

**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**

**№ 1 (98)**

**Нижний Новгород 2013**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

**Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. № 1 (98). – 329 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), В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),  
Т.В. Третьякова (отв. редактор), Т.П. Новикова (технич. редактор)  
**Члены редколлегии:** В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев,  
В.В. Глебов, А.М. Groшев, А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, О.С. Кошелев, В.Ф. Кулепов,  
А.А. Куркин, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов, В.П. Хранилов,  
С.Н. Хрунков, Е.А. Чернышов, В.М. Галкин

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2013

**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**

**№ 1 (98)**

**Nizhni Novgorod 2013**

**Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev**  
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. – Nizhni Novgorod, 2013. № 1 (98). – 329 p.

*The journal is issued 4 times a year*

**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), T.V. Tretyakova (Executive Editor), T.P. Novikova (Technical Editor)  
**Members of Editorial Board:** V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, V.V. Glebov,  
A.M. Groshev, A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, O.S. Koshelev, V.F. Kulepov, A.A. Kurkin,  
I.O. Leushin, M.G. Mikhalevko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,  
Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

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

© Nizhni Novgorod State Technical University  
n.a. R.Y. Alexeev, 2013



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....</b>	11
Афонин Ф.И., Боков Г.В., Лашенко И.В. Рефлектометрический измеритель модулей комплексных коэффициентов отражения и передачи устройств, выполненных на основе пластинчатого металлодиэлектрического волновода .....	11
Катин С.В., Шорохова Е.А., Яшнов В.А. Математическая модель электромагнитной обстановки внутри ограниченного пространства .....	18
Евсеев В.И., Лавричев О.В., Хамидулин С.В., Хранилов В.П. Исследование влияния материала подложек на рабочие параметры фильтра гармоник приемопередающих модулей при серийном производстве.....	28
<b>МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....</b>	36
Родин А.А. Численные расчеты наката обрушенных одиночных волн на плоский откос.....	36
Орлов Е.Ф. Поле многократных отражений в двухслойной среде.....	44
Асеева Н.В., Громов Е.М., Подчищаева О.В., Тютин В.В. Динамика солитонов в рамках расширенного неоднородного нелинейного уравнения шредингера с учетом нелокальности нелинейности .....	51
<b>ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	65
Гай В.Е. Метод обработки биометрической информации в системах контроля и управления доступом.....	65
Новиков П.А. Организация механизма качества обслуживания для эмуляции сети LTE.....	74
Аверин О.В. Реализация токенизатора на графическом процессоре.....	83
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....</b>	88
Иванов А.А. Моделирование объектов автоматизированного производства на основе теории массового обслуживания.....	88
Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С. В., Бурдасов Е.Н. Фрактальный и вэйвлет-анализ при диагностике динамики процесса резания и износа инструмента.....	94
Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Кретинин О.В., Шатагин Д.В. Моделирование состава и структуры нитридных покрытий для режущего инструмента на основе квантово- механических расчётов.....	104
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....</b>	113
Власичев Г.Н. Феноменология аварий с плавлением материалов активной зоны реактора БН.....	113
Когтева Л.В., Львов А.Е., Рудоясова Л.Г., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Атенюаторы на полосковых линиях.....	121

<b>НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>131</b>
<b>Орлов Л.Н., Рогов П.С., Тумасов А.В.</b> Выбор безопасной силовой схемы кузова на начальных этапах проектирования автобуса.....	131
<b>Кузьмин Н.А., Шапкин В.А., Шапкина Ю.В.</b> Применение инновационной техники STRUCTURAL INTENSITY ANALYSIS для повышения вибрационной надежности и усовершенствования акустического дизайна рулевой колонки автомобиля.....	139
<b>Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Гончаров К.О., Федоренко А.В., Беляков В.В.</b> Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова.....	150
<b>ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....</b>	<b>158</b>
<b>Май Ван Куан, Нгуен Дык Тхинь.</b> Состояние и перспективы развития судостроения Вьетнама.....	158
<b>Ларин А.Г.</b> Экспериментальная установка для определения возможности погружения и всплытия энергетического модуля в ледовых условиях.....	167
<b>Захаров И.Л., Химич В.Л., Тарасов А.Н., Дегтярев А.В., Захаров Л.А.</b> Методы повышения энергии рабочего тела в современных поршневых ДВС, работающих на топливе разного химического состава, до уровня перспективных энергетических, экономических и экологических стандартов.....	172
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....</b>	<b>184</b>
<b>Анисимов С.А., Лоскутов А.Б., Полозов И.В., Смирнов А.И., Соснина Е.Н.</b> Разработка архитектуры системы управления трансформаторно-тиристорными регуляторами напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока (ТТРН ОТ).....	184
<b>Куликов А.Л., Папков Б.В., Шарыгин М.В.</b> Оценка эффективности внедрения индивидуальной микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 Кв.....	194
<b>Серебряков А.С., Семенов Д.А.</b> Новое устройство для контроля качества электрической изоляции .....	203
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>209</b>
<b>Панов А.Г.</b> Влияние микроструктуры ФСМГ-модификаторов на кристаллизацию и микроструктуру высокопрочных чугунов.....	209
<b>Хлыбов А.А., Углов А.Л.</b> Определение физико-механических характеристик материала образцов, подвергаемых радиационному облучению.....	220
<b>Малов В.С., Васильев В.А.</b> Исследование дефектов кованных заготовок из стали 14X17H2.....	229
<b>Зиновьев Ю.А., Леушин И.О., Тимофеев А.М., Швецов В.Д., Белявский Г.И.</b> Повышение эффективности работы транспорта в условиях Крайнего севера и Сибири.....	236
<b>ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>242</b>
<b>Карташов В.Р., Челнокова М.В., Калинина А.А., Соколова Т.Н., Радостин С.Ю., Москвичев А.А.</b> Генерация $O_2^-$ микроорганизмами и его роль в биологической коррозии металлов.....	242

<b>Калинина А.А., Москвичев А.Н., Разов Е.Н., Хлопин С.Ю., Соколова Т.Н., Карташов В.Р.</b> Влияние адсорбированных на цинке фенолов на бактериальную коррозию.....	247
<b>ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ</b> .....	253
<b>Юрлов Ф.Ф., Грачев В.Ю.</b> Оценка эффективности и выбор предпочтительных стратегических решений на основе многокри-териального подхода.....	253
<b>Старцева В.Н.</b> Внедрение инновационных технологий мотивации персонала как научная и практическая проблема менеджмента.....	258
<b>Узбекова А.С., Колесов К.И., Шибанов Н.А.</b> Проблематика идентификации и построения кластерных образований предприятий Нижегородской области.....	266
<b>Яшин С.Н., Ермакова Т.И., Мурашова Н.А.</b> Некоторые аспекты повышения конкурентоспособности выпускников учебных заведений в инновационном развитии экономики России.....	272
<b>СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	284
<b>Агаев Н.Ф.</b> Педагогические условия повышения эмоциональной устойчивости личности студентов.....	284
<b>Ларина О.В.</b> Активизация художественно-проектной деятельности студентов- дизайнеров средствами информационно-коммуникационных технологий.....	292
<b>Мухина Т.Г.</b> Дополнительное профессиональное образование в условиях единого образовательного пространства.....	299
<b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ</b> .....	309
<b>Галкин В.М., Ерофеева Л.Н., Толкачев И.Н.</b> Вероятностные характеристики одного детерминированного процесса.....	309
<b>Кузнецов А.А., Сушкова Л.Т., Гуменный В.Г., Пермяков С.А., Шмиг А.А.</b> Результаты весеннего обследования функционального состояния группы студентов.....	315

## CONTENTS

<b>RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....</b>	<b>11</b>
<b>Afonin Ph.I., Bokov G.V., Laschenko I.V.</b> Reflectometer for dimension the magnitude of complex coefficients reflection and transmission based on the plate metal-dielectric wave-guide.....	11
<b>Katin S.V., Shorokhova E.A., Yashnov V.A.</b> Mathematical model of the electromagnetic situation indoors .....	18
<b>Evseev V.I., Lavrichev O.V., Khamidulin S.V., Khranilov V.P.</b> Investigation of the effect of substrate material choice on the performance parameters of a filter of harmonicas in transmit-receive modules by serial manufacturing.....	28
<b>MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA .....</b>	<b>36</b>
<b>Rodin A.A.</b> Numerical calculations of run-up of solitary breaking waves on a plane beach... ..	36
<b>Orlov E.F.</b> The field of the frequentative reflections in two-layer ambience.....	44
<b>Aseeva N.V., Gromov E.M., Podchishaeva O.V., Tyutin V.V.</b> Soliton dynamics in the frame of extended inhomogeneous nonlinear schrödinger equation with taking into account nonlocal nonlinearity .....	51
<b>INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....</b>	<b>65</b>
<b>Gay V.E.</b> Method for processing biometric information in systems for access contr.....	65
<b>Novikov P.</b> The quality of service module for programming emulation of the network.....	74
<b>Averin O.V.</b> Gpu tokenizer.....	83
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION .....</b>	<b>88</b>
<b>Ivanov A.A.</b> Object modeling of the automated production based on the theory of mass service.....	88
<b>Laptev I.L., Shatagin D.A., Sery S.V., Burdasov E.N.</b> Fractal and wavelet analysis in the diagnosis of dynamics of the process of cutting and tool wear.....	94
<b>Kabaldin Yu.G., Sery S.V., Kretinin O.V., Shatagin D.V.</b> Simulation of the structure and nitride coatings for cutting tools based on quantum- mechanical calculations.....	104
<b>NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS .....</b>	<b>113</b>
<b>Vlasichev G.N.</b> Phenomenology of accidents with core materials melting of bn reactor.....	113
<b>Kogteva L.V., Livov A.E., Rudoyasova L.G., Shishkov G.I., Sherbakov V.V.</b> Attenuators on strip line.....	121
<b>LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS .....</b>	<b>131</b>
<b>Orlov L.N., Rogov P.S., Tumasov A.V.</b> Choice of a safe body structure on the early stages of buses designing.....	131
<b>Kuzmin N.A., Shapkina J.V., Shapkin V.A.</b> The structural intensity analysis for prediction of vibration energy flow and improvements in the acoustical design of steering column part..	139

<b>Makarov V.S., Zezyulin D.V., Goncharov K.O., Fedorenko A.V., Belyakov V.V.</b> Assessment of movement wheeled machines based on statistical characteristics of snow cover.....	150
<b>PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....</b>	158
<b>Mai Van Quan, Nguyen Duc Thinh.</b> Situation and prospects of Vietnam shipbuilding.....	158
<b>Larin A.G.</b> Research stand for definition possibility a dive and emersion the energy module in ice conditions.....	167
<b>Zakharov I.L., Khimich V.L., Tarasov A.N., Degtyarev A.V., Zakharov L.A.</b> Methods of increasing energy working fluid in the modern piston engine running on fuels of different chemical composition, to levels perspective energy, economic and enviromental standards....	172
<b>ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY .....</b>	184
<b>Anisimov S.A., Loskutov A.B., Polozov I.V., Smirnov A.I., Sosnina E.N.</b> Design and development of the control system architecture for the thyristor-controlled voltage and power transformer with unidirectional current switches (TVPTUCW).....	184
<b>Kulikov A.L., Papkov B.V., Sharygin M.V.</b> Efficiency assessment of adoption of individual microprocessor-based protection from single-phase earth faults in 6–10 kV power networks.....	194
<b>Serebryakov A.S., Semenov D.A.</b> New arrangement for quality assurance of electric isolation. ...	203
<b>METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS .....</b>	209
<b>Panov A.G.</b> Fesing-modifier microstructure influence on ductile iron crystallization and microstructure.....	220
<b>Khlybov A.A., Uglov A.L.</b> Determination of physical-mechanical characteristic of the sample material exposed to radiation.....	229
<b>Malov V.S., Vasilyev V.A.</b> Research of defects of forged billet from the steel 14Cr17N2.....	
<b>Zinoviev Yu.A., Leushin I.O., Tumofeev A. M., Shvetsov V.B., Beliavsky G.I.</b> Increasing the efficiency of transporttation means' operation in the far north and siberia.....	236
<b>CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES .....</b>	242
<b>Kartashov V.R., Chelnokova M.V., Kalinina A.A., Sokolova T.N., Radostin S.J., Moskvichev A.A.</b> O <sub>2</sub> <sup>-</sup> generation micro-organisms and their role in biological corrosion of metals.....	242
<b>Kalinina A.A., Moskvichev A.N., Razov E.N., Khlopin S.Y., Sokolova T.N., Kartashov V.R.</b> Effect of phenol adsorbed on zinc on bacterial corrosion.....	247
<b>ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT .....</b>	253
<b>Yurlov F.F., Grachov V.U.</b> Evaluating the effectiveness and choice of preferred strategic decisions based on multi-criteria approach.....	253
<b>Startseva V.N.</b> Introduction of innovative technologies of motivation of the personnel as a scientific and practical problem of management.....	258
<b>Uzbekova A.S., Kolesov K.I., Shibanov N.A.</b> The problems of identification and formation of company's cluster foundations in Nizhny Novgorod region.....	266
<b>Yashin S.N., Ermakova T.I., Murashova N.A.</b> Some aspects of increase of competitiveness of graduates of educational institutions in innovative development of Russia's economy.....	272

---

<b>SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....</b>	284
<b>Agaev N.F.</b> Pedagogical conditions of improving of emotional stability of students' personality.....	284
<b>Larina O.V.</b> The intensification of the artistic project of the activities of students-designers means of information-communication technologies.....	292
<b>Mukhina T.G.</b> Additional vocational training in the conditions of uniform educational space.....	299
<b>MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES .....</b>	309
<b>Galkin V.M., Erofeeva L.N., Tolkachev I.N.</b> The probability characteristics of a determening process.....	309
<b>Kuznetsov A.A., Sushkova L.T., Gumennyj V.G., Permjakov S.A., Shmig A.A.</b> Results of spring inspection of a students group functional conditio.....	315

# РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.865

Ф.И. Афонин, Г.В. Боков, И.В. Лащенко

## РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОДУЛЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ УСТРОЙСТВ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПЛАСТИНЧАТОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Севастопольский национальный технический университет, Украина

Представлены результаты разработки рефлектометрического измерителя на основе гибридного направленного ответвителя с разнотипными волноводными каналами для определения модулей комплексных коэффициентов отражения и передачи микроволновых устройств, выполненных на основе пластинчатого металлодиэлектрического волновода.

*Ключевые слова:* рефлектометрический измеритель, гибридный направленный ответвитель, пластинчатый металлодиэлектрический волновод.

### Введение

Передача электромагнитной энергии сантиметрового диапазона волн осуществляется в основном по волноводам прямоугольного сечения и полосковыми линиями. Недостатками указанных линий передач являются сложность изготовления и дороговизна волноводов, а также открытый характер полосковой линии, приводящий к потерям энергии волны на излучение. Альтернативой пологому волноводу прямоугольного сечения и полосковой линии может служить пластинчатый металлодиэлектрический волновод (ПМДВ).

В работе [1] представлены результаты исследования ПМДВ, весьма перспективного для построения устройств, работающих в коротковолновой части дециметровых и длинноволновой части сантиметровых волн. Волновод конструктивно прост и технологичен в изготовлении, имеет малую стоимость, практически полностью закрыт для излучения электромагнитной энергии. Конструкция ПМДВ представлена на рис. 1.

Волновод представляет собой тонкую ленточную диэлектрическую пластину (1) с двухсторонней металлизацией широких стенок, которая зажимается по широким стенкам между двумя проводящими пластинами (2). Структура электромагнитного поля в ПМДВ определена по методике, изложенной в [2]. В соответствии с концепцией плоских парциальных волн определены типы распространяющихся в волноводе волн и их параметры, условия одноволнового режима работы, критические длины волн, дисперсионные уравнения.

Для измерения модулей комплексных коэффициентов отражения (ККО) и передачи (ККП) волноводных элементов и узлов, построенных на основе пластинчатого металлодиэлектрического волновода, было принято решение использовать рефлектометр. Рефлектометрические методы измерения основаны на разделении падающих, отраженных и прошедших волн. Разделение волн осуществляется в основном с помощью направленных ответвителей (НО).

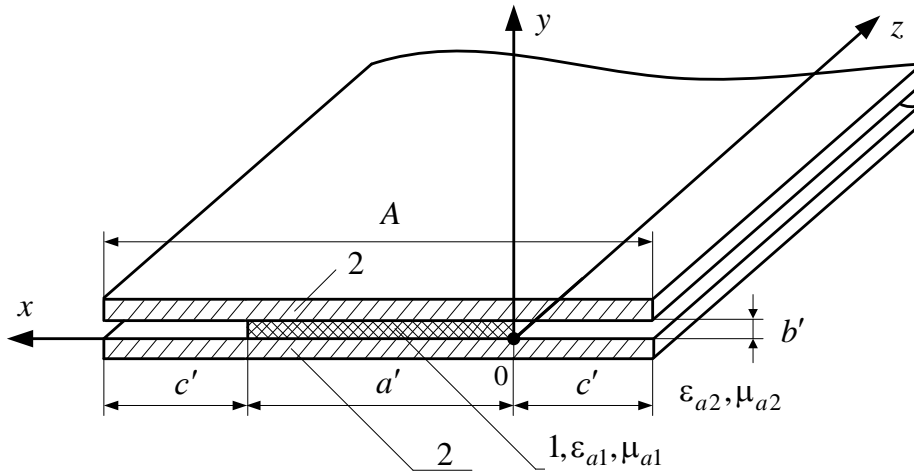


Рис. 1. Конструкция пластинчатого металлодиэлектрического волновода

Промышленностью выпускаются панорамные приборы группы Р2. Современные рефлектометрические измерительно-вычислительные блоки, например, панорамные измерители КСВ типов Р2-73 – Р2-82 имеют встроенный микропроцессорный блок. Эти приборы имеют запрограммированный режим коррекции неквадратичности СВЧ детекторов, отстройки от шумов, режим записи и сравнения частотных характеристик измеряемых объектов [3]. Однако для реализации микроволновой части такого прибора необходимо иметь направленные ответвители, детекторные головки и согласованные нагрузки, построенные на основе пластинчатого металлодиэлектрического волновода. Поскольку детекторные головки и согласованные нагрузки пока находятся в стадии разработки, целесообразно использование гибридных направленных ответвителей, первичный и вторичный каналы которых выполнены на различных типах волноводов. Первичным каналом является отрезок пластинчатого металлодиэлектрического волновода, а вторичным – полый металлический волновод прямоугольного сечения с встроенной детекторной головкой и согласованной нагрузкой (рис. 2).

