки зрения политдизайнеров, должен сказать на порядок больше, чем самые убедительные слова. Качество предвыборных слоганов не просто заставляло желать лучшего, оно скорее говорило о неадекватности ситуации и порой они составлялись по принципу проверки соискателя на умение петь и плясать в ходе собеседования при трудоустройстве в какую-нибудь юридическую фирму [10, с. 17].

Как продемонстрировали выборные кампании в регионе в 2010-м и 2011-м годах, в плане политических коммуникаций имелись огромные упущения. Вместо каналов коммуникации между гражданами и политическими партиями, в результате которых партии бы аккумулировали требования населения и выражали их политически (что партии и должны делать) в ходу были плакаты с президентом (премьером) с какой-нибудь расплывчатой (в плане содержания) надписью типа «мужской разговор»; использование порой даже постмодернистских слоганов («Будет так!» и т.п.) на фоне портрета того или иного политика.

Отметим также, что для амбициозного политика регионального или муниципального уровня важно было вступить в «правящую партию», дабы иметь возможность пользоваться имеющимся у неё административным ресурсом. Для представителей оппозиции важно было правильно позиционировать себя в этом качестве и вести свою кампанию не только на своей оппозиционности, но и в идеале «от двери к двери», то есть бороться за каждый голос избирателя, подчёркивая ценность каждого своего сторонника.

Следует также указать, что ущербность процесса коммуникации проявляется не только при обращении партии и её лидеров разного уровня к населению, но и в обратном направлении. Во-первых, это проявляется в том, что существенная часть населения в принципе игнорировала на рубеже 2000-х – 2010-х годов *любые* выборы, и, как следствие, не восприимчива к политическим месседжам. Впрочем, у этой части населения, судя по всему, отсутствовало стремление что-либо ответить власти, политическим партиям и партийным лидерам. То есть на момент начала 2010-х годов сложилась ситуация, при которой политические

партии и иные акторы существовали почти что в ином пространстве, нежели существенная часть населения.

В результате задача власти – обеспечить явку на выборах различных категорий населения. При этом в сельской местности эта задача выполнялась проще, в мегаполисах оппозиция всё чаще заявляла о фальсификациях. Кстати, там была заметна ещё одна тенденция: голосование «против всех», поскольку уровень доверия к власти был достаточно низок среди горожан. При этом вряд ли можно верить в то, что мелкие и средние предприниматели, студенчество, интеллигенция потеряли доверие только к «партии власти» и приобрели к КПРФ и ЛДПР. Справедливости ради отметим, что две указанные партии (равно как и остальные, зарегистрированные в Минюсте) также ни в коей мере не являли собой пример совершенства в плане политических коммуникаций.

Таким образом, во многом выборы в региональный парламент и законодательный орган местного самоуправления областного центра развивались по спирали. В начале 2000-х годов, благодаря мастерству политтехнологов, выборные кампании были действительно интересными с точки зрения использования политтехнологий, однако при этом наблюдалось в целом равнодушное отношение населения к выборам как к процессу, способному изменить состав представительных органов власти в сторону приближения депутатского корпуса к интересам избирателей. Мало того, согласимся с А.В. Дахиным, что на рубеже 1990-х – 2000-х годов «машина государственной власти поперхнулась институтом выборов. Она вобрала его в таком количестве, что не смогла «переварить»» [11, с. 90]. Впрочем, ничуть не в меньшей степени выборами поперхнулось и население, в результате чего имели место индифферентное отношение к выборам как к демократической процедуре и отмена ряда таковых (упразднение всенародных выборов глав региона и т.п.).

Впоследствии на смену изощрённым политтехнологиям пришёл административный ресурс, ранее использовавшийся лишь весьма ограниченно. В начале 2010-х годов со стороны некоторых оппозиционных кандидатов началось возобновление использования избирательных технологий, направленных на преодоление индифферентного отношения граждан к политике. Именно таковые оказались действенными для преодоления административного ресурса, используемого кандидатами от «партии власти». Иными словами, политтехнологии были сменены административным ресурсом, который, в свою очередь, начал опять замещаться политтехнологиями. Впрочем, говорить только о движении по спирали не следует, поскольку на смену индифферентности + административному ресурсу приходят политтехнологии + попытка вовлечь население в решение проблем, которые не решаются действующей властью, а не политтехнологии + индифферентность масс.

Представляется, что в том числе и неоднозначный опыт выборов в представительные органы власти в Нижнем Новгороде привёл к новшествам в законодательстве о выборах, а именно к принятию Федерального закона № 136-ФЗ [12]. Им, в частности, предусматривается возможность нового порядка формирования городской думы путём избрания депутатов из состава представительных органов внутригородских районов, то есть имеет место попытка «приблизить» депутатов к населению, так как на районном уровне по определению больше возможностей побеждать на выборах за счёт механизмов, наглядно демонстрирующих общность повседневных интересов кандидата в депутаты и его избирателей.