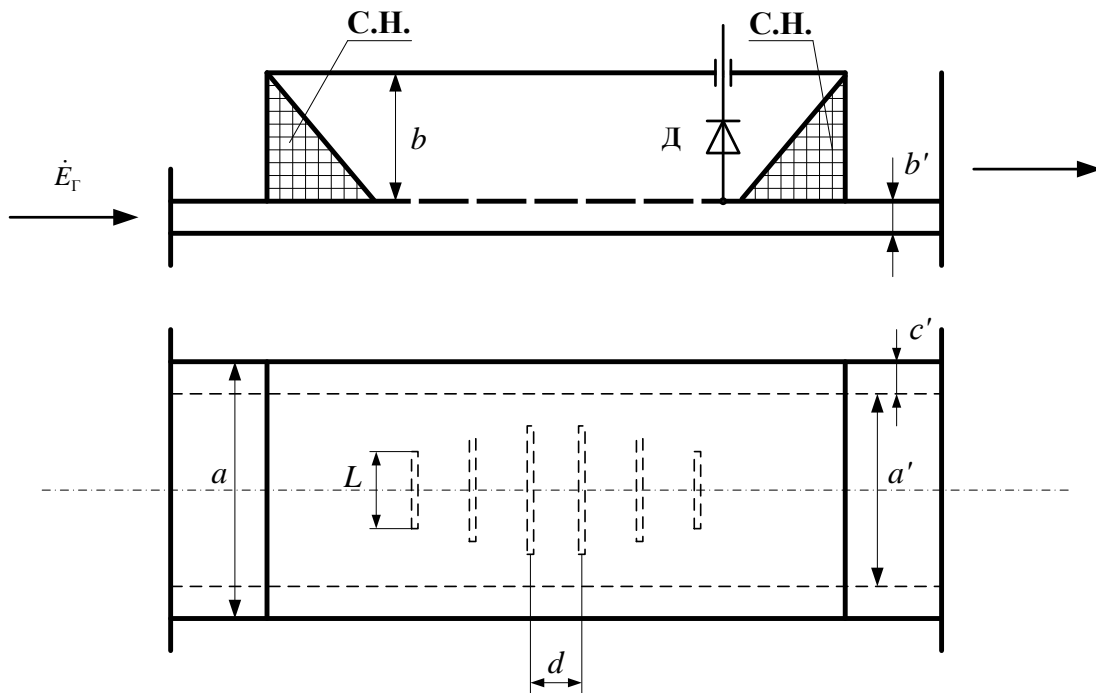


Рис. 2. Схема гибридного направленного ответвителя



В разработанном варианте ответвителя поле связи волноводных каналов состоит из шести поперечных щелей шириной  $w$  и длиной  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  и  $L_6$ . Зависимость нормированной амплитуды волны в обратном плече вспомогательного (вторичного) волновода от усредненной длины волны направленного ответвителя выбрана биномиальной. При этом  $L_1 = L_6, L_2 = L_5$  и  $L_3 = L_4$ .

Расстояние  $d$  между щелями определено из соотношения

$$\frac{2\pi d}{\lambda_{B10}} + \frac{2\pi d}{\lambda_{B20}} = \pi, \quad (1)$$

где  $\lambda_{B10}$  – средняя длина волны в металлическом волноводе;  $\lambda_{B20}$  – средняя длина волны в пластинчатом металлодиэлектрическом волноводе.

Из (1) следует

$$d = \frac{\lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{2(\lambda_{B10} + \lambda_{B20})}. \quad (2)$$

Для расчета параметров гибридного направленного ответвителя введем понятие усредненной длины волны НО –  $\lambda_B^{\text{НО}}$ , которая определяется из выражения

$$\lambda_B^{\text{НО}} = \frac{2\lambda_{B1} \lambda_{B2}}{\lambda_{B1} + \lambda_{B2}}.$$

На средней частоте  $f_0$  усредненная длина волны направленного ответвителя  $\lambda_{B0}^{\text{НО}}$  равна

$$\lambda_{B0}^{\text{НО}} = \frac{2 \cdot \lambda_{B10} \cdot \lambda_{B20}}{\lambda_{B10} + \lambda_{B20}}. \quad (3)$$

Длина волны в полном металлическом волноводе прямоугольного сечения рассчитывается по формуле [3]:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}},$$

а длина волны в пластинчатом металлодиэлектрическом волноводе [2] –

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_1 \cdot \sin^2 \theta_x}},$$

где  $\lambda$  – длина волны генератора;

$\varepsilon_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины ПМДВ;

$a$  – размер широкой стенки металлического волновода;

$\theta_x$  – угол падения плоской волны на границу раздела диэлектрик-воздух в пластинчатом металлодиэлектрическом волноводе.

Расстояние между щелями ответвителя с учетом (2) и (3) рассчитываем по формуле

$$d = \frac{\lambda_{B0}^{\text{НО}}}{4}.$$

Тогда фазовый сдвиг  $\varphi_0$  между волнами, ответвляемыми щелями связи на средней длине волны направленного ответвителя  $\lambda_{B0}^{\text{НО}}$ , равен

$$\varphi_0 = \frac{2\pi d}{\lambda_{B0}^{\text{НО}}} = \frac{\pi}{2}.$$

На других длинах волн  $\lambda_{\text{в}}^{\text{НО}}$  фазовый сдвиг  $\varphi$  определяется согласно выражению

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda_{\text{в}}^{\text{НО}}} = \frac{2\pi \frac{\lambda_{\text{в}0}^{\text{НО}}}{4}}{\lambda_{\text{в}}^{\text{НО}}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}10} \cdot \lambda_{\text{в}20}}{\lambda_{\text{в}1} \cdot \lambda_{\text{в}2}} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}1} + \lambda_{\text{в}2}}{\lambda_{\text{в}10} + \lambda_{\text{в}20}}.$$

Направленность ответвителя в 30 %-ной полосе частот не менее 40 дБ.

Методика определения модулей комплексных коэффициентов отражения и передачи несколько отличается от стандартной. Как известно, доминирующая погрешность рефлектометрического измерителя обусловлена не идентичностью коэффициентов передачи  $K_1$  и  $K_2$  каналов детекторных головок. Эти коэффициенты зависят от неравенства переходных затуханий направленных ответвителей, отличия элементов связи детекторных головок с волноводами, не идентичности амплитудно-частотных характеристик СВЧ-диодов и других факторов. Чтобы исключить влияние коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  на результаты измерения модуля  $\Gamma$  ККО и модуля  $T$  ККП, предлагается осуществлять прямые и обратные запитки (соединения) направленных ответвителей.

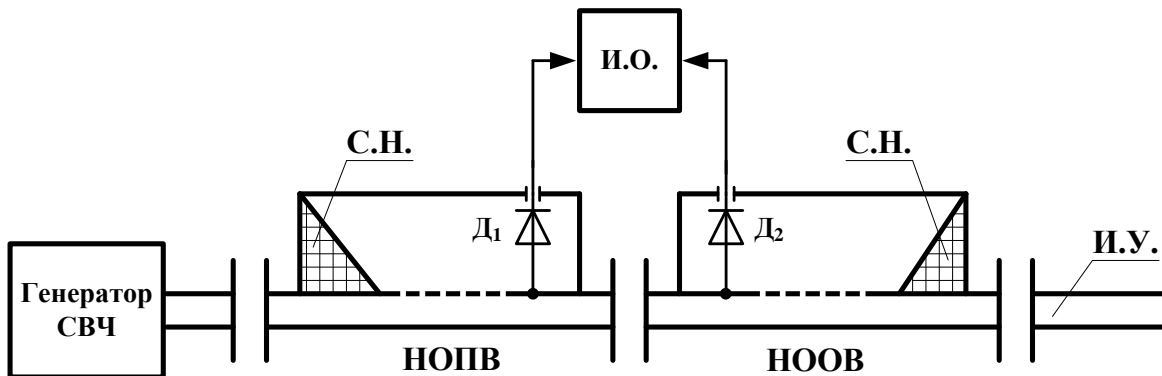
### Определение модуля комплексного коэффициента отражения

При прямом соединении НО, представленном на рис. 3, напряжения  $U_{1\text{ПР}}$  и  $U_{2\text{ПР}}$ , снимаемые с диодов детекторных головок  $D_1$  и  $D_2$  направленных ответвителей падающей и отраженной волн соответственно, определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} U_{1\text{ПР}} &= K_1 E_{\Gamma}^2; \\ U_{2\text{ПР}} &= K_2 \Gamma^2 E_{\Gamma}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $E_{\Gamma}$  – нормированная амплитуда волны генератора.

Здесь учтено, что диоды имеют квадратичные характеристики детектирования.



**Рис. 3. Схема прямого соединения направленных ответвителей при измерении модуля комплексного коэффициента отражения:**

НОВД — направленный ответвитель падающей волны; С.Н. — согласованная нагрузка;  
НООВ — направленный ответвитель отраженной волны; И.О. — измеритель отношения;  
И.У. — исследуемое устройство

Сигналы с головок поступают на измеритель отношения. В результате деления получаем

$$\frac{U_{2\text{ПР}}}{U_{1\text{ПР}}} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \Gamma^2. \quad (5)$$

При обратном соединении, изображенном на рис. 4, генератор и исследуемая нагрузка меняются местами.

С детекторных головок на измеритель отношения поступают теперь следующие сигналы:

$$\begin{aligned} U_{1\text{ОБР}} &= K_1 \cdot \Gamma^2 \cdot E_{\Gamma}^2; \\ U_{2\text{ОБР}} &= K_2 \cdot E_{\Gamma}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Их отношение имеет вид:

$$\frac{U_{1\text{ОБР}}}{U_{2\text{ОБР}}} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \Gamma^2. \quad (7)$$

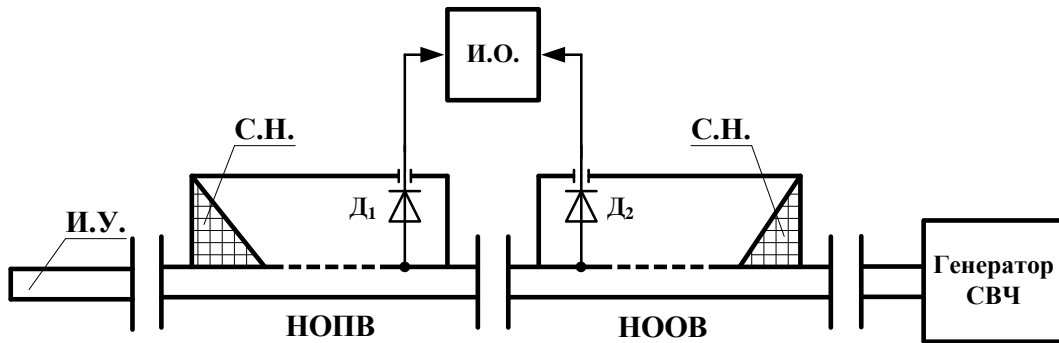


Рис. 4. Схема обратного соединения для измерения модуля комплексного коэффициента отражения

Перемножая левые и правые части уравнений (5) и (7) и преобразовывая полученный результат, определяем модуль  $\Gamma$  ККО:

$$\Gamma^2 = \sqrt{\frac{U_{2\text{ПР}}}{U_{1\text{ПР}}} \cdot \frac{U_{1\text{ОБР}}}{U_{2\text{ОБР}}}}.$$

Таким образом, для вычисления модуля комплексного коэффициента отражения достаточно определить напряжения, снимаемые с первого и второго диодов при прямом и обратном соединениях.

### Определение модуля комплексного коэффициента передачи

Методика определения модуля комплексного коэффициента передачи аналогична предыдущему пункту и обеспечивается прямым и обратным соединениями генератора и согласованной нагрузки.

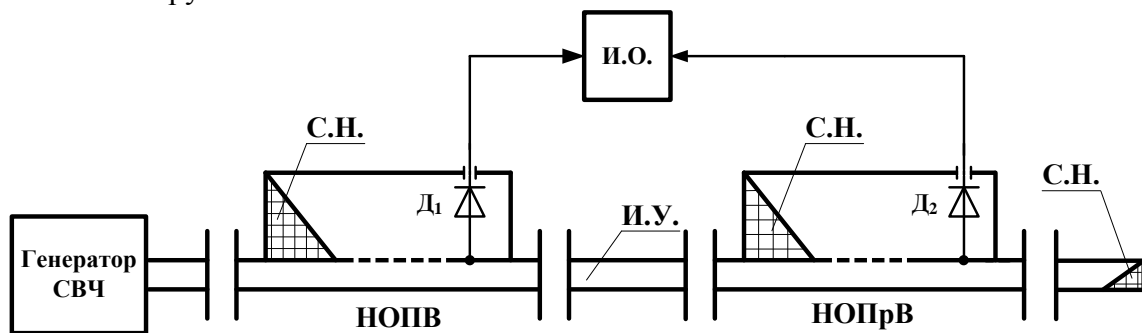


Рис. 5. Функциональная схема прямого соединения для измерения модуля комплексного коэффициента передачи:

НОПВ – направленный ответвитель падающей волны;  
НОПРВ – направленный ответвитель прошедшей волны

Для прямого соединения имеем:

$$U_{1\text{ПР}} = k_1 \cdot E_{\Gamma}^2; \quad (8)$$

$$U_{2\text{ПР}} = k_2 \cdot T^2 \cdot E_{\Gamma}^2. \quad (9)$$

Здесь  $T$  – модуль комплексного коэффициента передачи.

В результате совместного решения (8) и (9) получаем

$$\frac{U_{2\text{ПР}}}{U_{1\text{ПР}}} = \frac{k_2}{k_1} \cdot T^2. \quad (10)$$

Обратное соединение выполняется по схеме, представленной на рис. 6.

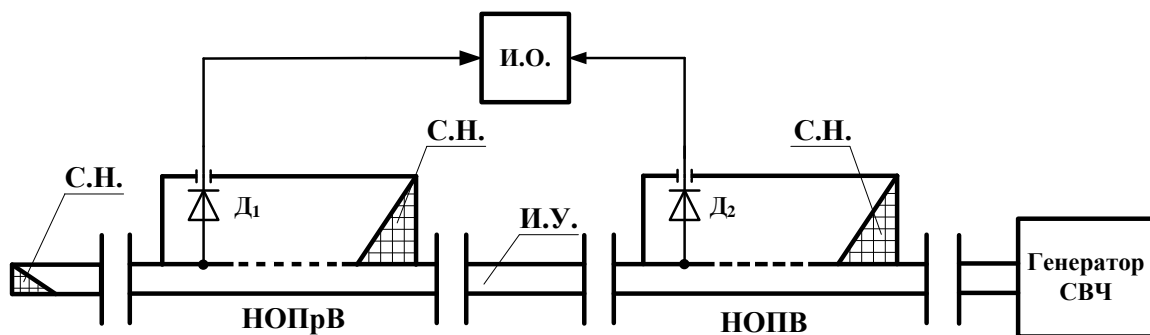


Рис. 6. Функциональная схема обратного соединения для измерения модуля комплексного коэффициента передачи

Для обратного соединения:

$$U_{2\text{ОБР}} = k_2 \cdot E_{\Gamma}^2; \quad (11)$$

$$U_{1\text{ОБР}} = k_1 \cdot T^2 \cdot E_{\Gamma}^2. \quad (12)$$

Совместное решение (11) и (12) дает следующий результат

$$\frac{U_{1\text{ОБР}}}{U_{2\text{ОБР}}} = \frac{k_1}{k_2} \cdot T^2. \quad (13)$$

В результате преобразования выражений (10) и (13) получаем

$$T^2 = \sqrt{\frac{U_{2\text{ПР}}}{U_{1\text{ПР}}} \cdot \frac{U_{1\text{ОБР}}}{U_{2\text{ОБР}}}}. \quad (14)$$

Из выражения (14) определяется модуль комплексного коэффициента передачи  $T$  в результате измерения напряжений  $U_{1\text{ПР}}$ ,  $U_{2\text{ПР}}$  и  $U_{1\text{ОБР}}$ ,  $U_{2\text{ОБР}}$  с первого и второго диодов при прямом и обратном соединениях.

### Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты разработки рефлектометрического измерителя на базе гибридного направленного ответвителя с разнотипными волноводными каналами для определения модулей комплексных коэффициентов отражения и передачи устройств, выполненных на основе пластинчатого металлodieлектрического волновода.

## Библиографический список

1. **Боков, Г.В.** Плоский полуоткрытый металлодиэлектрический волновод для корабельных радиоэлектронных средств // зб. наук. пр. Академії військово-морських сил імені П.С. Нахімова. – Севастополь: АВМС імені П.С. Нахімова. 2012 Вып. 2 (10). С. 99–103.
2. **Саламатин, В.В.** Основы геометрической электродинамики волноводов прямоугольного сечения: учеб. пособие / В.В. Саламатин, И.Л. Афонин, С.Н. Бердышев. – Севастополь: Севастопольский национал. техн. ун-т, 2008. – 220 с.
3. Измерение параметров радиотехнических цепей / Б.А. Абубакиров [и др.]; под ред. В.Г. Андрущенко, В.П. Фатеева. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**Ph.I. Afonin, G.V. Bokov, I.V. Laschenko**

**REFLECTOMETER FOR DIMENSION THE MAGNITUDE OF COMPLEX  
COEFFICIENTS REFLECTION AND TRANSMISSION BASED  
ON THE PLATE METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE**

Sevastopol national technical university, Ukraine

**Purpose:** The purpose of the paper is to construct the measuring methods for calculation the absolute value of complex characteristic of microwave systems.

**Design/methodology/approach:** The article proposes a qualitative model of reflectometer that allows to simplify measuring procedure of complex characteristic of microwave frequencies equipment. Method is based on comparison of direct and reflected signals.

**Findings:** In the result of the research we found the easy solution for determination the magnitude of reflectivity and transmission factors.

**Research limitations/implications:** The size of the article doesn't allow to present detailed results of end-use measurements.

**Originality/value:** The value of the results, presented in this work, is the simple reflectometer based on hybrid directed coupler which has polytypic wave conductors one of them is the plate metal-dielectric waveguide.

*Key words:* reflectometer, hybrid directed coupler, plate metal-dielectric waveguide.

УДК 338.242

С.В. Катин<sup>1</sup>, Е.А. Шорохова<sup>1</sup>, В.А. Яшнов<sup>2</sup>**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ  
ВНУТРИ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА**ФНПЦ «Научно-исследовательский институт им. Ю.Е. Седакова»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>2</sup>

Представлена математическая модель электромагнитной обстановки внутри ограниченного пространства, разработанная на основе метода мнимых источников и позволяющая рассчитывать пространственное распределение мощности электромагнитного излучения. Показано, что за счет интерференции волн существуют области пространства с повышенным и пониженным уровнями мощности электромагнитного излучения, место расположения которых зависит, в основном от рабочей частоты параметров антенны, конфигурации помещения и отражательных свойств его поверхностей.

*Ключевые слова:* электромагнитная обстановка, электромагнитное излучение, лучевой подход, СВЧ-диапазон.

**Введение**

В последнее время в связи с созданием локальных информационных сетей и необходимостью обеспечения надежной радиосвязью сотрудников предприятий и учреждений, большое внимание уделяется задачам распространения электромагнитных волн внутри зданий и помещений. Наличие внутри здания стен, перегородок, мебели, радиоэлектронной аппаратуры, людей и других объектов создает сложную среду распространения радиоволн. Условия распространения радиоволн внутри помещений существенно отличаются от условий распространения радиоволн в свободном пространстве. Основными эффектами, наблюдаемыми при распространении радиоволн внутри помещений, являются многолучевость, обусловленная многократными отражениями радиоволн от стен и других объектов, дифракция на многочисленных острых краях предметов, расположенных внутри комнаты, и рассеяние радиоволн. Эти эффекты создают сложную интерференционную структуру электромагнитного поля, сильно изменяющуюся при перемещении людей и других объектов.

Предложенные к настоящему времени модели распространения сигналов внутри зданий можно условно разделить на четыре группы: статистические, эмпирические, лучевые и численные.

Статистические модели не требуют полной информации о здании кроме общего описания его типа, например, производственное здание, гостиница, больница, торговый центр, здание старой постройки и т.п. В моделях этой группы потери  $L_p$  имеют зависимость от расстояния между антеннами  $d$  вида

$$L_p = L_{p0}(d_0) + 10n \lg(d / d_0),$$

где  $L_0$  – потери на расстоянии  $d_0$  от излучателя, показатель степени  $n$  определяется типом здания. Такая модель применяется в программном пакете [1] и характеризуется быстротой расчетов, при выполнении которых требуется определить только расстояние между антеннами – все другие параметры и константы относятся ко всему зданию в целом и задаются предварительно.

Эмпирические одно- или многолучевые модели основаны на анализе одного или нескольких лучей, соединяющих передающую и приемную антенны, для оценки уровня принимаемого сигнала [2]. Модели этого типа получены путем обобщения большого объема результатов измерений мощности принимаемого сигнала в различных условиях.

В лучевых моделях используется квазиоптическое представление процессов распространения сигналов и учитываются отражения от стен помещения и дифракция на границах препятствий [3]. Модели данного типа основаны на приближении геометрической оптики, т.е. на лучевом приближении. В рамках этого приближения можно максимально полно учесть информацию о планировке здания. При использовании этих моделей определяются все возможные пути попадания сигнала из передающей антенны в приемную. Моделирование многолучевого характера распространения позволяет получить информацию о мелко-масштабной структуре электромагнитного поля, обусловленной интерференцией волн, пришедших в заданную точку различными путями. Предложены различные модификации лучевого метода, позволяющие учитывать не только отражение, но и прохождение волн через стены или перегородки. Разработаны модели, позволяющие учесть дифракцию волн на различных объектах в рамках геометрической теории дифракции. Существуют две разновидности реализации данного рода моделей, называемые трассировкой лучей (ray tracing) и образованием лучей (ray launching). Число учитываемых итераций (отражений, препятствий) зависит от мощности компьютера. Большинство моделей ограничено максимум шестью итерациями, включая не более двух препятствий. Дифракционные потери сигнала вдоль каждого пути рассчитываются с использованием геометрической теории дифракции [4], а коэффициенты отражения – с помощью формул Френеля [5]. Возможно также использование эмпирических соотношений, откалиброванных при помощи экспериментальных данных. Основным недостатком лучевых моделей является их чувствительность к точности исходных данных [3]. В случаях, когда неточно указаны данные о параметрах стен [5] или их местоположение, результаты расчета существенно ухудшаются.

Наиболее точными являются численные модели, основанные на применении различных методов решения уравнений Максвелла в дифференциальной или интегральной формах [6, 7]. Численными методами моделирования распространения радиоволн являются методы численного решения уравнений Максвелла (FDTD, FEM, FIT и др.) [8,9]. Тем не менее из-за высокой вычислительной трудоемкости, эти методы в строгом виде для практически значимых расчетов распространения радиоволн до настоящего времени почти не применялись. Такие методы в основном использовались для моделирования в малых пространственных областях – определение коэффициентов прохождения/отражения сквозь объекты с неоднородной структурой, в двумерной реализации для больших областей, в составе комбинированных методов, например, объединяющих трассировку лучей (приближение геометрической оптики и теории дифракции) и FDTD. Рост вычислительных возможностей и оптимизация алгоритмов работы методов в будущем позволят для практических расчетов применять трехмерные методы численного решения уравнений Максвелла.

В данной работе предложена лучевая модель для расчета пространственного распределения мощности электромагнитного излучения, позволяющая анализировать электромагнитную обстановку внутри помещения с заданным источником.

### **Алгоритм расчета мощности электромагнитного излучения внутри помещения**

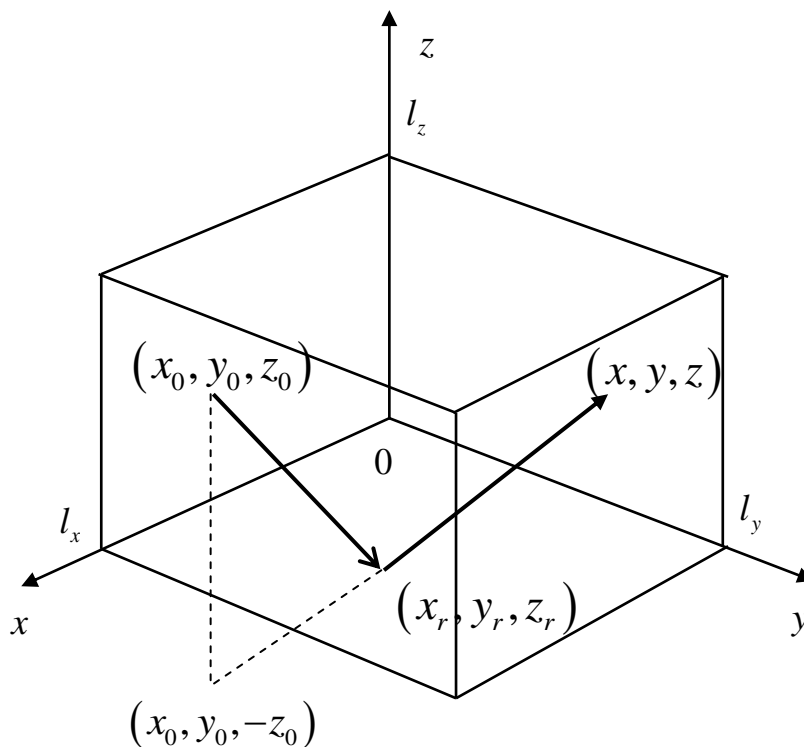
Для расчета структуры электромагнитного поля внутри замкнутого пространства (при выполнении условия  $kL \gg 1$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $L$  – характерный размер пространства) обычно используется приближение геометрической оптики или лучевое приближение. В заданном диапазоне частот  $f = 250...3000$  МГц ( $\lambda = 1,2...0,1$  м) при  $L \approx 10...20$  м условие  $kL \gg 1$  выполняется с достаточной степенью точности, что позволяет воспользоваться одной из модификаций лучевого метода – методом мнимых источников.

Рассмотрим алгоритм расчета электромагнитных полей заданного источника в замкнутом пространстве, ограниченном шестью плоскими поверхностями в декартовой систе-

ме координат  $(x, y, z)$ . Пространство имеет форму параллелепипеда и ограничено следующими плоскостями:  $x=0$  (стена),  $x=l_x$  (стена),  $y=0$  (стена),  $y=l_y$  (стена),  $z=0$  (пол) и  $z=l_z$  (потолок).

Электрические свойства различных участков поверхностей, характеризующиеся значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и удельной проводимости  $\sigma$ , могут значительно отличаться. В этой связи возникает задача определения координат точки отражения волны от поверхности, углов падения и отражения, и далее расчета коэффициентов отражения ТЕ- и ТМ-волн от соответствующего участка.

Рассчитаем координаты точки отражения волны от горизонтальной плоскости  $z=0$ . Предположим, что координаты источника  $(x_0, y_0, z_0)$  и точки наблюдения  $(x, y, z)$  заданы (рис. 1).



**Рис. 1. Схематическое изображение в пространстве координат источника и точки отражения волны**

Отраженную волну представим как волну, излучаемую мнимым источником, расположенным в некоторой точке с координатами  $(x_0, y_0, -z_0)$ . Координаты точки отражения  $(x_r, y_r, z_r=0)$  находятся из условия пересечения отрезка прямой, соединяющего мнимый источник с точкой наблюдения. Решая уравнение прямой

$$\frac{x_r - x_0}{x - x_0} = \frac{y_r - y_0}{y - y_0} = \frac{z_0}{z + z_0},$$

находим координаты точки отражения

$$x_{r1} = x_0 + \frac{z_0}{z + z_0}(x - x_0),$$

$$y_{r1} = y_0 + \frac{z_0}{z + z_0}(y - y_0),$$

$$z_{r1} = 0.$$

Зная расстояние от мнимого источника до точки наблюдения



$$r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2},$$

определим из уравнения (1) направляющие косинусы отраженного луча, как

$$\cos \alpha_{r1} = \frac{x_{r1} - x_0}{r_1}, \quad \cos \beta_{r1} = \frac{y_{r1} - y_0}{r_1}, \quad \cos \gamma_{r1} = \frac{z_0}{r_1}.$$

Заметим, что направляющие косинусы падающего и отраженного лучей связаны соотношениями

$$\cos \alpha_{i1} = \cos \alpha_{r1}, \quad \cos \beta_{i1} = \cos \beta_{r1}, \quad \cos \gamma_{i1} = -\cos \gamma_{r1}.$$

Аналогичным образом могут быть найдены координаты точек отражения и направляющие косинусы лучей, однократно отраженных от других поверхностей. Таким образом, если ограничиться учетом только однократно отраженных волн, то поле в точке наблюдения будет представлять собой сумму прямой волны и шести волн, испытавших однократное отражение от различных поверхностей.

Перейдем к рассмотрению волн, двукратно отраженных от разных поверхностей. В качестве примера рассмотрим луч, отраженный от плоскостей  $z = 0$  и  $y = 0$ . Геометрия лучей в проекции на плоскость  $(y, z)$  показана на рис. 2.

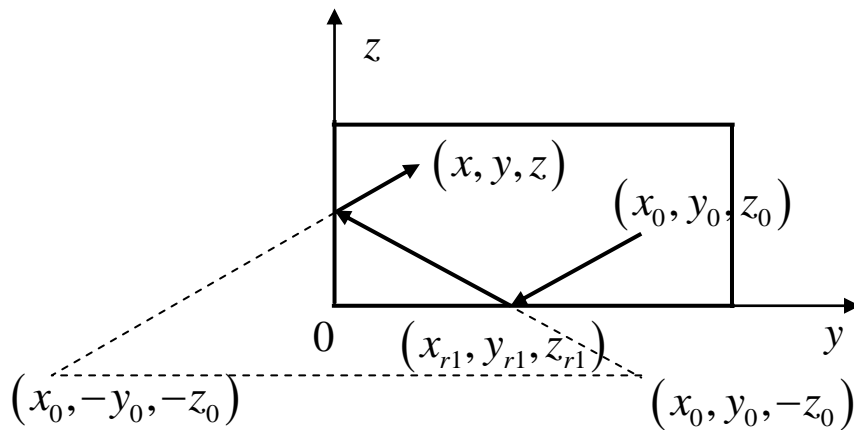


Рис. 2. Схематичное изображение координат точек двукратного отражения волн

Из приведенного рисунка видно, что луч, отраженный от плоскости  $z = 0$ , можно рассматривать как луч, идущий из мнимого источника, расположенного в точке с координатами  $(x_0, y_0, -z_0)$ . В свою очередь отраженный от плоскости  $y = 0$  луч может рассматриваться как луч, идущий из мнимого источника, расположенного в точке с координатами  $(x_0, -y_0, -z_0)$ . Найдем координаты точек отражения на плоскостях  $z = 0$  и  $y = 0$ .

Координаты точки отражения от плоскости  $y = 0$  определяются уравнением

$$\frac{x_{r13}^{(2)} - x_0}{x - x_0} = \frac{y_0}{y + y_0} = \frac{z_{r13}^{(2)} + z_0}{z + z_0},$$

из которого находим

$$\begin{aligned} x_{r13}^{(2)} &= x_0 + \frac{y_0}{y + y_0}(x - x_0), \\ y_{r13}^{(2)} &= 0, \\ z_{r13}^{(2)} &= z_0 + \frac{y_0}{y + y_0}(z - z_0). \end{aligned}$$

Координаты точки отражения от плоскости  $z = 0$  определяются уравнением

$$\frac{x_{r13}^{(2)} - x_0}{x_{r13}^{(1)} - x_0} = \frac{y_{r13}^{(2)} - y_0}{y_{r13}^{(1)} - y_0} = \frac{z_0}{z_{r13}^{(1)} + z_0},$$

из которого находим

$$\begin{aligned} x_{r13}^{(1)} &= x_0 + \frac{z_0}{z + z_0} (x_{r13}^{(2)} - x_0), \\ y_{r13}^{(1)} &= y_0 + \frac{z_0}{z + z_0} (y_{r13}^{(2)} - y_0), \\ z_{r13}^{(1)} &= 0. \end{aligned}$$

В данных формулах нижний индекс координаты точки отражения указывает на номера поверхностей, от которых происходит отражение, а верхний индекс (в скобках) соответствует порядковому номеру отражения. Аналогично вычисляются координаты точек отражения от других поверхностей.

Вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  сферической монохроматической волны можно представить в виде

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \frac{r_0}{r} \exp(ikr - i\omega t),$$

где  $\vec{E}_0$  – значение напряженности на расстоянии  $r = r_0$  от источника;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – время.

Введем вектор поляризации волны  $\vec{a}$  с помощью соотношения

$$\vec{E}_0 = A\vec{a},$$

где  $A$  – амплитуда волны.

При падении волны на плоскую границу раздела двух сред происходят отражение от границы и прохождение через границу. Коэффициенты отражения и прохождения зависят от поляризации падающей волны. Если источник удален от стены на расстояние, превышающее длину волны, точнее при выполнении неравенства  $kr \gg 1$ , кривизной фазового фронта вблизи границы раздела можно пренебречь. При этом для вычисления коэффициентов отражения и прохождения сферической волны можно использовать формулы Френеля для плоской волны.

Рассмотрим отражение плоских волн от полупространства, электрические свойства которого характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon' = \varepsilon + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей полупространство;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума. Значения коэффициентов отражения плоских волн ТЕ- и ТМ-поляризации, падающих на границу раздела под углом  $\vartheta$ , определяются следующими известными выражениями:

$$R_{\parallel} = \frac{\varepsilon' \cos \vartheta - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \vartheta}}{\varepsilon' \cos \vartheta + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \vartheta}}, \quad \text{для ТМ-волн;}$$

$$R_{\perp} = \frac{\cos \vartheta - \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \vartheta}}{\cos \vartheta + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \vartheta}}, \quad \text{для ТЕ-волн.}$$

Для вычисления поля отраженной волны поле падающей удобно представить в виде суммы ТЕ- и ТМ-волн. Волна ТЕ-поляризации имеет отличную от нуля компоненту вектора напряженности электрического поля, перпендикулярную плоскости падения. Направление этой компоненты определяется единичным вектором  $\vec{a}_{\perp}$ , который найдем из выражения

$$\vec{a}_\perp = [\vec{k}_i, \vec{n}],$$

где  $\vec{k}_i$  – волновой вектор падающей волны;  $\vec{n}$  – вектор нормали к границе раздела, как показано на рис. 3.

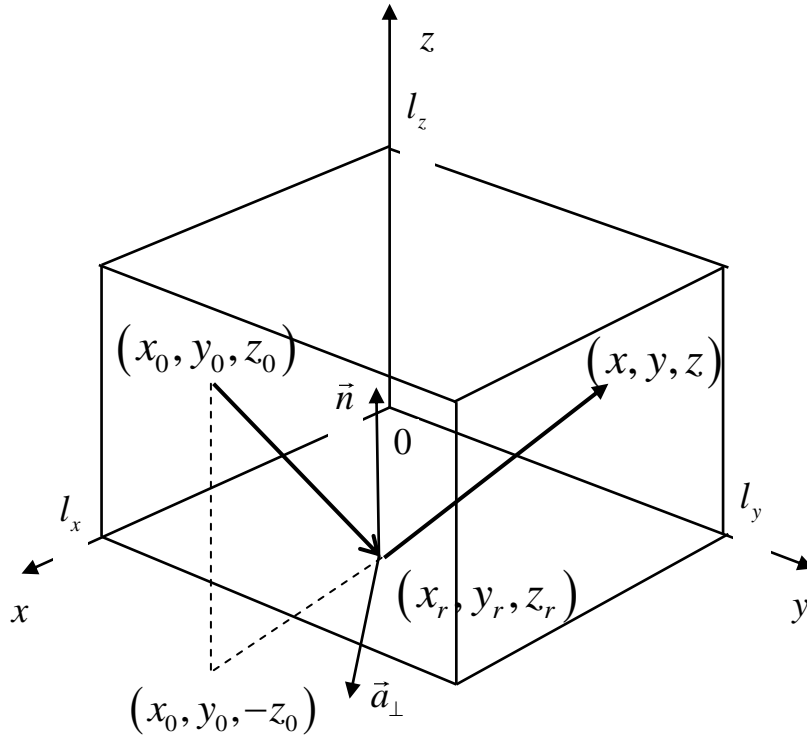


Рис. 3. Схематическое изображение векторов поля падающей и отраженной волн

Таким образом, поле падающей волны принимает вид

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{i\perp} + \vec{E}_{i\parallel},$$

где

$$\vec{E}_{i\perp} = (\vec{E}_i \vec{a}_\perp) \vec{a}_\perp, \quad \vec{E}_{i\parallel} = \vec{E}_i - (\vec{E}_i \vec{a}_\perp) \vec{a}_\perp.$$

В качестве примера рассмотрим вычисление вектора  $\vec{a}_{1\perp}$  при отражении волны от пола. В этом случае вектор нормали имеет  $\vec{n} = (0, 0, 1)$ . Если проекции волнового вектора падающей волны на оси декартовой системы координат  $(x, y, z)$  равны соответственно  $(k_x, k_y, k_z)$ , то

$$\vec{a}_{1\perp} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ k_x & k_y & k_z \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \frac{k_y \vec{e}_x - k_x \vec{e}_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}.$$

Аналогично могут быть вычислены векторы  $\vec{a}_\perp$  для отражений от потолка и стен комнат. Приведем эти выражения

$$\vec{a}_{2\perp} = \frac{k_y \vec{e}_x - k_x \vec{e}_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \quad \vec{a}_{3\perp} = \frac{k_x \vec{e}_z - k_z \vec{e}_x}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}, \quad \vec{a}_{4\perp} = \frac{k_z \vec{e}_y - k_y \vec{e}_z}{\sqrt{k_y^2 + k_z^2}},$$

$$\vec{a}_{5\perp} = \frac{k_z \vec{e}_x - k_x \vec{e}_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}, \quad \vec{a}_{6\perp} = \frac{k_y \vec{e}_z - k_z \vec{e}_y}{\sqrt{k_y^2 + k_z^2}}.$$

Поле отраженной волны с учетом приведенных ранее соотношений запишется в виде

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{r\perp} + \vec{E}_{r\parallel},$$

где

$$\vec{E}_{r\perp} = R_{\perp} (\vec{E}_i \vec{a}_{\perp}) \vec{a}_{\perp}, \quad \vec{E}_{r\parallel} = R_{\parallel} [\vec{E}_i - (\vec{E}_i \vec{a}_{\perp}) \vec{a}_{\perp}].$$

Окончательно получаем следующее выражение для поля отраженной волны:

$$\vec{E}_r = R_{\parallel} \vec{E}_i + (R_{\perp} - R_{\parallel}) (\vec{E}_i \vec{a}_{\perp}) \vec{a}_{\perp}.$$

Данная формула позволяет рассчитать амплитуду и фазу волны, отраженной от вертикальных и горизонтальных плоских поверхностей, с учетом поляризации.