Библиографический список

1. Устав Нижегородской области (Закон Нижегородской области от 30 декабря 2005 г. N 219-3 // Электронный доступ: http://constitution.garant.ru/region/ustav_nijegor/chapter/7/#block_700
2. **Кынев, А.В.** Территориальные группы партийных списков на выборах в российских регионах: сценарии и угрозы // Pro nunc. Современные политические процессы (Тамбов). 2009. Т. 9. № 1. С. 69–95.
3. Устав города Нижнего Новгорода. Н. Новгород, б.м., б.г. – 58 с.
4. **Власов, В.** Нижегородские «пенсионеры» к размену с губернатором готовы // Ленинская смена. 2007. 22 фев. С. 5.

5. **Комаров, Е.** Наш голос – решающий // Нижегородский рабочий. 2006. 7 мар. С. 3.
6. «Круглый стол»: анализ выборов // Нижегородская правда. 2006. 21 мар. С. 2.
7. **Сергеева, В.А.** Современные политические идеологии в региональном избирательном процессе Нижегородской области: 1997–2004 г.г.: дисс. канд. полит. наук: 23.00.02. – Н. Новгород. 2005. – 173 с.
8. **Лебедев, И.В.** Идеологический фактор в партийном строительстве Российской Федерации в 1992–2003 годах // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2006. Т. 7. № 21–2. С. 71–77.
9. **Киняшева, Ю.Б.** Выборы как сложносоставной политической конфликт в современной России: дисс. ... канд. полит. наук: 23.00.02. Тула, 2007. – 219 с.
10. **Макарычев, А.** Кризис слов как политический феномен // Новая газета в Нижнем Новгороде. 2011. 18 фев. С. 14.
11. **Дахин, А.В.** Региональная политическая конкуренция в новых условиях (на примере Нижегородской области // Россия и современный мир. 2007. № 2. С. 88–108.
12. Федеральный закон от 27 мая 2014 г. № 136-ФЗ «О внесении изменений в статью 26.3 Федерального закона «Об общих принципах организации законодательных (представительных) и исполнительных органов государственной власти субъектов Российской Федерации» и Федеральный закон «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» // Электронный доступ: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163524/

*Дата поступления
в редакцию 07.05.2015*

A.V. Krylova¹, V.V. Mishin², O.S. Rybkina³, A.A. Fomenkov⁴, V.M. Yaskevich⁵

**THE ELECTIONS TO THE LEGISLATIVE ASSEMBLY
OF NIZHNY NOVGOROD REGION AND CITY DUMA OF NIZHNY NOVGOROD**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Humanitarian University²,
Nizhny Novgorod State Government University³,
Nizhny Novgorod State University n.a. N.Y. Lobachevsky⁴,
Russian Education Academy⁵

The paper concerns with the elections to the legislative assembly of Nizhny Novgorod Region during 2000-2010. General tendencies of elective technologies are revealed.

Key words: legislative assembly of Nizhny Novgorod Region, City Duma of Nizhny Novgorod, election, elective technologies.

УДК 947.8

Т.Л. Полусмак¹, А.Л. Симонов², А.И. Торопкин³, Ю.В. Шустова⁴

ПОЛИТИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ГОРЬКОВСКОЙ-НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ НА РУБЕЖЕ 1980-Х – 1990-Х ГОДОВ: ПРОБЛЕМЫ ИСТОЧНИКОВЕДЕНИЯ И ИСТОРИОГРАФИИ

Нижегородский институт управления
Российской академии народного хозяйства и государственной службы¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²,
Нижегородская правовая академия³,
Филиал Сочинского государственного университета в г. Нижний Новгород⁴

Статья посвящена специфике исторических источников и степени разработанности проблематики, связанной с историей политических процессов в Горьковской, а затем в Нижегородской области в конце 1980-х – начале 1990-х годов.

Ключевые слова: Горьковская область, Нижегородская область, политическая история, исторические источники, архивные документы, периодическая печать, воспоминания, историография.

Одним из важнейших периодов в отечественной истории является рубеж 1980-х – 1990-х годов. В самом деле, именно в эти годы возрождается частное предпринимательство, складываются новые политические институты и в итоге, после распада СССР возникают новые государства. Вместе с тем, нельзя не признать, что интерес со стороны исследователей к данному периоду истории нашей страны сравнительно невысок.

В определённой степени данное обстоятельство можно объяснить следующим образом. Специалисты в области исторического знания в основном изучают более ранние периоды (например, А.В. Усягин [1], А.В. Крылова [2, 3] - период гражданской войны и НЭПа), в то время как политологи анализируют в основном процессы, проходившие в более позднее время (а также, разумеется, и имеющие место сейчас). Иными словами, 1989–1993 годы во многом выпадают из внимания со стороны исследователей в области гуманитарного знания, хотя это не исключает наличия фундаментальных работ по политической истории именно этого периода [4, 260 с.]. На региональном уровне политические события рубежа 1980-х – 1990-х годов изучены, как правило, ещё в меньшей степени по сравнению с общенациональным уровнем. По нашему мнению, именно так обстоит дело и в Нижегородской области.

Относительно источниковой базы по политической истории Горьковской-Нижегородской области рубежа 1980-х–1990-х годов необходимо указать на несколько наиболее значимых обстоятельств. Во-первых, сохранился и содержится в Государственном общественно-политическом архиве Нижегородской области (ГКУ ГОПАНО) большой пласт источников, посвящённых деятельности КПСС в регионе в 1989–1991 гг. Наряду с документами, касающимися экономического состояния, имеется немало информации и о политических событиях, а также об умонастроениях жителей области, о неформальных политизированных организациях и т.п. Часть этих документов уже опубликована стараниями сотрудников архивов и преподавателей высшей школы в 6-м томе сборника «Общество и власть. Российская провинция 1917–1980-е годы» [5, 971 с.].

Во-вторых, в российских архивах (и в нижегородских в том числе) содержится мало документов политических организаций, действовавших в конце 1980-х – начале 1990-х годов (за исключением КПСС и ВЛКСМ). Так, в ГКУ ГОПАНО имеются документы региональных отделений КПРФ и «Демократической России» (фонд № 7865). Наличествуют также и мате-

риалы ЛДПР, однако они относятся в лучшем случае ко второй половине 1990-х годов. Кроме того, в личном фонде Е.В. Кузнецова (фонд № 7866) содержится большой объём материалов о деятельности структур русской национально-патриотической направленности, действовавших в стране и в регионе в начале 1990-х годов. При этом же документы большого количества других политических объединений разной политической направленности и по сей день не были сданы в региональные архивы и, соответственно, недоступны исследователям. Отчасти данное обстоятельство объясняется тем, что представители политических партий и движений не уделяли большого внимания передаче своей документации в архивы, а нормы об обязательном порядке сдачи партийных материалов в архивы не существует [6, с. 22].

Кроме того, исследователями уже отмечалось, что «документальный фонд партий, действовавших короткое время, был крайне беден по составу документов, носил разрозненный характер и принимать его на постоянное хранение в архивы в качестве самостоятельных фондов было нецелесообразно» [7, с. 16]. Отметим также, что даже политические партии, существовавшие относительно длительный период и добивавшиеся определённых успехов (создание парламентской фракции), далеко не всегда охотно пополняют архивы своей документацией. Нередки случаи заключения соглашения о передаче материалов, не приводящие, однако, на практике к чему-либо реальному, однако столь неблагоприятное поведение представителей политических партий не зависит от ряда других характеристик (возраст лидера, его положение в государственном аппарате, ценностные ориентиры, политическая позиция и т.п.).

В-третьих, у российских архивов не всегда имеются возможности для систематизации поступивших материалов. Это обстоятельство касается в первую очередь предвыборных материалов 1990-х – первой половины 2000-х годов. Впрочем, нельзя не признать, что в некоторых случаях и политические материалы, не связанные непосредственно с выборами, даже поступая в тот или иной архив, также далеко не сразу становятся доступными для исследователей.

В-четвёртых, в последние годы уходят из жизни видные в прошлом активисты политических организаций, действовавших в регионе на рубеже 1980-х – 1990-х годов: Г.Л. Абрамян, Д.В. Игошин, В.Ф. Калентьев. Однако документы и материалы, прямо или косвенно связанные с их политической деятельностью, пока ещё недоступны для исследователей. Разумеется, винить в этом работников архивов ни в коем случае не следует, однако нет оснований утверждать, что в областном центре действительно ведётся активная работа в деле сохранения документов и артефактов, относящихся к рубежу 1980-х – 1990-х годов.

Естественно, важным источником по изучаемому нами периоду являются воспоминания. Следует признать, что почти никто из нижегородцев, более или менее активно участвовавших в политических событиях в регионе на рубеже 1980-х – 1990-х годов, не оставил воспоминания. По сути, можно упомянуть в связи с этим лишь бывшего губернатора области Б.Е. Немцова за его книгу «Провинциал» [8, 149 с.], его оппонента А.А. Климентьева (его книга именуется «Между властью и тюрьмой» [9, 172 с.]), журналистку Т. Васильеву [10, 116 с.] и видного нижегородского учёного, активиста организаций русской национально-патриотической направленности Е.В. Кузнецова [11, 167 с.]. Кроме того, в 2009 году был издан сборник, состоящий из небольших по объёму воспоминаний представителей нижегородской политической элиты и бизнес-сообщества о событиях конца 1980-х – первой половины 1990-х годов [12, 460 с.]. Впрочем, нельзя не признать, что во всех перечисленных трудах многим политическим событиям рубежа 1980-х – 1990-х годов уделено недостаточно внимания, описание ряда значимых для региона событий носит весьма фрагментарный характер.