### Результаты численных расчетов

На основе изложенного выше алгоритма для расчета пространственного распределения мощности электромагнитных волн создан пакет прикладных программ с графическим интерфейсом пользователя. Исходными данными для расчетов являются: модель ограниченного пространства, включающая геометрию рассматриваемой области и электрические свойства (относительную диэлектрическую проницаемость и удельную проводимость) сред, ограничивающих указанную область; рабочая частота; тип излучателя; мощность излучателя; положение излучателя в пространстве (декартовы координаты); диаграмма направленности излучателя; направление главного лепестка диаграммы направленности.

Следует отметить, что в разработанной программе используются экспериментальные данные диаграмм направленности конической и логопериодической антенн, полученные на некоторых фиксированных частотах. Антенна располагалась у одной из стен помещения. Центр антенны имел координаты  $x_0 = 6$  м,  $y_0 = 2$  м,  $z_0 = 2$  м. Направление главного лепестка диаграммы направленности антенны определялось углами места ( $\theta_0 = 90^\circ$ ) и азимута ( $\varphi_0 = 90^\circ$ ). В помещении размерами 11.8 м × 17.8 м × 4.7 м имелись окна и двери, как показано на рис. 4, где цифрами обозначены номера плоскостей, ограничивающих рассматриваемое пространство: 1 – пол, 2 – потолок, 4-6 – стены, покрытые деревянными панелями. Разработанная модель позволяет изменять геометрические размеры помещения, конфигурацию и местоположение окон и дверей.

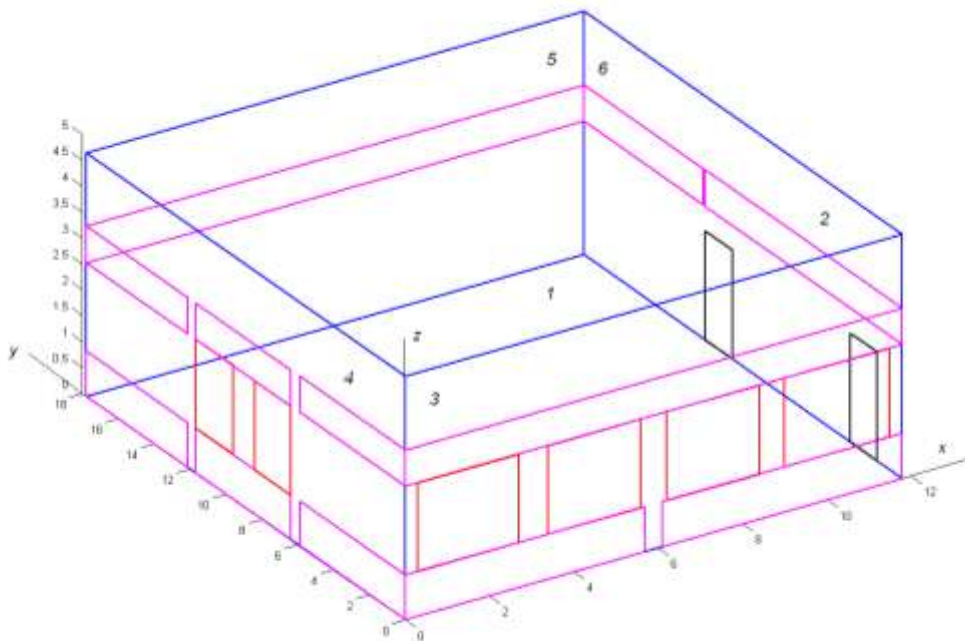
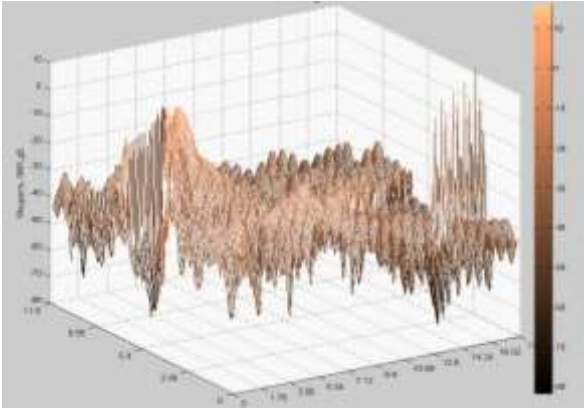
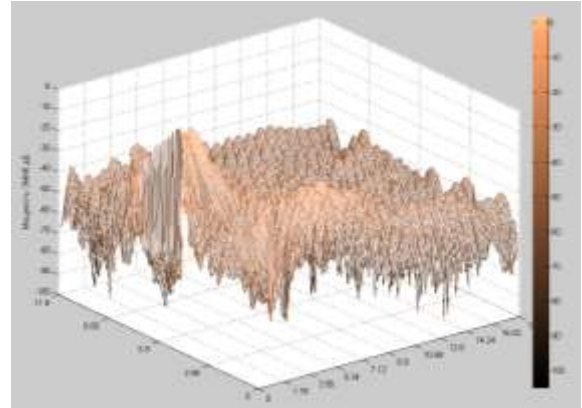


Рис. 4. Геометрия модели помещения

На рис. 5-10 представлено распределение мощности электромагнитного излучения в горизонтальной плоскости при  $zr = 1.5$  м на частотах 250 МГц (рис. 5-7) и 1.5 ГГц (рис. 8-10) для конической спиральной антенны (рис. 5, 8), логопериодической вибраторной антенны вертикальной поляризации (рис. 6, 9) и логопериодической антенны горизонтальной поляризации (рис. 7, 10).

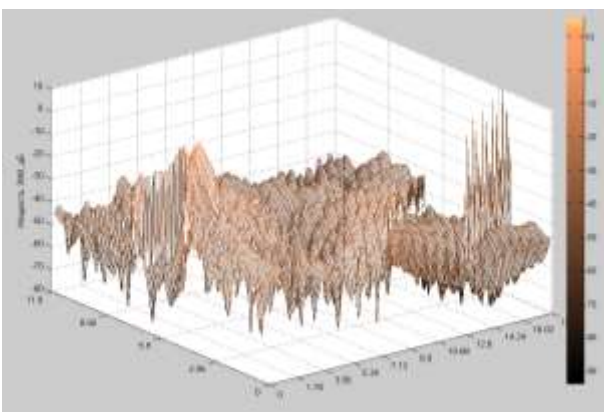


**Рис. 5. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 250 МГц в плоскости  $(x, y)$  для конической спиральной антенны**

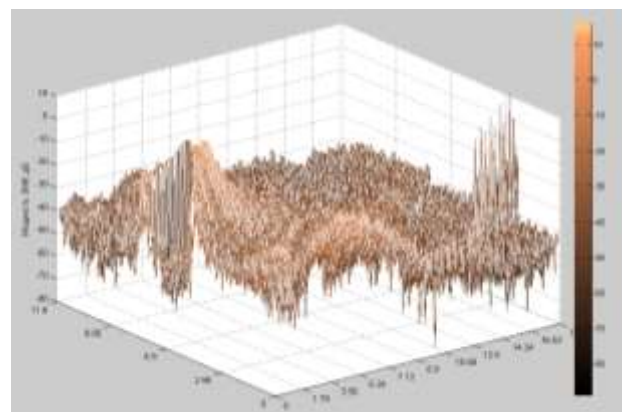


**Рис. 6. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 250 МГц в плоскости  $(x, y)$  для логопериодической вибраторной антенны вертикальной поляризации**

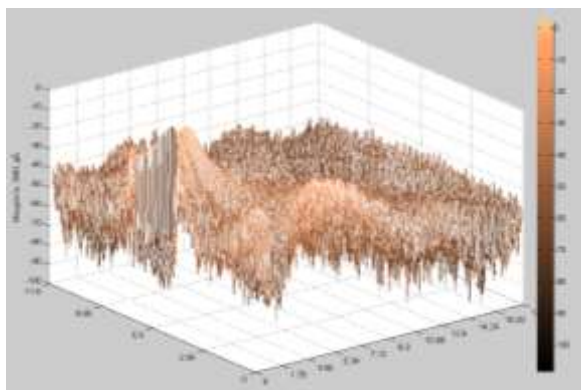
Электромагнитное поле в заданной точке пространства рассматривалось как сумма прямой волны и волн, трехкратно отраженных от ограничивающих объем поверхностей. На рисунках хорошо видна интерференционная картина, обусловленная когерентным сложением волн. Главный лепесток диаграммы направленности ориентирован горизонтально (вдоль оси  $y$ ). Из анализа представленных рисунков также видно, что с увеличением частоты уменьшается пространственный масштаб интерференционной картины. За счет интерференции волн существуют области пространства с повышенным и пониженным уровнем мощности электромагнитного излучения. Место расположения этих областей в помещении зависит от рабочей частоты, параметров антенны, конфигурации помещения, отражательных свойств его поверхностей и т.д.



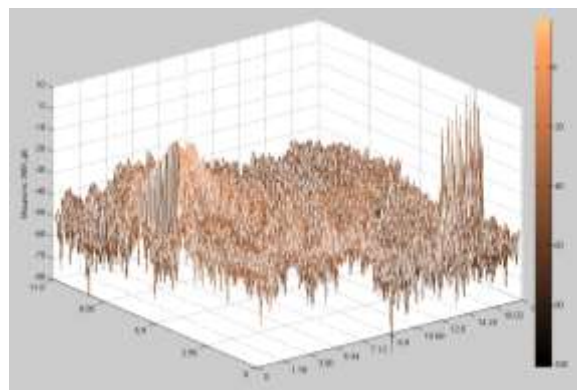
**Рис. 7. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 250 МГц в плоскости  $(x, y)$  для логопериодической вибраторной антенны горизонтальной поляризации**



**Рис. 8. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 1.5 ГГц в плоскости  $(x, y)$  для конической спиральной антенны**



**Рис. 9. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 1.5 ГГц в плоскости  $(x, y)$  для логопериодической вибраторной антенны вертикальной поляризации**



**Рис. 10. Пространственное распределение мощности ЭМИ на частоте 1.5 ГГц в плоскости  $(x, y)$  для логопериодической вибраторной антенны горизонтальной поляризации**

### Заключение

В заключение отметим несколько важных моментов, связанных с использованием разработанной математической модели.

Очевидно, что любая математическая модель не может в полной мере учесть все факторы, влияющие на структуру отраженных полей в ограниченном пространстве. При использовании любого из электродинамических методов расчета поля точность полученных результатов зависит от точности задания граничных условий на поверхностях объектов, расположенных внутри исследуемого пространства и ограничивающих его. Поэтому возникает необходимость использования экспериментальных методов измерений коэффициентов отражения, результаты которых могут быть использованы при численных расчетах структуры электромагнитного поля. Для анализа источников переотраженных волн и их уровней могут применяться методы измерений с использованием импульсных широкополосных сигналов. Одним из вариантов таких методов является многочастотный метод, позволяющий измерять коэффициенты отражения в диапазоне частот с последующим синтезом сигнала во временной области [10].

Полученные результаты данной работы могут быть полезны специалистам в области радиосвязи, электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии.

### Библиографический список

1. WINPROP, Software tool for the Planning of Mobile Communication Networks and for the Prediction of the Field Strength in Urban and Indoor Environments. – <http://winprop.ihf.uni-stuttgart.de>.
2. **Motley, A.J.** Radio coverage in buildings / A.J. Motley, J.M. Keenan // Bell System Technical Journal. 1990. Vol. 8. P. 19-24.
3. **Carciofi, C.** Fast Field Prediction Techniques for Indoor Communication Systems / C. Carciofi, A. Cortina, C. Passerini, S. Salvietti // The 2nd European Personal and Mobile Communications Conference (EPMCC). Bonn, 1997. P. 37-42.
4. **Landron, O.** A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment / O. Landron, M.J. Feuerstein, T.S. Rappaport // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. Vol. 44. – P. 341-351.
5. **Gibson, T.B.** Prediction and Measurement of Wall Insertion Loss / T.B. Gibson, D.C. Jenn // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1999. – Vol. 47. – P. 55-57.
6. **Talbi, L.** Finite difference time domain characterization of indoor radio propagation / L. Talbi, G.Y. Delisle // PIER. 1996. No. 12. P. 251-275.
7. **Golestani-Rad, L.** Rigorous analysis of EM-wave penetration into a typical room using FDTD

- method: The Transfer Function concept / L. Golestani-Rad, J. Rashed-Mohassel, Danaie // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 913–926.
8. **Yee, K.S.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 1966. Vol. 14, No. 3. P. 302-307.
  9. **Taflove, A.** Computational Electrodynamics: the finite-difference time-domain method / A. Taflove, S.C. Hagness. – Artech House, 2000. – 852 p.
  10. **Калинин, А.В.** Многочастотные методики измерения характеристик антенн и аттестации измерительных установок // Антенны. 2004. № 12. С. 30-35.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**S.V. Katin<sup>1</sup>, E.A. Shorokhova<sup>1</sup>, V.A. Yashnov<sup>2</sup>**

## **MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTROMAGNETIC SITUATION INDOORS**

Federal Research and Production Center «Measuring system research institute  
n.a. Yu.Ye. Sedakov»<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state university n.a. N.I. Lobachevsky<sup>2</sup>

**Purpose:** Making the mathematical tools for numerical analysis of the electromagnetic situation indoors given configuration.

**Design/methodology/approach:** Mathematical model is based on the virtual sources method which is a modification ray-tracing method.

**Findings:** It is possible for example to apply the results in problem of radio communication, electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology.

**Research limitations/implications:** It is shown that to account of the waves interferences the regions of space with increased and decreased levels of the electromagnetic radiation power exist, place of the location of which depends, basically, on the operating frequency, antenna parameters, configuration of the bounded space and reflective characteristics of its surfaces.

**Originality/value:** The main peculiarity of the designed mathematical model is an account of the antenna pattern, which can be located in any region of the bounded space.

*Key words:* electromagnetic situation, electromagnetic radiation, ray-tracing method, microwave frequency.

УДК 621.396.96

В.И. Евсеев<sup>1</sup>, О.В. Лавричев<sup>1</sup>, С.В. Хамидулин<sup>2</sup>, В.П. Хранилов<sup>3</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖЕК НА РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРА ГАРМОНИК ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ ПРИ СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**ОАО Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина<sup>1</sup>,  
ОАО ФНПЦ ННИИРТ<sup>2</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

Рассматривается актуальная проблема конструкторско-технологического проектирования микроэлектронной аппаратуры для радиолокации, связанная с влиянием подложек на выходные характеристики интегральных устройств приема-передающих модулей для современных антенных устройств РЛС.

Исследуется модель параметрической чувствительности фильтра гармоник в микрополосковом исполнении, входящего в состав интегрального модуля.

Новизна работы обусловлена использованием компьютерных технологий с целью получения адекватных оценок поведения реальных устройств по их моделям. Оценивается и критически обосновывается выбор математического представления исследуемого устройства.

Полученные результаты и выводы могут использоваться в качестве рекомендаций при разработке перспективных образцов радиолокационной аппаратуры.

*Ключевые слова:* АФАР, фильтр гармоник, подложка.

**Введение**

Прогресс в создании новых типов летательных аппаратов, ставший особенно интенсивным к середине XX века, привел к существенному росту скоростей целей и уменьшению их эффективной поверхности рассеяния. Это потребовало значительного усовершенствования радиолокационных станций (РЛС), как одного из основных средств обнаружения и наблюдения за воздушными целями. Именно в этот период активные фазированные антенные решетки (АФАР) начали широко внедряться в РЛС различного назначения.

Основными активными элементами приема-передающих модулей (ППМ) АФАР [1] являются транзисторы большой мощности, которые для достижения необходимого коэффициента усиления в схеме включаются каскадно. Для достижения наибольшего коэффициента усиления и высокого КПД транзисторы работают в нелинейном режиме, обычно в классе В или С. Особенностью многокаскадного усилителя является также то, что продукты нелинейных преобразований сигналов образуются во всех каскадах так, что в  $n$ -м каскаде присутствует суперпозиция собственных продуктов нелинейности и продуктов, образовавшихся в предыдущих каскадах. Уровень данных искажений влияет на работоспособность ППМ и обязательно оговаривается в технических условиях (ТУ) на изделие, так как этот параметр определяет возможность выполнения требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) всей АФАР. Уровень искажений необходимо учитывать при проектировании систем АФАР, а также предусматривать обязательный технологический контроль на ограниченной серии ППМ [1].

**Схема и характеристики ППМ**

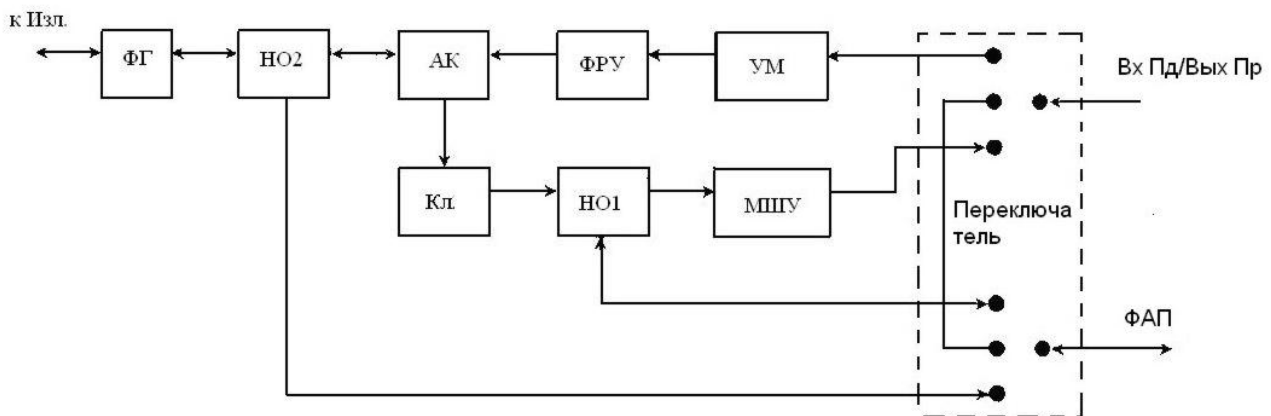
Для обеспечения требований ТУ в конструкции ППМ предусматривают применение фильтра гармоник (ФГ), выполненного на элементах с распределенными параметрами, либо на сосредоточенных элементах в зависимости от частотного диапазона АФАР.

Расположение ФГ зависит от конструкции и типа ППМ. Однако в случае, когда необ-



ходимо понизить уровень высших гармоник, возникающих после антенного коммутатора (АК), ФГ устанавливаются непосредственно на выходе ППМ (рис. 1).

По причине нахождения ФГ непосредственно на выходе ППМ после антенного коммутатора (АК) и направленного ответвителя (НО2), изменение фазы сигнала за счет прохождения через ФГ не учитывается в системе фазовой автоподстройки, что приводит к снижению точности определения местоположения цели. Следовательно, при серийном производстве ФГ для ППМ в составе сегмента АФАР на этапе разработки, необходимо учесть разброс фазовых характеристик ФГ в рабочей полосе частот. Основными техническими требованиями к ФГ для ППМ являются: уровень ослабления высших гармоник; неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания фильтра; стабильность фазочастотной характеристики (ФЧХ) фильтра;



**Рис. 1. Структурная схема ППМ:**

ФГ – фильтр гармоник; НО2 – направленный ответвитель передающей (Пд) части ППМ; АК – антенный коммутатор; НО1 – направленный ответвитель приемника (Пр); КЛ – ключ Пд\Пр; ФРУ – ферритовое развязывающее устройство; УМ – усилитель мощности, МШУ – маломощный усилитель

### **Средства и способы обеспечения характеристик ФГ ППМ при серийном производстве**

Уровень ослабления высших гармоник и неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания формируются на этапе схемотехнического проектирования фильтра и зависят от структуры фильтра, количества звеньев, характеристики фильтра Чебышева, Баттерворта и прочих схемотехнических характеристик и параметров. Конструктивно-технологические факторы, определяемые конструктивными особенностями и реализацией производства ППМ, не оказывают существенного влияния на эти параметры ФГ ППМ.

Стабильность ФЧХ фильтра определяется её изменениями, как в процессе выполнения основных функций, так и под влиянием внешних дестабилизирующих воздействий, и зависит от допусков на рабочие параметры элементов, на основе которых выполнен фильтр для ППМ. Технические требования ФЧХ для приемного канала ППМ устанавливают жесткие ограничения, определяющие её неравномерность в пределах не более  $3^0$ . В противном случае необходимо введение подстройки ФЧХ ППМ до элемента КЛ на схеме ППМ (рис. 1).

Основной источник неравномерности ФЧХ, задающий её стабильность, критически важную для функциональности ППМ для АФАР, определяется статистической неравномерностью воспроизводимости конструктивно-технологических характеристик производственного процесса и рабочих параметров электрорадиоэлементов, передающих трактов и материала подложки несущей платы, составляющей конструктивную основу ППМ. Несмотря на регламентируемые параметры, определенные условиями выбора элементной базы и разра-

ботки конструкции ППМ при их проектировании, в каждом конкретном случае реализации серийного производства ППМ для АФАР, всё же требуется предварительный анализ имеющейся производственной базы и организация входного контроля не только комплектующих элементов, а и материалов, используемых при создании конструкций. Всё это в совокупности, с точки зрения системного анализа производственного процесса, представляет собой группу конструктивно-технологических факторов и определяет, в конечном итоге, качественные показатели производимых ППМ. Следует заметить, что проблема обеспечения стабильности основных характеристик ППМ для АФАР, относящихся к изделиям микроэлектроники, не исчерпывается на этапе их схмотехнического и конструкторского проектирования. Нестабильность параметров элементной базы, материалов и дестабилизирующее воздействие конструктивно-технологических факторов, особенно для опытных партий изделий или при развертывании новых производственных мощностей, приводят к необходимости проработки вопросов нормальной воспроизводимости рабочих характеристик ППМ при любой попытке организовать их серийное производство. Необходимость проверки работоспособности схемы и стабильности критических характеристик в реальных имеющихся производственных условиях становится в этом случае главным условием их успешного серийного производства. Как показывает практика, сложившаяся на промышленных предприятиях приборостроительного профиля [2], подобные проблемы решаются в специализированных подразделениях, имеющих в своем составе специалистов схмотехников и конструкторов-технологов, и оснащенных специализированным оборудованием и средствами вычислительной техники с установленным проблемно-ориентированным программным обеспечением для реализации непрерывной информационной поддержки жизненного цикла профильных изделий средствами CAD, CAE, CAM и PDM в условиях единого информационного пространства.

### Методика и алгоритм расчетов

Основной источник неравномерности ФЧХ для ФГ, выполненного в микрополосковом исполнении, это разброс параметров микрополосковых линий, обусловленный конструктивно-технологическими факторами, и разброс параметров диэлектрического материала.

Решение задачи по исследованию воздействия на рабочие характеристики ФГ конструктивно-технологических факторов при серийном производстве представляется возможным с применением метода анализа параметрической чувствительности ППМ [3]. Цель анализа – выбор материала подложки для изготовления ФГ, выполненного на микрополосковых линиях (МПЛ), и исследование параметрической чувствительности ФГ при серийном производстве.

Исследование параметрической чувствительности ФГ осуществляется в три этапа:

- определение типа модели и программно-алгоритмической реализации, на основе которой строятся последующие решения;
- определение чувствительности характеристик схемы к предельным значениям параметров диэлектрической подложки;
- определение наибольшей чувствительности схемы к разбросу параметров элементов схемы в зависимости от технологии изготовления, либо допусков при применении сосредоточенных элементов.

На примере ФГ для ППМ дециметрового диапазона волн рассмотрена проблема анализа повторяемости характеристик ФГ в зависимости от различных дестабилизирующих факторов и определен максимальный разброс ФЧХ фильтра при серийном производстве. Исследование ФГ произведено средствами специализированной САПР AWR Design Environment.

*Первый этап.* Исходя из критериев выбора типа модели, описанных в [1, 3], выбирается модель на основе схемы замещения (рис. 2).

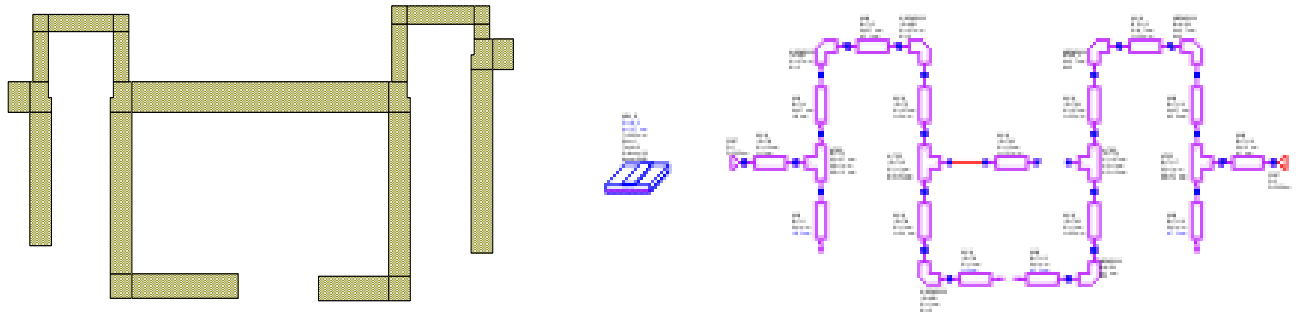
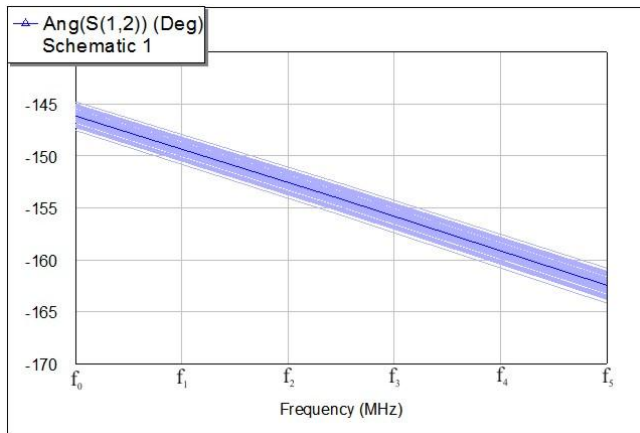
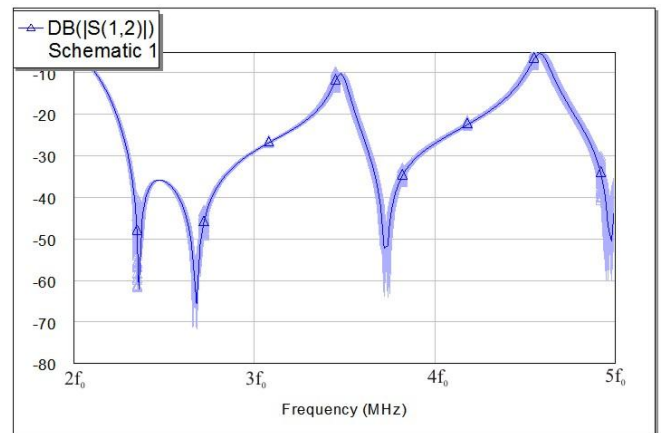


Рис. 2. Модель ФГ, рассчитанная на основе схем замещения

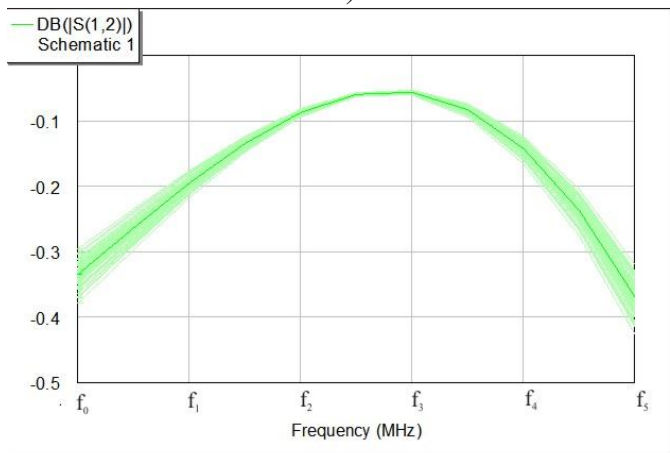
*Второй этап.* Определение чувствительности схемы к предельным значениям параметров диэлектрических подложек из материалов ФЛАН-10, поликор, ДИФЛАР. Данные отечественные материалы наиболее распространены при проектировании СВЧ-аппаратуры на российских предприятиях. Характеристики чувствительности определяются величиной статистического разброса основных параметров ФГ, обеспечивающих его функциональность, относительно их номинальных значений. На приведенных графиках (рис. 3, 4, 5) это наглядно иллюстрируется изображением «размытых» областей значений, сосредоточенных в непосредственной близости к сплошным кривым изменения отображаемых характеристик, соответствующих набором номинальных параметров.



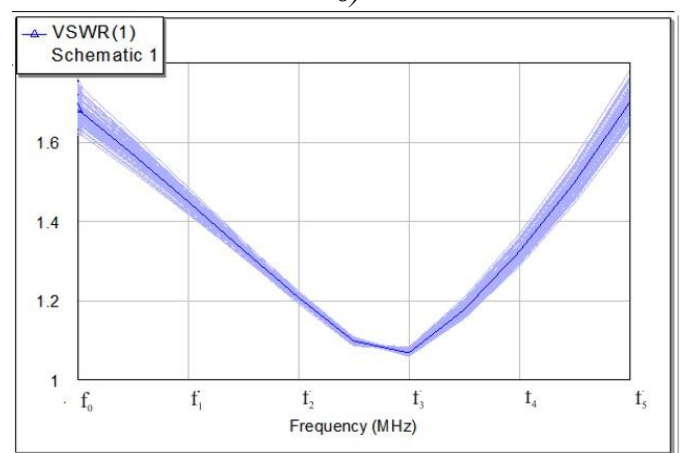
а)



б)



в)



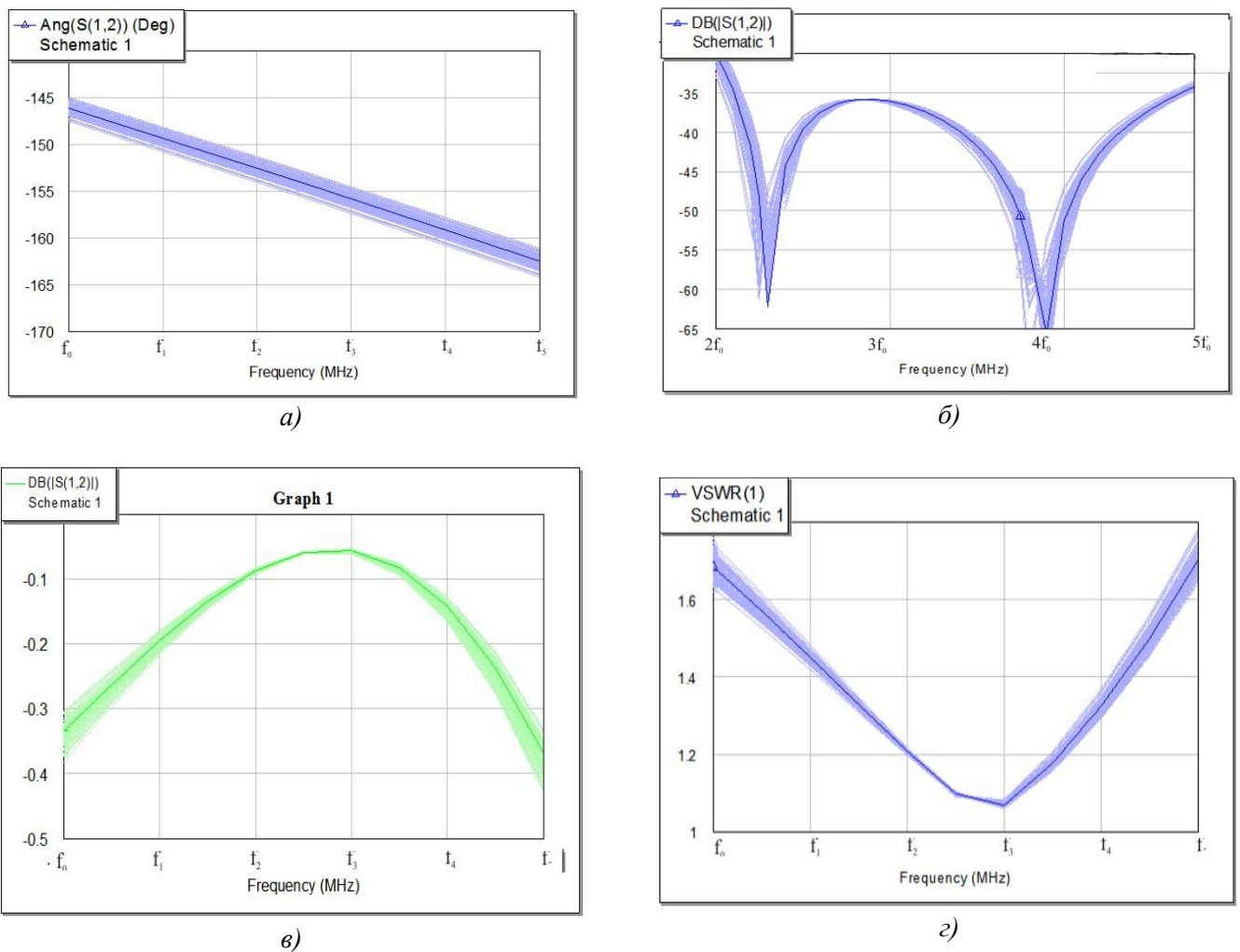
г)

**Рис. 3. Характеристики ФГ на подложке из ФЛАН-10:**

$a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  $b$  - коэффициент передачи;  
 $v$  - коэффициент передачи в рабочей полосе частот;  $z$  - КСВН в рабочей полосе частот

Полученные результаты исследования параметрической чувствительности основных рабочих характеристик ФГ от частоты: изменение фазы коэффициента передачи в рабочей полосе частот; изменение коэффициента передачи в диапазоне и в рабочей полосе частот; изменение КСВН в рабочей полосе частот приведены на рис. 3, 4 и 5.

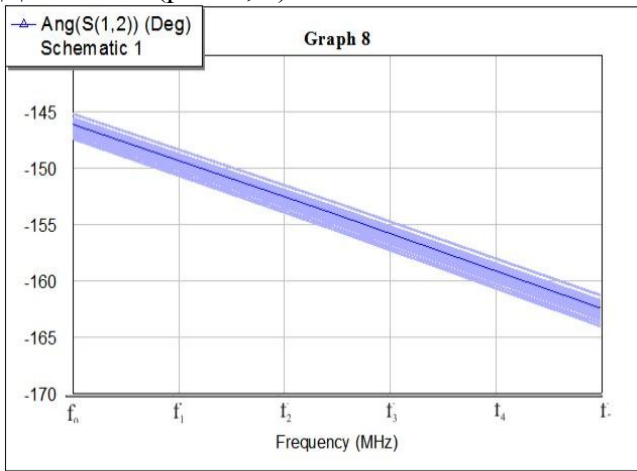
*Третий этап.* Определение наибольшей чувствительности схемы к разбросу параметров МПЛ, обусловленному технологией изготовления при серийном производстве. Ввиду незначительного изменения коэффициента передачи в рабочей полосе частот ФГ (рис. 3  $b$ ,  $v$ , 4  $b$ ,  $v$ , 5  $b$ ,  $v$ ), дальнейший анализ проводится только на основе графиков ФЧХ и КСВ (рис. 6  $a$ ,  $b$ , 7  $a$ ,  $b$ ).

**Рис. 4. Характеристики ФГ на подложке из поликора:**

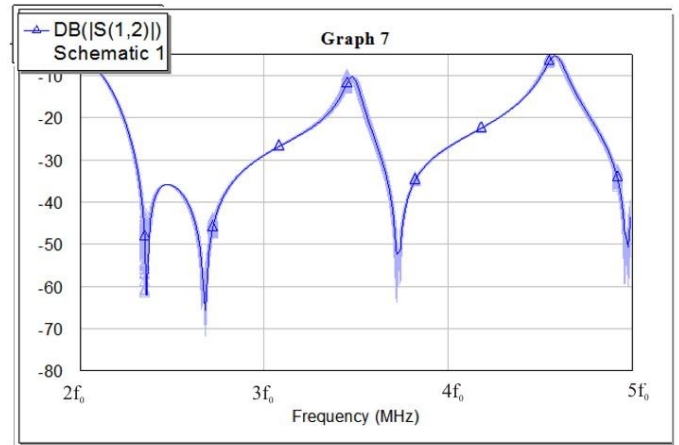
$a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  $b$  - коэффициент передачи;  
 $v$  - коэффициент передачи в рабочей полосе частот;  $z$  - КСВН в рабочей полосе частот

Результаты исследования, приведенные на рис. 3, 4 и 5, позволяют судить о повторяемости рабочих характеристик схемы под воздействием дестабилизирующих конструктивно-технологических факторов при использовании подложек ППМ из ФЛАН, поликора и ДИФЛАРА с учетом серийного производства. Очевидно, что для ППМ на подложке из ФЛАН обеспечивается достаточно хорошая повторяемость параметров, но анализ ФЧХ показывает разброс фазы прошедшего сигнала более  $3^0$ , что приводит к усложнению конструк-

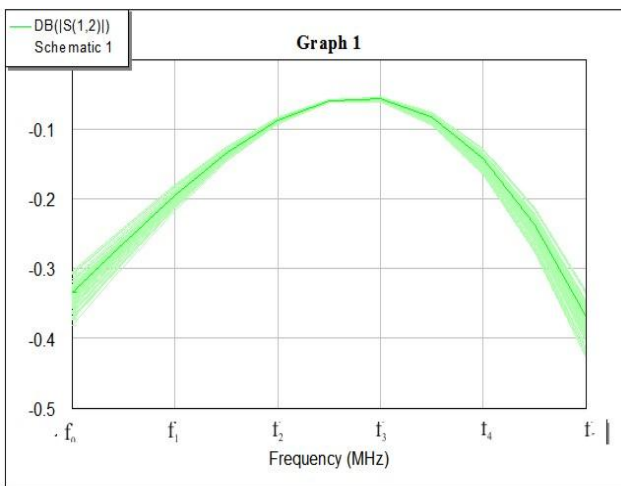
ции ППМ за счет необходимости введения подстройки по приемному каналу. Поэтому дальнейший анализ проводится для ФГ ППМ, реализуемых на подложках из поликора и ДИФЛАРА (рис. 6, 7).