Учитывая изложенное, можно утверждать, что на сегодняшний день основным историческим источником по политической истории региона рубежа 1980-х – 1990-х годов является периодическая печать изучаемого периода. В первую очередь это касается наиболее из-

вестных региональных газет: «Горьковской правды» (с сентября 1990-го – «Нижегородской правды»), «Горьковского рабочего» (с сентября 1990-го – «Нижегородского рабочего»), «Ленинской смены». Интересные сведения о политических событиях публиковались также и в менее известных изданиях: газетах «Нижегородские новости», «Город и горожане», «Земля нижегородская», «Курьер».

Именно периодическая печать регионального уровня содержит информацию о таких малоизученных проблемах, как деятельность политизированных неформальных объединений второй половины 1980-х годов [13, с. 2; 14, с. 2; 12, с. 3; 13, с. 2.; 17, с. 2], «Демократическая платформа в КПСС» [18, с. 2; 16, с. 4–5], массовые митинги и манифестации [20, с. 6–7], альтернативные выборы в местные советы [21, с. 4.]. По нашему мнению, обращение к публикациям рубежа 1980-х – 1990-х годов демонстрирует, что целый ряд проблем, имевших место в регионе в те годы, не утратил своей актуальности и сегодня.

Весьма обширный пласт информации в региональных печатных изданиях содержится о деятельности политических организаций в 1992–1993 годах. Среди авторов статей в первую очередь заслуживают внимания такие нижегородские корреспонденты, как И. Виноградов, В. Киселёв, С. Смирнов, М. Спирин. Благодаря их текстам исследователям доступны материалы о политической борьбе между сторонниками и противниками Б.Н. Ельцина в Нижегородской области, о внутрипартийных делах, а также о некоторых политических мероприятиях общероссийского значения, проводившихся в Нижнем Новгороде (имеются в виду Учредительный съезд Русского национального собора, Учредительный съезд Российского движения Демократических реформ, Всероссийский съезд рабочих, крестьян, специалистов и служащих).

Степень изученности политических процессов в Горьковской-Нижегородской области на рубеже 1980-х – 1990-х годов невелика. Признанные нижегородские специалисты в области региональных политических процессов – в первую очередь, А.В. Дахин, М.А. Казаков, А.С. Макарычев, Н.П. Распопов – в своих трудах обращались преимущественно к реалиям второй половины 1990-х и 2000-х годов, в связи с чем более ранние события ими практически не анализировались. По сути, политические процессы в регионе на рубеже 1980-х – 1990-х годов стали объектом исследования преимущественно у двух специалистов, занимающихся изучением российской политической истории XX столетия.

Так, нижегородский исследователь А.П. Калачев большое внимание уделил ряду политических проблем региона в позднесоветский и ранний постсоветский периоды. В частности, им была изучена роль гражданского общества в борьбе со строительством Горьковской АСТ и проанализированы особенности появления политических организаций на фоне этой борьбы [22, с. 109–111]. Кроме того, в его работах дана характеристика процесса функционирования регионального отделения Движения «Демократическая Россия», в том числе проанализированы особенности его упадка под влиянием как общероссийских, так и исключительно местных, нижегородских факторов [23, с. 108–112].

Исследователь из ННГУ им. Н.И. Лобачевского А.А. Фоменков в нескольких статьях затронул отдельные аспекты, напрямую связанные с политической историей региона на рубеже 1980-х – 1990-х годов. В частности, им была рассмотрена ситуация с неопубликованными источниками по истории региональных отделений политических партий в постсоветский период [24, с. 360–363.]. Кроме того, А.А. Фоменков обратил внимание на то обстоятельство, что во многих случаях именно приезд в регион партийного лидера (часто в окружении своих наиболее известных соратников и единомышленников) содействовал усилению активности их провинциальных однопартийцев [25, с. 191–194.]. Именно так, в частности, и происходило в Нижегородской области, и особенно в областном центре в начале 1990-х годов. В одной из своих статей А.А. Фоменков проанализировал особенности становления организаций право-консервативной направленности в областном центре на рубеже 1980-х –

1990-х годов (имеются в виду в первую очередь такие структуры, как «Память» и «Отчизна») [26, с. 126–130.].

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Во-первых, имеются трудности с источниковой базой по истории рубежа 1980-х – 1990-х годов. Во многом данное обстоятельство связано с тем, что существенная часть граждан ещё не осознаёт события двух с половиной десятилетней давности как *Историю*. Как следствие, многие артефакты той эпохи неосознанно уничтожаются (от них просто избавляются как от чего-то обыденного, ставшего в определённый момент времени лишним), но через *n*-е количество лет чудом сохранившиеся артефакты такого рода будут представлять большую ценность (и не только для исследователей) и прежде всего по причине их малого количества, хотя изначально они выпускались в больших объёмах. Это касается, например, предвыборных агитационных материалов, хотя, разумеется, и не только их.

Во-вторых, имеются трудности с сохранением исторических источников недавней отечественной истории, связанные с работой архивов, в том числе и с их финансированием.

В-третьих, в настоящее время важнейшим источником по политической истории региона является периодическая печать, содержащая большой пласт информации по самым разным проблемам, в том числе и тем, что пока не привлекают внимание исследователей или же привлекают таковое в малом объёме.

В-четвёртых, тематика, связанная с политическими событиями рубежа 1980-х – 1990-х годов актуальна, но мало изучена специалистами в области истории и политологии, особенно на уровне регионов (нижегородский пример этот тезис подтверждает в полной мере).

В-пятых, едва ли не в наименьшей степени внимание исследователей привлекают идейные основы и деятельность фракций в рамках КПСС, политических организаций начала 1990-х годов, а также механизмы самоорганизации гражданского общества в позднесоветский период (нижегородский пример это подтверждает со всей очевидностью).

В-шестых, наиболее перспективными направлениями для дальнейших исследований являются политические процессы, протекавшие в стране в 1989-м – 1991-м годах. В первую очередь это касается углубления идейных противоречий в КПСС, формирования политических объединений в позднеперестроечный период, а также специфики политической активности масс (имеются в виду митинги и манифестации) в последние годы существования СССР. Эту проблематику в последние годы разрабатывает ряд авторов, например, О.М. Решетников [27, с. 26–28; 28, с. 20–21], С.А. Величко [29, с. 25–30], А.В. Бородатов [30, с. 18–21], Е.В. Буянов [31, с. 10–17], Э.Е. Глезин, М.И. Смирнова [32, с. 109–117]. В их работах затронут в том числе и региональный аспект, однако к опыту Горьковской-Нижегородской области они не обращались.

Библиографический список

1. **Усягин, А. В.** Письма коммунистов А.А. Жданову. 1927-1929 гг. / А.В. Усягин, А.В. Крылова. // Исторический архив. 2008. № 4. С. 3–15.
2. **Крылова, А.В.** В.М. Молотов и конфликт в руководящих органах Нижегородской губернии в 1920 г. // Вопросы истории. 2006. № 12. С. 147–152.
3. **Крылова, А.В.** Взаимодействие субъектов партийного и государственного управления в процессе политической реорганизации: опыт деятельности Нижегородского губкома в 1918–1921 гг. // Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3. С. 52–62.
4. **Согрин, В.В.** Политическая история современной России. 1985–2001: от Горбачёва до Путина / В.В. Согрин. – М.: Инфра-М–Весь мир, 2001. – 260 с.
5. Общество и власть. Российская провинция 1917–1980-е годы (по материалам нижегородских архивов): в 5 т. / Ин-т Российской истории РАН [и др.]; [сост.: А.А. Кулаков, В.В. Смирнов, Л.П. Колодникова]. М. – Н. Новгород: Институт российской истории РАН, 2010. Т. 6. – 971 с.

6. **Фоменков, А.А.** История русского национально-патриотического движения в 1955 – 1993 гг. Автореф. дисс. ... докт. ист. наук: 07.00.02. Ярославль, 2012. – 47 с.
7. **Мещерина, Т.А.** Комплектование государственных архивов как проблема сохранения исторических памятников в условиях экономических и социальных преобразований // Новая и новейшая история. 2006. № 5. С. 13–19.
8. **Немцов, Б.** Провинциал / Б. Немцов. – М.: Вагриус, 1997. – 149 с.
9. **Климентьев, А.** Между властью и тюрьмой / А. Климентьев. – Саров: СГТ, 2008. – 172 с.
10. **Васильева, Т.** Записки из сумасшедшего времени / Т. Васильева. – Н. Новгород: б.м., 1995. – 116 с.
11. **Кузнецов, Е.В.** Одна жизнь менялась на иную. Мемуары русского историка / Е.В. Кузнецов. – Арзамас: АГПИ, 2008. – 167 с.
12. Как мы открывали город. Эпоха 90-х глазами нижегородцев / сост. Владимир Бессараб, Олег Рябов. – Н. Новгород: Книги, 2009. – 460 с.
13. **Галай, Ю.** Закружились бесы разные // Горьковский рабочий. 1990. 22 фев. С. 2.
14. **Захаров, В.** Какие они? Кто они? // Ленинская смена (Горький). 1989. 20 окт. С. 2.
15. **Леонов, М.** Неформалы... в горисполкоме // Горьковский рабочий. 1990. 16 июня. С. 3.
16. **Мигов, А.** Сталактиты и сталагмиты // Ленинская смена. 1989. 24 июня. С. 2.
17. Эта «непонятная» молодёжь. Беседа корреспондента «Ленинской смены» со старшим преподавателем Горьковской высшей партийной школы, членом совета городского дискуссионного клуба «Буревестник» А.О. Сухановым // Ленинская смена. 1989. 20 авг. С. 2.
18. Выбор / Интервью Г. Шагиевой с делегатом Всесоюзной учредительной конференции по созданию Демократической платформы в КПСС О.Г. Рожко // Горьковский рабочий. 1990. 20 мар. С. 2.
19. Наступил час решений / Интервью Г. Шагиевой с членом координационного совета Демократической платформы О.Г. Рожко // Нижегородский рабочий. 1990. 26 сент. С. 4–5.
20. Александров В. Урок демократии // Курьер (Горький). 1990. 25 фев. – 10 мар. С. 6–7.
21. Нелегко быть кандидатом / Интервью В.И. Боляка Сергею Скатову // Курьер (Горький). 1990. 25 фев. – 10 мар. С. 4.
22. **Калачев, А.П.** К вопросу о роли противодействия запуску Горьковской АСТ в деле становления политических организаций в регионе // Актуальные вопросы истории: Материалы межвузовской научной конференции. 25 апреля 2012 года. Н. Новгород: НКИ, 2012. С. 109–111.
23. **Калачев, А.П.** О специфике функционирования Движения «Демократическая Россия» на региональном уровне (на примере Нижегородской области) // Научное мнение. 2013. № 6. С. 108–112.
24. **Фоменков, А.А.** Архивные источники по истории современных политических партий (на примере Нижегородского региона) // Лествица. Материалы научной конференции по проблемам источниковедения и историографии памяти профессора В.П. Макарихина. Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (22 мая 2003 г.). Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. С. 360–363.
25. **Фоменков, А.А.** К вопросу о посещении Нижнего Новгорода лидерами оппозиционных политических партий и движений в начале 1990-х гг. // Актуальные вопросы истории. Материалы межвузовской научной конференции. 20 апреля 2011 г. Н.Новгород: НКИ, 2011. С. 191–194.
26. **Fomenkov A.A.** To establishment right-wing parties in the city of Gorky – Nizhny Novgorod, between the end of 1980's and beginning of 1990's // European researcher. 2012. № 2(17). С. 126–130.
27. **Решетников, О.М.** Неформальные объединения в СССР в годы перестройки // Власть. 2009. № 11. С. 26–28.
28. **Решетников, О.М.** Формирование платформ в КПСС // Исторические науки. 2011. № 4. С. 20–21.
29. **Величко, С.А.** Трансформация общественно-политической обстановки в Сибири в 1985–1991 гг. // Омский научный вестник. 2006. № 4. С. 25–30.
30. **Бородатов, А.А.** Новые политические партии и общественные движения в средствах массовой информации Амурской области (конец 80–начало 90-х гг. XX в.) // Вестник Амурского государственного университета. Сер.: Гуманитарные науки. 2010. № 48. С. 18–21.