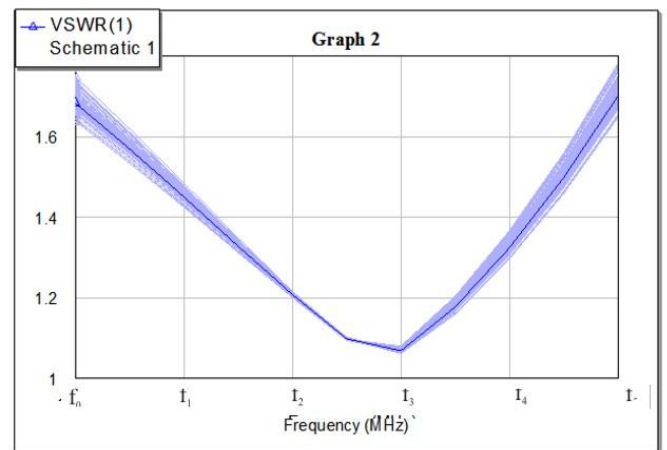
а)



б)



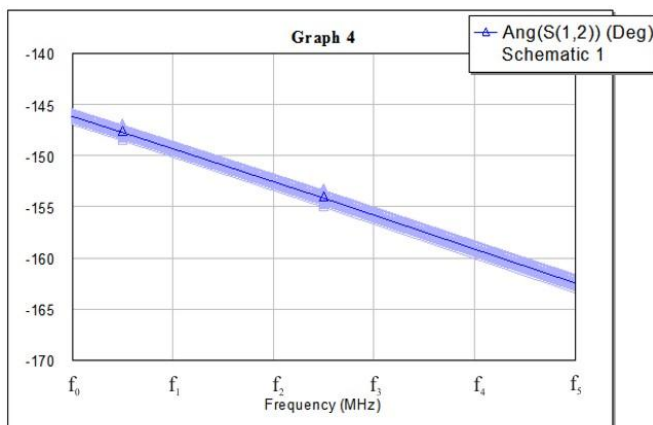
в)



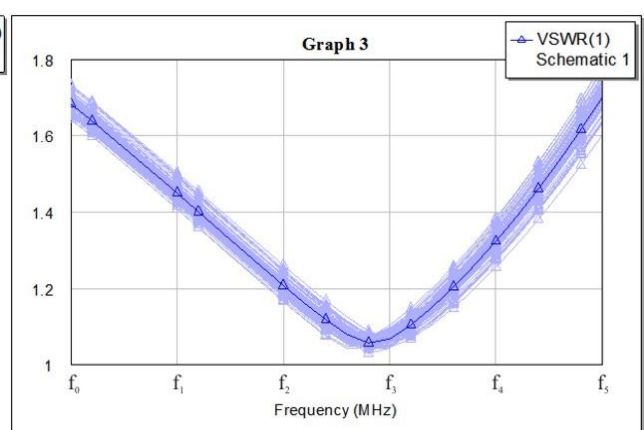
г)

**Рис. 5. Характеристики ФГ на подложке из ДИФЛАРА:**

а - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот; б - коэффициент передачи; в - коэффициент передачи в рабочей полосе частот; г - КСВН в рабочей полосе частот

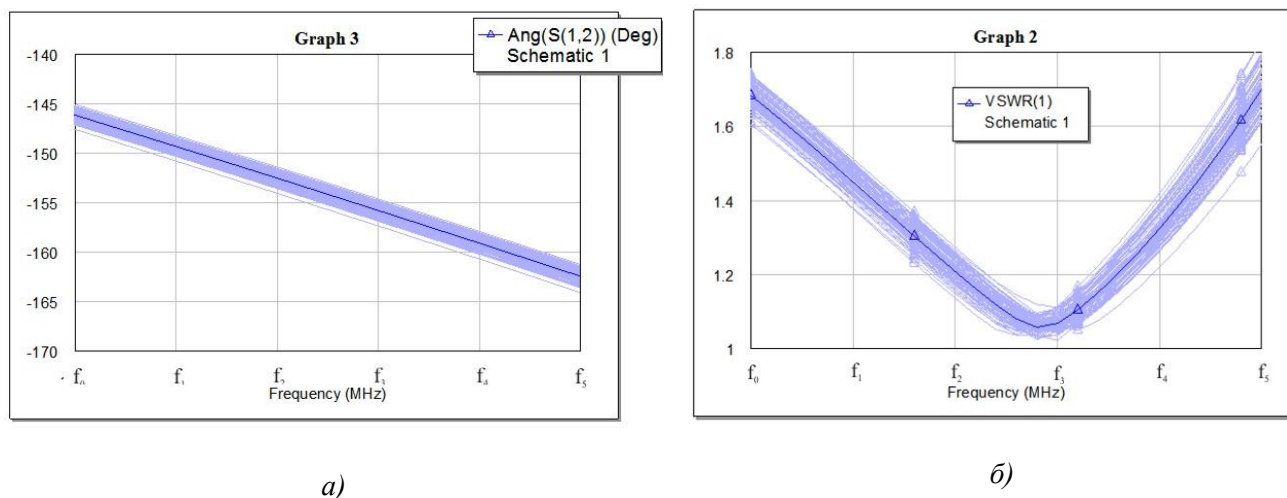


а)



б)

**Рис. 6. Характеристики ФГ на подложке из поликора:**  
 а - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  
 б - КСВН в рабочей полосе частот



**Рис. 7. Характеристики ФГ на подложке из ДИФЛАРА:**

а - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот; б - КСВН в рабочей полосе частот

Исходя из приведенных графиков (рис. 6, 7) становится очевидным выбор в пользу поликора, так как изменение ФЧХ, как наиболее критичной к конструктивно-технологическим факторам характеристики для ФГ ППМ на подложке из этого материала, колеблется в пределах менее  $1^0$ , в отличие от ДИФЛАРА, где это изменение находится в пределах от  $1^0$  до  $3^0$ .

### Выводы

Исследование влияния выбора материала подложки на рабочие параметры ФГ ППМ для АФАР при серийном производстве показали, что более стабильные характеристики имеют фильтры, изготовленные на подложках из поликора. Но нельзя не отметить и преимущества ДИФЛАРА, такие как: достаточная стабильность параметров ФГ, меньший разброс диэлектрической проницаемости, большая пластичность по сравнению с поликором, отсутствие ограничений на размеры и более низкая стоимость. Поэтому при проектировании ФГ ППМ выбор делается исходя из первостепенности задач: наибольшей точности параметров или наименьшей стоимости изготовления.

Результаты проведенных исследований получены в ходе реализации Генерального соглашения о сотрудничестве между ОАО АПЗ им. П.И. Пландина и НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Экспериментальные и расчетные данные получены с использованием оборудования и средств вычислительной техники исследовательской лаборатории автоматизированного проектирования радиоэлектронных систем и микроволновых измерений на кафедре «Компьютерные технологии в проектировании и производстве» ИРИТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

### Библиографический список

1. Хамидулин, С.В. Основные проблемы создания ППМ с АФК метрового диапазона волн / С.В. Хамидулин, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии: мат-лы. Междунар. науч.-технич. конф. ИСТ-2011 / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 132.

2. **Гунин, Л.Н.** Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов: монография / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов; НГТУ. – Н. Новгород. 2006. – 153 с.
3. **Гупта, К.** Машинное проектирование СВЧ устройств: [пер. с англ.] / Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**V.I. Evseev, O.V. Lavrichev, S.V. Khamidulin, V.P. Khranilov**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SUBSTRATE MATERIAL CHOICE  
ON THE PERFORMANCE PARAMETERS OF A FILTER OF HARMONICAS  
IN TRANSMIT-RECEIVE MODULES BY SERIAL MANUFACTURING**

We consider the current problem of the process and engineering design microelectronic apparatus of radar equipment associated with the influence of substrate choice for on to output behaviour integrated devices used in transmit-receive modules of an modern aeriels devices of radars – AESA.

The parametric sensitivity of a microstrip filter of harmonicas model, which is part of an integral unit, is investigated.

The novelty of the work consists in the use of computer technology in order to obtain adequate estimates of behavior of real devices based on their models. A mathematical representation of the device under investigation is estimated and its choice is critically justified.

The obtained results and conclusions can be used as recommendations when developing advanced designs of radar equipment.

*Key words:* AESA, microstrip filter of harmonicas, substrate.

# МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.466.6

А.А. Родин

## ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ НАКАТА ОБРУШЕННЫХ ОДИНОЧНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКИЙ ОТКОС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева,  
Институт кибернетики, Таллиннский технологический университет

Численные решения уравнений мелкой воды подтверждают выводы аналитической теории для необрушенных волн малой амплитуды. Новым моментом здесь является изучение процесса обрушения волн при накате на плоский откос. Вычислена зависимость высоты наката волны от высоты начального импульса и дается ее теоретическая интерпретация.

*Ключевые слова:* накат длинных волн на берег, обрушение, метод конечных объемов, нелинейная теория мелкой воды.

### Введение

Расчеты наката морских волн на берег являются основой для оценки разрушительной силы наводнений, вызванных штормовыми нагонами и цунами. Такие оценки необходимы для разработки планов защиты населения от опасных морских явлений и проектирования сооружений в прибрежной зоне. Поскольку вблизи берега длина волны всегда больше глубины, то для описания волновых процессов в этой зоне в качестве первого приближения можно использовать хорошо известную теорию мелкой воды [1]. В ее рамках в случае линейно наклонного дна и фронтального подхода волны удастся получить точное решение нелинейных уравнений мелкой воды с помощью преобразования годографа, сводящего исходные нелинейные уравнения к эквивалентному линейному волновому уравнению [2]. Это решение существует только, если якобиан преобразований годографа отличен от нуля, что эквивалентно существованию однозначных профилей водной поверхности. На физическом языке однозначный профиль водной поверхности означает необрушенную волну. В рамках этой теории найдено большое число аналитических решений, соответствующих накату на берег волн различной формы (солитон, гауссов или лоренцевый импульсы, синусоидальный импульс и т.п.), например, [3-12]. Что же касается наката на берег волн большой амплитуды, когда волна является обрушенной, то здесь аналитические результаты получены только для случая полностью развитого бора [13-14]. Именно поэтому актуально исследование наката одиночных волн на берег в широком диапазоне изменения их высоты, когда волна опрокидывается еще до подхода к берегу, при этом ее форма не может быть аппроксимирована полностью развитым бором. Здесь пока сделаны еще первые шаги [15-16]. Такая задача и решается в данной работе численно в рамках нелинейных уравнений мелкой воды, записанных в дивергентной форме.

### 1. Математическая модель

Нелинейные уравнения мелкой воды, допускающие существование ударных профилей в волне, могут быть записаны в дивергентной форме



$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ Hu^2 + \frac{1}{2} gH^2 \right] = gh \frac{dh}{dx}, \quad \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [Hu] = 0, \quad (1)$$

где  $H(x,t) = h(x) + \eta(x,t)$  – глубина водного потока;  $\eta(x,t)$  – возвышение водной поверхности над средним уровнем  $z = 0$ ;  $u$  – усредненная горизонтальная скорость водного потока;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h(x)$  – невозмущенная глубина бассейна. Для моделирования наката волн на берег мы предполагаем невозмущенную глубину бассейна постоянной в области ( $0 < x < 250$  м) и равной 1 м, а в области ( $x > 250$  м) линейно убывающей с наклоном 1:6, которая продолжается на берег с тем же наклоном.

Система уравнений (1) решается численно с помощью программного пакета CLAWPACK ([www.amath.washington.edu/~claw/](http://www.amath.washington.edu/~claw/)), использующего метод конечных объемов [17]. Граничные условия на левой границе расчетной области ( $x = 0$ ) соответствуют свободному уходу волны через границу, однако фактически счет останавливался, когда волна, отраженная от берега, подходила к границе. На правой границе расположен пологий откос, выходящий за пределы уровня спокойной воды. Граничным условием на движущейся кромке воды является обращение в нуль полной глубины  $H(x,t) = 0$ , что и определяет локальное положение уреза  $x(t)$ . Размер пространственного шага – 0,1 м, временного – 0,5 с.

Начальные условия соответствовали волне, двигающейся в сторону берега, на ровном дне ( $x < 250$  м). При отсутствии правой части в левом уравнении системы (1), она решается точно и описывает так называемую волну Римана [1, 18-20]:

$$H(x,t) = H_0[x - V(H)t], \quad V = 3\sqrt{gH} - 2\sqrt{gh}, \quad (2)$$

где  $H_0(x)$  – начальная форма волны, которую мы предполагаем достаточно гладкой. В последующих расчетах мы фиксировали начальную форму волны в виде Гауссова импульса:

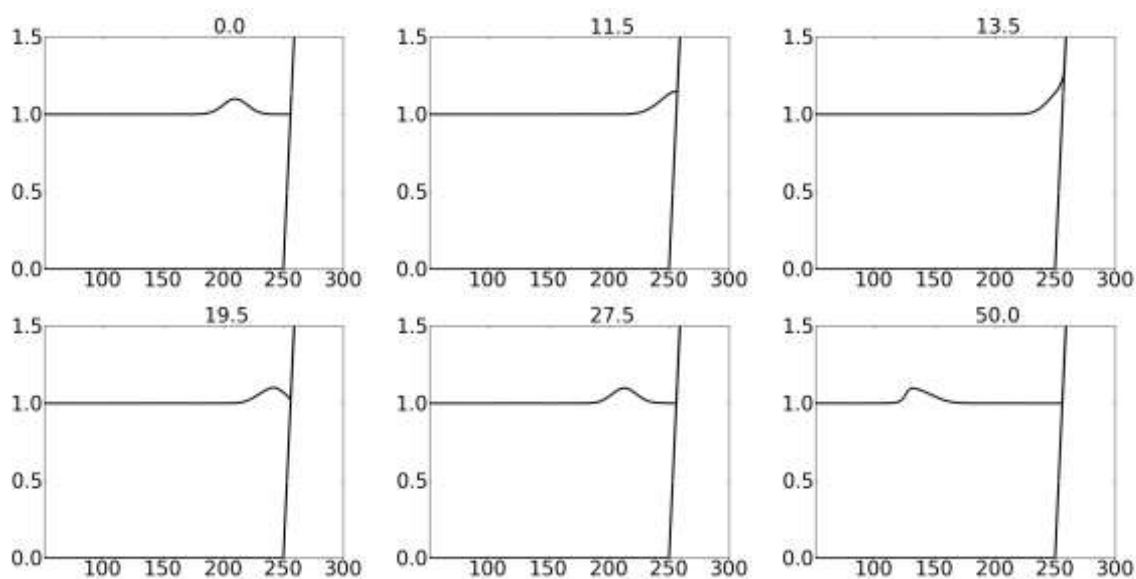
$$H_0(x) = Ae^{(-\beta(x-x_0)^2)}, \quad (3)$$

где  $A$  – амплитуда волны (менялась от 0,1 м до 2,5 м), расстояние  $x_0$  – в расчетах мы используем равным 210 м, параметр  $\beta=0,005 \text{ м}^{-2}$  подбирался так, чтобы изначально заданный импульс находится в непосредственной близости к откосу.

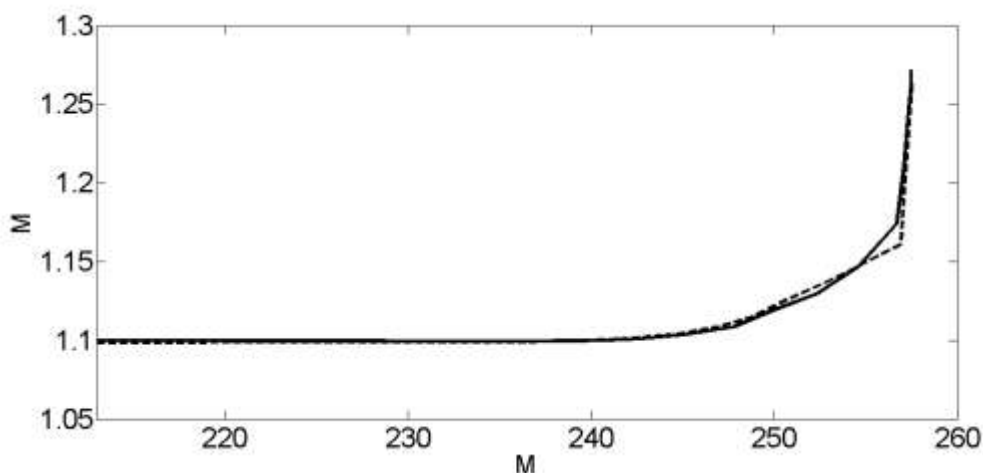
## 2. Результаты численных расчетов

В первой серии расчетов высота волны задана относительно небольшой (0,1 м). Процесс наката на берег и отражения от него показан на рис. 1. Волна достигает максимума наката на берег за время 14,5 с, максимум высоты наката при этом равен 0,27 м над уровнем спокойной воды. Таким образом, высота наката превышает начальную высоту в 2,7 раза. Величина отката ничтожна (0,0005 м ниже невозмущенного уровня). Отраженная волна остается гладкой вплоть до конца численного эксперимента, лишь укрупнившись на переднем фронте к моменту времени 50 с. Изменения высот волн при накате и откате примерно одинаковы (рис. 2).

Во второй серии расчетов высота волны составила 0,5 м. Процесс наката волны на берег и отражения от него показан на рис. 3. Волна накатывается на берег за время 12,5 с и вздымается на высоту 1,65 м над уровнем моря, оставаясь гладкой. Высота наката более чем в три раза превышает начальную высоту волны. Большее усиление высоты волны по сравнению с первым вариантом связано с нелинейным укрупнением волны еще до подхода к откосу, и этот эффект подробно изучался в [4, 7]. Затем волна скатывается с откоса до отметки -0,016 м ниже уровня спокойной воды. В волне, которая распространяется от откоса по ровному дну, появляется ударный фронт и волна затухает. Отметим, что за головной волной при отражении появляется слабая вторая волна, связанная с отражением от кромки шельфа. Этот эффект отсутствует в аналитических решениях наката волны на наклоненный берег малого откоса, но возникал при численных расчетах наката волн на берег не малого уклона [3].