31. **Буянов, Е.В.** Возникновение и развитие многопартийности на юге Дальнего Востока (конец 80-х–90-е гг. XX в.): историография проблемы в российских и региональных исследованиях // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Гуманитарные науки. 2011. № 52. С. 10–17.
32. **Глезин Э.Е., Смирнова М.И.** Особенности становления многопартийной системы в РСФСР (вторая половина 1980-х гг.) / Э.Е. Глезин, М.И. Смирнова // Вестник Московского энергетического института. 2006. № 3. С. 109–117.

*Дата поступления
в редакцию 07.05.2015*

T.L. Polusmak, A.L. Simonov, A.I. Toropkin, Yu.V. Shustova

**THE POLITICAL HISTORY OF GORKY - NIZHNY NOVGOROD REGION
AT THE TURN OF 1980-1990: THE PROBLEMS ISTECHNOLOGY
AND HISTORIOGRAPHY**

Nizhny Novgorod State Government University¹,
Nizhny Novgorod State University n.a. N.Y. Lobachevsky²,
Nizhny Novgorod Academy of Law³,
A branch of Sochi state University in Nizhny Novgorod⁴

The article is devoted to historical sources and degree of exploration of the issues related to the history of political processes in Gorky, and then in Nizhny Novgorod region in the late 1980's – early 1990-ies.

Key words: Gorky region, Nizhny Novgorod region, political history, historical sources, archival documents, periodicals, memoirs, historiography.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Зими́на Светлана Валерьевна – канд. физ.-мат. наук, доцент ННГУ им. Н.И. Лобачевского;
Zimina-sv@yandex.ru

Львов Анатолий Егорович – канд. техн. наук, старший научн. сотрудник, нач. отдела 3.2 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова»;
8-831-469-20-25

Иванов Алексей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8-831-436-82-33

Ивойлова Мария Михайловна – инженер ФГУП ФНПЦ «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vKozlov@niis.nnov.ru

Шишков Глеб Иванович - канд. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 8-831-436-82-33

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМ

Куркин Андрей Александрович – д-р физ. мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработок, зав. кафедрой, науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
aakurkin@gmail.com

Козелков Андрей Сергеевич – к.ф.-м.н., начальник научно-исследовательской лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», докторант кафедры «Прикладная математика» Института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ;
A.S.Kozelkov@vniief.ru

Курулин Вадим Викторович – м.н.с. отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»;
kurulin@mail.ru

Мелешкина Дарья Павловна – м.н.с. отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».
dasha2008k@mail.ru

Лашкин Сергей Викторович – начальник группы отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

S.V.Lashkin@itmf.vniief.ru

Пелиновский Ефим Наумович – д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» Института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ, главный научный сотрудник отдела нелинейных процессов в геофизике Института прикладной физики РАН;

pelinovsky@gmail.com

Тятюшкина Елена Сергеевна – математик отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»;

Leno4ka-07@mail.ru

Тарасова Наталья Владимировна – с.н.с. отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»;
tara@vniief.ru

Тихонов Дмитрий Евгеньевич – Российский университет дружбы народов, специалист по прогнозированию
d.e.tikhonov@gmail.com

Шамин Роман Вячеславович – д-р физ.-мат. наук, Российский университет дружбы народов, зав. кафедрой;
roman@shamin.ru

Шарипова Ирина Леонидовна – м.н.с. отдела 0813 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».
mira.mailbox@yandex.ru

Юдин Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, Российский университет дружбы народов, доцент;
yudinorel@gmail.com

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Логанов Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
oaa-ood@yandex.ru

Поляков Дмитрий Вадимович – канд. техн. наук, старший преподаватель ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»;

dimadress@yandex.ru

Попов Андрей Иванович – канд. пед. наук, доцент, начальник отдела педагогической инноватики и электронного обучения ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»;

olimp_porov@mail.ru

Лазарев Владимир Александрович – ЗАО «Интел А/О» (Н. Новгород), инженер-программист; аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vladimir.lazarev@intel.com

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Гребнева Татьяна Николаевна – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.nnov.ru

Конищев Константин Борисович – зам. начальника лаборатории «Специальные труды и соединения» ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва);

tkm@nntu.nnov.ru

Конищев Борис Петрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.nnov.ru

Пахомов Дмитрий Святославович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

kpmis@nntu.nnov.ru

Поздышев Анатолий Иванович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.nnov.ru

Мальцев Игорь Валерьевич – начальник бюро отдела 61 ПАО «НАЗ «Сокол»»;

tkm@nntu.nnov.ru

Чуркин Михаил Григорьевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tkm@nntu.nnov.ru

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Баринов Александр Александрович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

lxbarinov92@mail.ru

Бородина Вера Евгеньевна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

veb91@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

Дмитриев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

nntu@nntu.nnov.ru

Заборонкова Татьяна Михайловна -

д-р физ.-мат. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

t.zaboronkova@rambler.ru

Игнатов Евгений Дмитриевич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

ignatov.e@mail.ru

Комаров Алексей Владимирович – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

komarovalexej@yandex.ru

Легчанов Максим Александрович – канд. техн. наук, доцент, зам.директора ИЯЭиТФ;

legchanov@mail.ru

Полозкова Екатерина Николаевна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

polozkova-ekaterina@yandex.ru

Пронин Алексей Николаевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

proninalexsei@mail.ru

Солнцев Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

dn.solntsev@pochta.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

vlad.sorokin1987@mail.ru

Табекин Александр Андреевич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

tabekin91@gmail.com

Хлюнев Андрей Александрович – инженер ООО «ВЗОР»;

market@vzor.nnov.ru

Хробостов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭиТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

khrobostov@nntu.nnov.ru

Фарафонов Владимир Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

Яшина Наталья Федоровна – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; gematityash@mail.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Беляков Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИИИР НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

nauka@nntu.nnov.ru

Зубов Павел Павлович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

hunter752@mail.ru

Макаров Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; makvl2010@gmail.com

Зезюлин Денис Владимирович – канд. техн. наук, старший 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

Кострова Зоя Александровна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

zzz2015@ya.ru

Куркин Андрей Александрович – д-р физ.мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработок, зав. кафедрой, науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; aakurkin@gmail.com

Михеев Артур Владимирович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

micheev-av@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Захаров Лев Анатольевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tseu@nntu.nnov.ru

Захаров Илья Львович – канд. техн. наук, докторант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zakharov_oi@mail.ru

Тарасов Алексей Николаевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ведущий инженер-конструктор ООО ОИЦ; tarasov_alexey@list.ru

Дегтярев Александр Владимирович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зам.начальника отдела энергетических установок ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева»; alexandr_dvs@mail.ru

Лобастов Валерий Павлович – канд. техн. наук, ведущ. специалист Верхне-Волжского филиала Российского Речного Регистра; lobastov@rivregnn.ru

Зеличенко Евгений Валерьевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zelichenko@rivregnn.ru

Скворцов Александр Валерианович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; sancho-starling@yandex.ru

Зеленов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tseu@nntu.nnov.ru

Семашко Петр Владимирович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tseu@nntu.nnov.ru

Земсков Иван Валентинович – начальник СМУ ООО «Теплоэнергоремонт – Москва» (г. Н. Новгород) +7-910-888-32-63

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Асабин Анатолий Александрович – к.т.н., доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

asanatoliy@yandex.ru

Дарьенков Андрей Борисович – канд. техн. наук, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

fae@nntu.nnov.ru

Кралин Алексей Александрович, к.т.н., зав. кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева; toe@nntu.nnov.ru

Серебряков Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» института электроэнергетики Нижегородского государст-

венного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
serebryakov@ardman.ru