**Рис. 1.** Накат десятисантиметровой одиночной волны на берег с наклоном 1/6 в различные моменты времени



**Рис. 2.** Изменение высоты волны в процессе наката волны на берег и отражения от него. Начальная высота равна 0.1 м (сплошная линия соответствует накату волны; пунктирная – откату)

Более детально изменение высоты волны при накате волны на берег и отражения от него показано на рис. 4. При откате максимальное значение поля находится на откосе, в то время как при накате гребень волны отстоит от откоса. В силу опрокидывания высота отраженной волны меньше высоты падающей волны, поэтому кривые для наката и отката различаются между собой.

В следующей серии расчетов начальная высота волны увеличена до 1,5 м, и такая волна является сильно нелинейной (напомним, что глубина бассейна 1 м). Волна обрушивается еще на кромке шельфа (рис. 5) и после трансформации на кромке, приводящей к появлению пичка на гребне, накатывается на берег на высоту 5 м за 12 с. Уменьшение времени добегания волны до берега связано с образованием ударного фронта, поскольку скорость ударной волны всегда больше скорости римановой волны. Отношение высоты наката к начальной высоте составляет 3,33 (чуть больше, чем в предыдущем случае), что опять же связано с укрупнением переднего склона волны; такие волны дальше накатываются на побе-

режье, как уже отмечалось ранее. Отраженная ударная волна быстро затухает из-за диссипации на ударном фронте, так что вторая волна за ней становится более видимой. Разница в кривых изменения высот накатывающейся и откатывающейся волн еще более заметна (рис. 6).

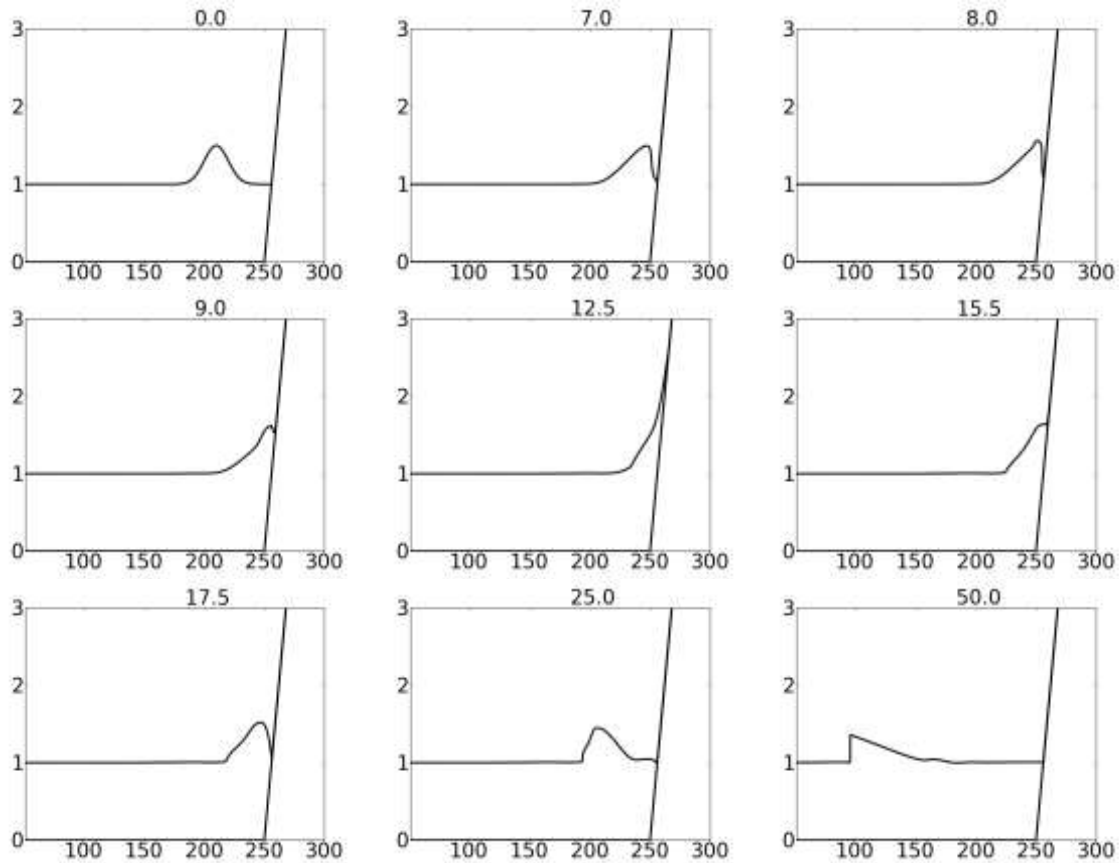


Рис. 3. Накат полуметровой одиночной волны на берег с наклоном 1/6 в различные моменты времени

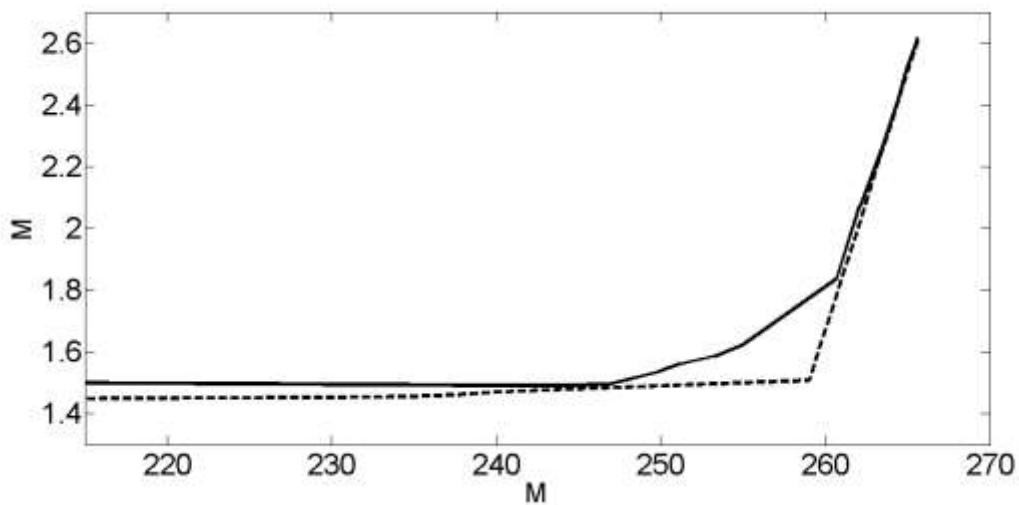
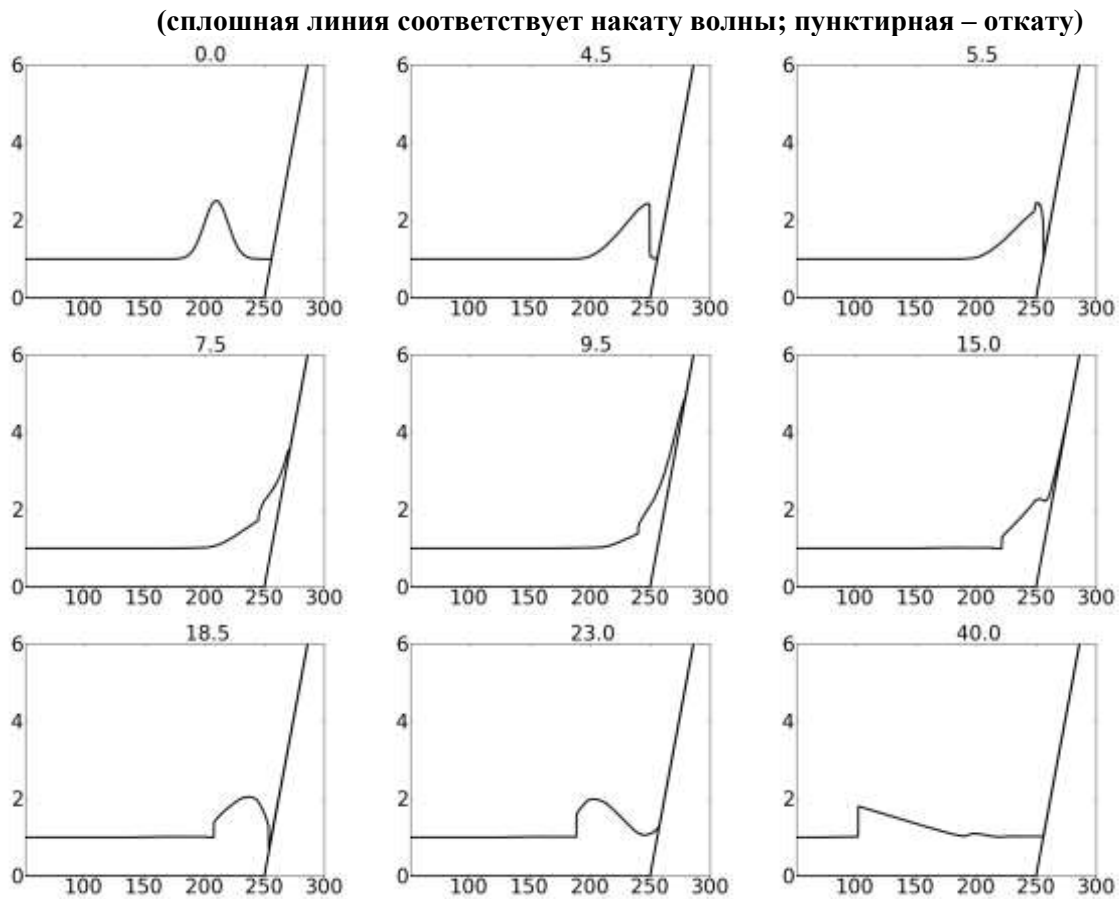
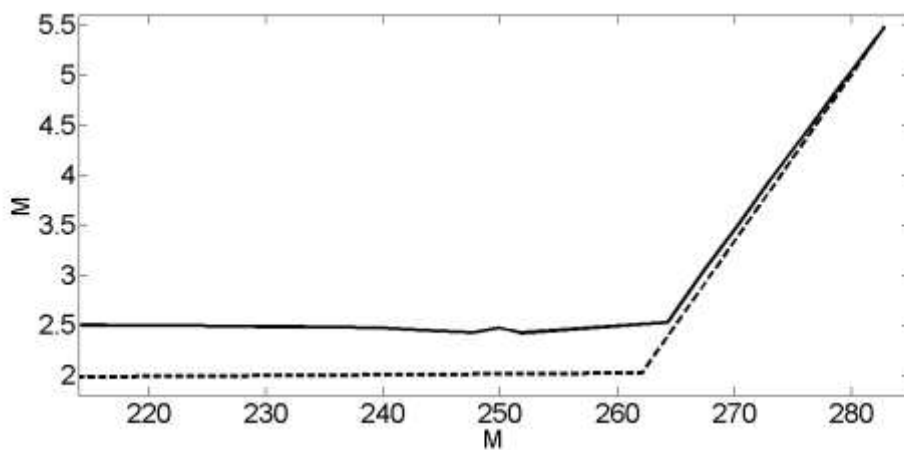


Рис. 4. Изменение высоты волны в процессе наката волны на берег и отражения от него. Начальная высота равна 0.5 м



**Рис. 5. Накат полторамеретровой одиночной волны на берег с наклоном 1/6 в различные моменты времени**



**Рис. 6. Изменение высоты волны в процессе наката волны на берег и отражения от него. Начальная высота волны равна 1,5 м (сплошная линия соответствует накату волны, пунктирная – откату)**

В последнем варианте начальная высота волны экстремально велика – 2,5 м (рис. 7). Обрушение происходит практически мгновенно, и вода поднимается на высоту 8,2 м за 12 с. Величина отката при этом составила 0,3 м. Отношение высоты наката к начальной высоте начинает уменьшаться по сравнению с предыдущими случаями из-за большого затухания на

фронте ударной волны. Разница в амплитудах накатывающейся и отраженной волн ясно видна на рис. 8.

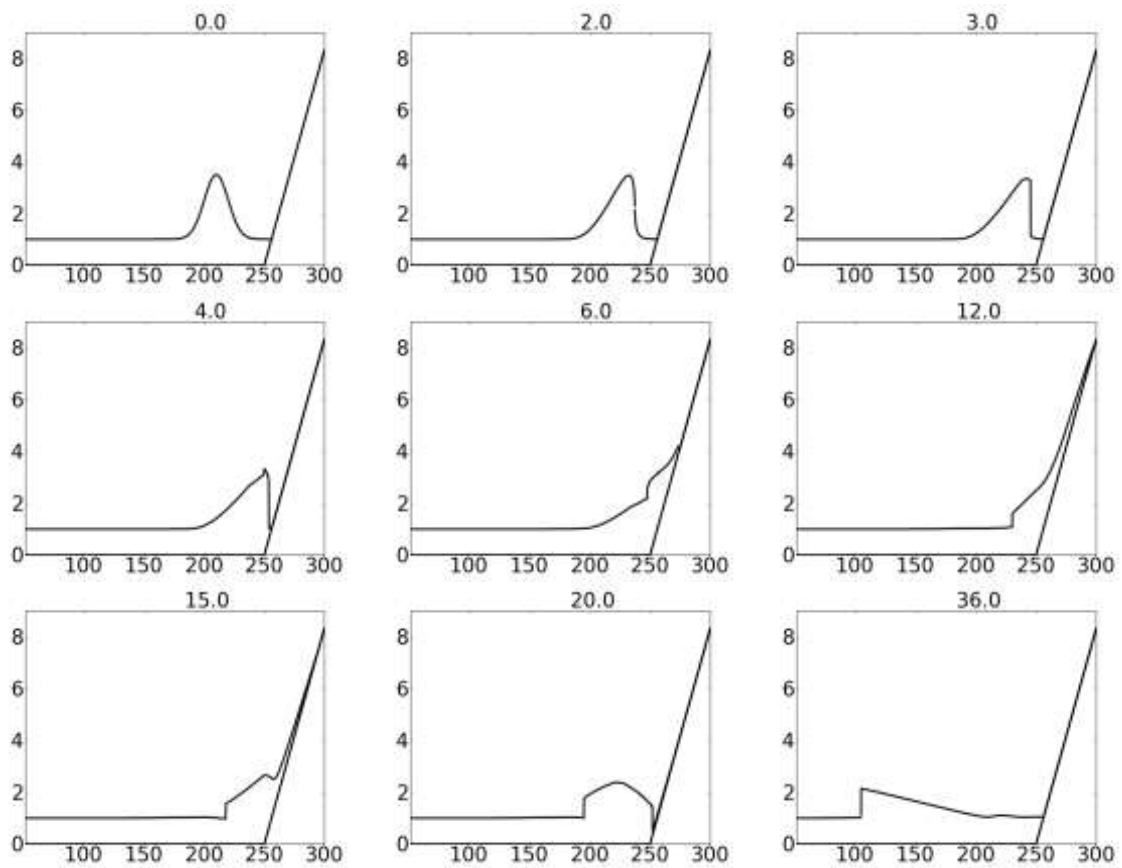


Рис. 7. Накат одиночной волны 2,5 м на берег с наклоном 1/6 в различные моменты времени

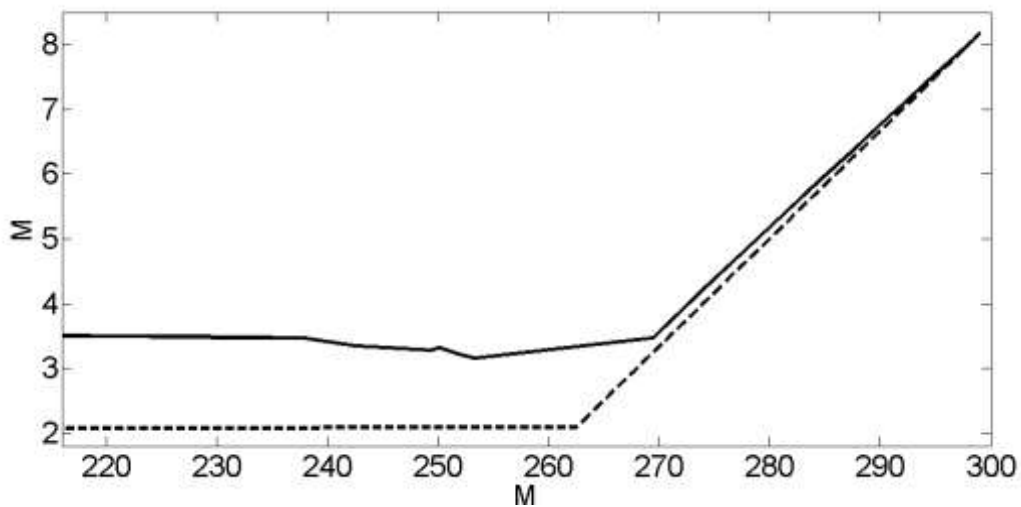


Рис. 8. Изменение высоты волны в процессе наката волны на берег и отражения от него. Начальная высота волны равна 2.5 м (сплошная линия соответствует накату волны, пунктирная – откату)

### Выводы

В работе показано, что обрушение волны влияет как на высоту наката, так и на время накатывания волны на берег. Нелинейно деформированная или обрушенная одиночная волна движутся быстрее, чем волна с гладким профилем. Высота наката возрастает, если к откосу подходит нелинейно деформированная волна или ударная. Однако если волна большой амплитуды, то потери энергии на ее гребне становятся преобладающими и отношение высоты наката к начальной амплитуде импульса начинает убывать.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, а также грантов РФФИ (11-05-00216, 12-05-33087), МК-1440.2012.5, ЕТФ-8870 и SF0140007s11.