Соснина Елена Николаевна, д.т.н., профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

sosnyna@yandex.ru

Самоявчев Иван Сергеевич - старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
epa131@nntu.nnov.ru

Соколов Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
epa131@nntu.nnov.ru

Титов Владимир Георгиевич, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
fae@nntu.nnov.ru

Чернов Евгений Александрович, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;
fae@nntu.nnov.ru

Хватов Олег Станиславович - д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Волжского государственного университета водного транспорта;
khvatov@vgavt-nn.ru

Шахов Андрей Валентинович – канд. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
epa130@nntu.nnov.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Белявский Георгий Иванович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
tkm@nntu.nnov.ru

Большаков Александр Алексеевич - технолог ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»;
mto@nntu.nnov.ru

Гончар Александр Леонидович – канд. техн. наук, старший научн. сотрудник ИПМ РАН, Нижний Новгород;
imndt31@mts-nn.ru

Зинивьев Юрий Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
tkm@nntu.nnov.ru

Колпаков Алексей Александрович – канд.техн. наук, главный металлург ОАО «ГАЗ»;

efremovaog@gaz.ru

Кузнецов Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
tkm@nntu.nnov.ru

Смирнов Алексей Сергеевич – инженер - металлург ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»;
nniimm_prometei@mail.ru

Самохвалов Сергей Геннадиевич – инженер – технолог ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»;
nniimm_prometei@mail.ru

Слузов Павел Анатольевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
sluzov@mail.ru

Седунов Валерий Константинович – генеральный директор ОАО «Семеновский литейно-механический завод»;
831-625-21-01

Тумакова Наталья Сергеевна - инженер – технолог ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»;
nniimm_prometei@mail.ru

Тихонов Владимир Петрович – канд. техн. наук, начальник отдела ОАО Нижегородский научно-исследовательский институт машиностроительных материалов «Прометей»;
nniimm_prometei@mail.ru

Назаров Владимир Германович – зам. директора ООО Научно-производственный центр «Эпсилон», г. Нижний Новгород;
mto@nntu.nnov.ru

Леушин Игорь Олегович - д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева»;
mto@nntu.nnov.ru

Руденко Александр Леонидович - гл. инженер ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго», г. Набережные Челны.
ral-1@mail.ru

Миронов Анатолий Алексеевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева; miran56@mail.ru

Мишакин Василий Васильевич – д-р техн. наук, зав. лаб. ИПМ РАН, Нижний Новгород; imndt31@mts-nn.ru

Швецов Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tkm@nntu.nnov.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

Галкин Владимир Михайлович – д-р физ.-мат. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.nnov.ru

Ерофеева Лариса Николаевна – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.nnov.ru

Лещева Светлана Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.nnov.ru

Сухов Виктор Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.nnov.ru

Толкачев Иван Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vm@nntu.nnov.ru

Козлов Валерий Яковлевич – канд. физ.-мат. наук, доцент Вятского государственного технического университета; vm@nntu.nnov.ru

Паутов Александр Николаевич – канд. техн. наук, ведущий специалист НИИ Механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского; vm@nntu.nnov.ru

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Дубик Елена Андреевна – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; DubikAndrey@mail.ru

Басова Лариса Николаевна – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 89092878927

Маркитанов Михаил Юрьевич – канд. экон. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; mikhail.markitanov@yandex.ru

Морозова Галина Алексеевна – д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой Нижего-

родского института управления – филиала РАНХиГС
k-market@vvpaa.vvags.ru

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

Крылова Анна Владимировна – канд. ист. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; aespérance@yandex.ru

Мишин Вячеслав Владимирович – студент Нижегородского филиала Московского гуманитарного института; malgoroda-nn@inbox.ru

Рыбкина Ольга Сергеевна – канд. полит. наук, доцент Нижегородского института управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы; olya_07@mail.ru

Симонов Алексей Леонидович – к.и.н., доцент кафедры теории политики и коммуникаций ИМОМИ ННГУ. alsimonov@gmail.com

Полусмак Татьяна Львовна – к.ю.н., доцент НИУ РАНХиГС
polusmak.tat@yandex.ru

Торопкин Александр Иванович – к.и.н., доцент Приволжского филиала Российского государственного университета правосудия; torp54@rambler.ru

Фоменков Артём Александрович – д-р. ист. наук, доцент ННГУ им. Н.И. Лобачевского; artjom2310@inbox.ru

Шустова Юлия Владимировна – канд. ист. наук, доцент филиала Сочинского госуниверситета в г. Н. Новгород; nci_julia@inbox.ru

Яскевич Владимир Михайлович – студент Нижегородского филиала Университета Российской академии образования; yacik82@mail.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 научной литературы:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, 1-363/3
Телефон: 8(831)257-86-63, 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. Рекомендуются следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, 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

№ 2 (109)

Редакторы: **О.В. Пугина, Н.Н. Максимова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция научной литературы:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 05.06.2015. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 37,75. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
СМИ в Роскомнадзоре
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013