### Библиографический список

1. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.
2. **Carrier, G.F.** Water waves of finite amplitude on a sloping beach / G.F. Carrier, H.P. Greenspan // *J. Fluid Mech.* 1958. Vol. 4. – P. 97 - 109.
3. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Нижний Новгород, ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
4. **Didenkulova, I.** New trends in the analytical theory of long sea wave runup // *Applied Wave Mathematics*, Springer, 2009. – P. 265-296.
5. **Carrier, G.F.** Tsunami run-up and draw-down on a plane beach / G.F. Carrier, T.T. Wu, H. Yeh // *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 475. – P. 79-99.
6. **Диденкулова, И.И.** Накат длинных волн на берег: влияние формы подходящей волны / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский // *Океанология.* 2008. Т. 48. № 1. С. 5-10.
7. **Диденкулова, И.И.** Накат нелинейно деформированных волн на берег / И.И. Диденкулова [и др.] // *ДАН.* 2006. Т. 410. № 5. С. 676-678.
8. **Kânoğlu, U.** Nonlinear evolution and run-up-rundown of long waves over a sloping beach // *J. Fluid Mech.* 2004. 513. – P. 363-372.
9. **Pelinovsky, E.** Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave run-up on slopes with different profiles / E. Pelinovsky, R. Mazova // *Natural Hazards.* 1992. Vol. 6. – P. 227 - 249.
10. **Synolakis, C.E.** The runup of solitary waves // *J. Fluid Mech.* 1987. Vol. 185. – P. 523-545.
11. **Synolakis, C.E.** The anomalous behavior of the run-up of cnoidal waves / C.E. Synolakis, M.K. Deb, J.E. Skjelbreia // *Phys. Fluids.* 1988. Vol. 31. № 1. – P. 3-5.
12. **Tinti, S.** Analytical evolution of tsunamis induced by near-shore earthquakes on a constant-slope ocean / S. Tinti, R. Tonini // *J. Fluid Mech.* 2005. Vol. 535. – P. 33-64.
13. **Shen, M.C.** Climb of a bore on a beach. Part 3. Run-up / M.C. Shen, R.E. Meyer // *J. Fluid Mech.* 1963. Vol. 16. №1. – P. 113-125.
14. **Sachdev, P.L.** Motion of a bore over a sloping beach: an approximate analytical approach / P.L. Sachdev, V.S. Seshadri // *J. Fluid Mech.* 1976. Vol.78. №3. – P. 481-487.
15. **Li, Y.** Non-breaking and breaking solitary wave run-up / Y. Li, F. Raichlen // *J. Fluid Mech.* 2002. Vol. 456. – P. 295-318.
16. **Madsen, P.A.** Run-up of tsunamis and long waves in terms of surf-similarity / P.A. Madsen, D.R. Fuhrman // *Coastal Engineering*, 2008. Vol. 55. – P. 209-223.
17. **LeVeque, R.J.** Finite\_volume methods for hyperbolic problems // Cambridge, Cambridge University Press, 2004. – 558 p.
18. **Пелиновский, Е.Н.** Нелинейная деформация волны большой амплитуды на мелководье / Е.Н. Пелиновский, А.А. Родин // *Доклады РАН.* 2011. Т. 438. № 3. С. 337-340.
19. **Диденкулова, И.И.** Формирование экстремальных волн на мелкой воде с учетом обрушения /

- И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский, А.А. Родин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 89-98.
20. **Пелиновский, Е.Н.** Трансформация сильно нелинейной волны в мелководном бассейне / Е.Н. Пелиновский, А.А. Родин // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 343-349.

*Дата поступления  
в редакцию* 22.01.2013

**A.A. Rodin**

## **NUMERICAL CALCULATIONS OF RUN-UP OF SOLITARY BREAKING WAVES ON A PLANE BEACH**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev,  
Institute of Cybernetics, Tallinn university of technology

**Purpose:** The goal of this study is to determine impact of wave breaking on the wave run-up on a plane beach.

**Approach:** Numerical experiments are carried out in the framework of nonlinear shallow water theory. CLAWPACK software package which uses finite volume methods was chosen for this purpose.

**Findings:** Numerical solutions of the nonlinear shallow-water equations confirm findings of the analytic theory for small amplitude waves without breaking. A new feature here is the study of the process of wave breaking. The dependence between the wave run-up height and the height of the initial pulse is calculated and its theoretical interpretation is given.

*Key words:* long wave run-up on the beach, breaking, finite volume method, nonlinear shallow water theory.

УДК 534-143

Е.Ф.Орлов

**ПОЛЕ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается асимптотическое решение известного интегрального представления поля в двухслойной среде как суммы интегралов-полей многократных отражений сферической волны от границ слоя. Решение допускает при описании поля использование картины мнимых источников, число которых зависит от расстояния и определяется углом полного внутреннего отражения от дна.

*Ключевые слова:* акустическая модель океана, акустическое поле в двухслойной среде, метод мнимых источников.

**Введение**

Двухслойная среда – однородный жидкий слой на однородном жидком полупространстве с иными значениями плотности и скорости звука — является простейшей акустической моделью океана [1, 2]. Эта модель, тем не менее, отражает основные и существенные особенности распространения волн в подводной акустике и широко используется при математическом моделировании в этой области. Для описания акустического поля в двухслойной среде используется впервые полученное К. Пекерисом [2] решение в форме нормальных волн. Этот подход получил признание и широко используется как единственный при описании низкочастотного поля в мелкой воде. Заметим, что для идеального волновода с абсолютно отражающими границами, который является, по существу, частным случаем двухслойной среды, наряду с модовым представлением поля используется и эквивалентное ему представление поля суммой полей мнимых источников [1–4]. Заметим также, что некоторые имеющиеся экспериментальные данные по распространению звука в мелком море свидетельствуют о допустимости использования при их описании картины мнимых источников. Ввиду важности проблемы возникает необходимость рассмотрения вопроса о возможной применимости метода изображений (мнимых источников) или метода многократных отражений при описании низкочастотных полей в двухслойных средах.

В работе К. Пекериса [2] путем формального решения волнового уравнения с заданными условиями на границах получено точное интегральное представление поля гармонического источника в двухслойной среде и проанализированы два пути его решения. Первый путь дал результат — модовое представление поля. Вторым — дал представление поля в форме суммы интегралов, описывающих поля сферических волн, распространяющихся в слое при многократном отражении от границ.

В настоящей работе показана возможность решения интегралов, входящих в эту сумму, для случая дальнего поля; на этой основе дан метод описания поля в двухслойной среде как суммы многократных отражений от границ, допускающий использование картины мнимых источников.

**Интегральное представление поля в форме многократных отражений**

Интегральное представление поля в двухслойной среде известно [1, 2]. В работе К. Пекериса [2] оно получено формальным решением волнового уравнения для поля гармонического источника в следующем виде:

$$P(\omega, r, z) = 2 \int_0^{\infty} J_0(kr) \sin \frac{\gamma z_0}{\gamma} \left[ \frac{\gamma \cos(H-z) + i b \gamma_1 \sin(H-z)}{\gamma \cos \gamma H + i b \gamma_1 \sin H} \right] k dk. \quad (1)$$



Здесь  $(0, z_0)$ ,  $(r, z)$  – координаты точек источника и приемника;  $H$  – глубина слоя;  $\kappa = \frac{\omega}{c} \sin \theta$ ,  $\omega$  – круговая частота;  $\omega/c = k$  – волновое число;  $\theta$  – угол падения волны на границу раздела сред;  $\rho, \rho_1, c, c_1$  — плотности и скорости звука в слое и в дне;  $b = \rho/\rho_1$ ,

$$\gamma = \sqrt{(\omega/c)^2 - \kappa^2}, \quad (2)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{(\omega/c_1)^2 - \kappa^2}. \quad (3)$$

Выражение (1) справедливо для области  $z_0 < z < H$  и для области  $0 < z < z_0$ , но после замены  $z_0$  на  $z$ . Интеграл (1) имеет решение в форме суммы нормальных волн.

Мы рассмотрим второй возможный путь решения, обозначенный К. Пекерисом как «лучевая теория» [2].

Использование выражения для коэффициента отражения от дна в виде

$$V = \frac{\gamma - b\gamma_1}{\gamma + b\gamma_1}, \quad (4)$$

которое получается из известного выражения

$$V = \frac{\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} \cos \theta - \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c}\right)^2 \sin^2 \theta}}{\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} \cos \theta + \sqrt{1 - \left(\frac{c_1}{c}\right)^2 \sin^2 \theta}}, \quad (5)$$

с учетом (2)–(4) можно представить (1) в виде ряда [2]:

$$\begin{aligned} P(\omega, r, z, z_0) = & \int_0^\infty J_0(\kappa r) \frac{i}{\gamma} \left\{ \exp(i\gamma(z - z_0)) - \exp(i\gamma(z + z_0)) \right\} + \\ & + V \left[ \exp(i\gamma(z - z_0 + 2H - 2z)) - \exp(i\gamma(z + z_0 + 2H - 2z)) - \right. \\ & \left. - \exp(i\gamma(z - z_0 + 2H)) + \exp(i\gamma(z + z_0 + 2H)) \right] + V^2 [\dots] + \dots \} \kappa d\kappa. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) является точным решением задачи. Первый член суммы (6) представляет собой прямую волну от источника к приемнику. Второй — волну, отраженную от поверхности и приходящую в приемник сверху. Четверка членов в квадратных скобках с множителем  $V$  — четверку волн, имеющих однократное отражение от дна. Первый из них — волну, ушедшую от источника вниз и пришедшую снизу, второй — волну, ушедшую вверх, отраженную от поверхности, дна и пришедшую снизу. Третий — волну, ушедшую вниз, отраженную от дна, поверхности и пришедшую сверху. Четвертый — волну, ушедшую вверх и имеющую на своем пути к приемнику одно отражение от дна и два отражения от поверхности и т.д.

На рис. 1 изображена схема пути распространения сферической волны при многократных отражениях от границ и схема замены его прямым путем от мнимого источника к приемнику. Введем номера мнимых источников  $j$ . Пусть  $j > 0$  для мнимых источников, дающих волны, приходящие в приемник снизу, и  $j < 0$  — сверху. Тогда очевидно, что  $-\infty < j < \infty$  и

$$j = s_j + l_j, \quad (7)$$

где  $s_j$  – число отражений от поверхности;  $l_j$  – от дна на пути от мнимого источника номера  $j$ . Удобно считать, что для мнимых источников, лежащих на отрицательной полуоси  $z$ ,  $s_j$  и

$l_j$  – отрицательные величины. В связи с этим далее снабдим эти величины звездочками, которые не будут ставиться, если речь пойдет об абсолютных значениях  $l_j^*$  и  $s_j^*$ . Так что  $|l_j^*| = l_j$ ,  $|s_j^*| = s_j$ . Если  $j$  – четное число, то:

$$l_j^* = s_j^* = j / 2. \tag{8}$$

Если  $j$  – нечетное число, то:

$$l_j^* = (j+1)/2, \quad s_j^* = (j-1)/2. \tag{9}$$

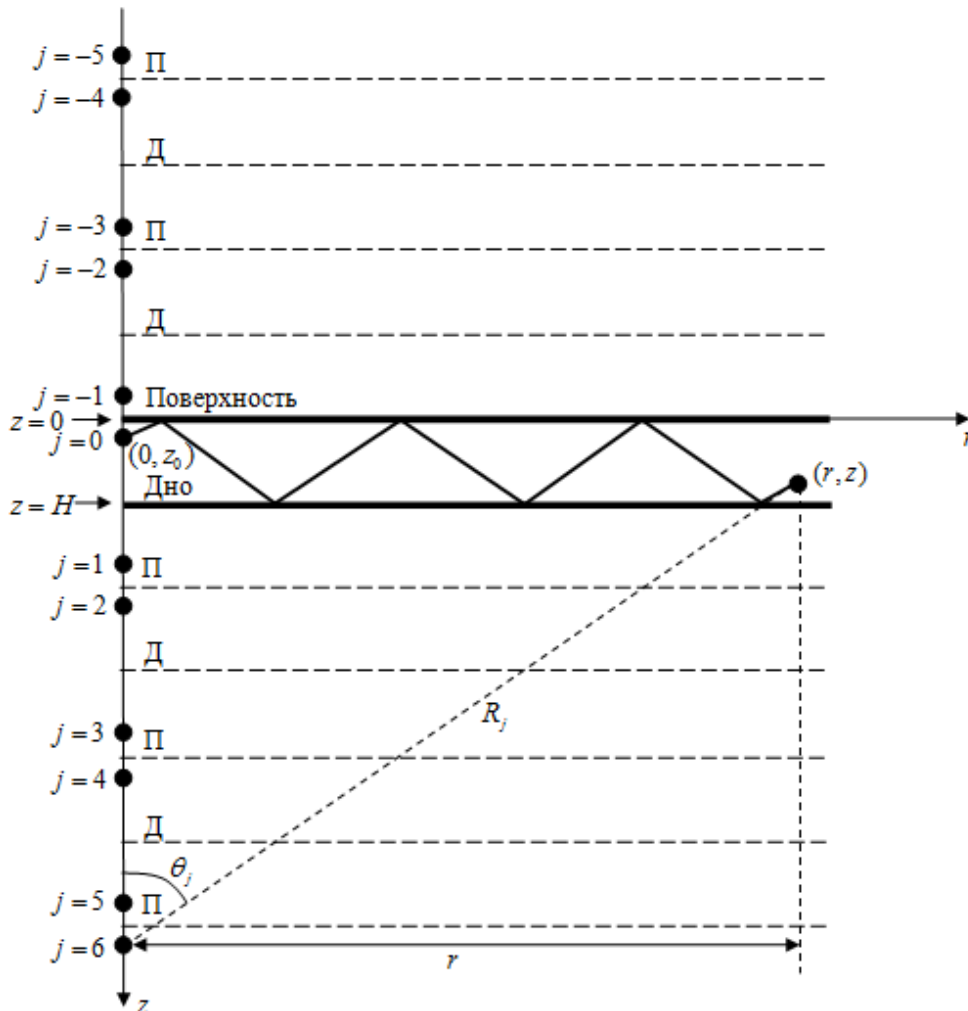
Координаты мнимых источников в принятых обозначениях будут:

$$z_j = 2Hl_j^* + (-1)^j z_0. \tag{10}$$

Длина пути по линии от мнимого источника номера  $j$  до приемника:

$$R_j = r / \sin \theta_j = \sqrt{r^2 + \Delta z_j^2}, \tag{11}$$

где  $\Delta z_j = |z_j - z|$ ,  $\theta_j$  – угол между осью  $z$  и линией, соединяющей источник номера  $j$  с приемником.



**Рис. 1. Картина мнимых источников в слое, глубиной  $H$  :**

$(0, z_0)$ ,  $(r, z)$  – координаты источника и приемника;  $(0, z_j)$  – координаты мнимых источников,  $-\infty < j < \infty$ ; значки Д и П означают изображения плоского дна и поверхности слоя. Пунктир – путь волны от мнимого источника к приемнику,  $R_j = r / \sin \theta_j$

В принятых обозначениях комплексную амплитуду поля (6) можно записать так:

$$P(\omega, r) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} P_j(\omega, r),$$

где

$$P_j(\omega, r) = \int_0^{\infty} (-1)^{s_j} V_j^{l_j} J_0(\kappa r) \exp(i\gamma\Delta z_j) \frac{i\kappa}{\gamma} d\kappa. \quad (12)$$

### Поле в дальней зоне

Преобразуем интеграл (12), [3] используя соотношения:

$$J_0(\kappa r) = \frac{1}{2} [H_0^{(1)}(\kappa r) + H_0^{(2)}(\kappa r)];$$

$$H_0^{(2)}\left(\kappa r \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right)\right) = -H_0^{(1)}(\kappa r),$$

где  $H_0^{(1)}$  и  $H_0^{(2)}$  — функции Ханкеля первого и второго рода. Получим [3]:

$$P_j(\omega, r) = \int_{-\infty}^{\infty} (-1)^{s_j} V_j^{l_j} H_0^{(1)}(\kappa r) \exp(i\gamma\Delta z_j) \frac{i\kappa}{2\gamma} d\kappa. \quad (13)$$

Далее нас будет интересовать поле на больших удалениях от источника. Воспользуемся асимптотой  $H_0^{(1)}(\kappa r)$  при  $\kappa r \gg 1$ :

$$H_0^{(1)} = \sqrt{\frac{2}{\pi\kappa r}} \exp\left(ikr - i\frac{\pi}{4}\right) \left(1 + \frac{1}{8ikr} + \dots\right). \quad (14)$$

Сохраним первый член в разложении (14) и получим:

$$P_j(\omega, r) = \int_{-\infty}^{\infty} (-1)^{s_j} V_j^{l_j} \frac{\sqrt{\kappa} \exp\left(\frac{i\pi}{4}\right)}{\sqrt{2\pi r \gamma}} \exp(iw_j(\kappa)) d\kappa. \quad (15)$$

Здесь

$$w_j(\kappa) = \kappa r + \gamma\Delta z_j = R_j(\kappa \sin \theta_j + \gamma \cos \theta_j). \quad (16)$$

Мы пришли к интегралу вида [1, 3]:

$$P_j(\omega, r) = \int_{-\infty}^{\infty} F_j(\kappa, r) \exp(iw_j(\kappa, \omega, r)) d\kappa, \quad (17)$$

где

$$F_j(\omega, r) = (-1)^{s_j} V_j^{l_j} \frac{\sqrt{\kappa}}{\sqrt{2\pi r \gamma}} \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right). \quad (18)$$

Интеграл (16) вычисляется методом стационарной фазы [1, 5, 6].

Если первая производная от  $w_j(\kappa)$  по  $\kappa$  обращается в некоторой точке  $\kappa = \kappa_0$  в ноль, то разложение  $w_j(\kappa)$  в степенной ряд в окрестности этой точки дает:

$$w_j(\kappa) = w_j(\kappa_0) + w''(\kappa_0) \frac{(\kappa - \kappa_0)^2}{2} + \frac{w'''(\kappa_0)(\kappa - \kappa_0)^3}{6}. \quad (19)$$

Если остаточный член разложения мал, то, ограничиваясь первыми двумя членами, будем иметь:

$$P_j = \int_{-\infty}^{\infty} F_j(\kappa) \exp(iw_j(\kappa_0)) \exp\left(iw''(\kappa_0) \frac{(\kappa - \kappa_0)^2}{2}\right) d\kappa. \quad (20)$$

В нашем случае из (16) с учетом (2), (4), (11) получаем:

$$\kappa_0 = k \sin \theta_j, \quad w_j(\kappa_0) = kR_j, \quad (21)$$

$$w''(\kappa_0) = -\frac{R_j}{k \cos^2 \theta_j}. \quad (22)$$

Эффективный интервал интегрирования в (20) определяется из известного условия [5, 7]:

$$\frac{(\kappa - \kappa_0)^2 w''(\kappa_0)}{2} = \pi. \quad (23)$$

Вклад в величину интеграла при интегрировании по  $\kappa$  вне интервала

$$\Delta\kappa = (\kappa - \kappa_0) = \sqrt{\frac{2\pi}{w''(\kappa_0)}} \quad (24)$$

пренебрежимо мал. Это ключевой момент в работе, открывающий возможность представления поля в двухслойной среде в виде суммы полей мнимых источников. Тогда, если функция  $F_j(\kappa)$  на интервале  $\Delta\kappa$  может быть представлена ее значением вблизи точки  $\kappa = \kappa_0$ , т. е. когда:

$$F'_j(\kappa_0)\Delta\kappa \ll F_j(\kappa_0), \quad (25)$$

интеграл (20) дает:

$$P_j = F_j(\kappa_0) \exp(ik_0 R_j) \exp\left(\mp i \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{\frac{2\pi k}{\pm R_j}} \cos^2 \theta_j. \quad (26)$$

С учетом (18) получаем:

$$P_j = \frac{(-1)^{s_j} V_j^{l_j}}{R_j} \exp(ikR_j). \quad (27)$$

Мы получили, что поле в дальней зоне при  $\kappa r \gg 1$  при выполнении условий (24), (25) можно представить в виде

$$P(\omega, r) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} A_j(r, z) \exp(i\omega\tau_j), \quad (28)$$

где

$$A_j(r, z, z_0) = \frac{(-1)^{s_j} V_j^{l_j} \sin \theta_j}{r}, \quad \tau_j = \frac{r}{c \sin \theta_j}. \quad (29)$$

Оценим выполнимость основных условий применимости формулы (28) для случая распространения волн в двухслойной среде. В этом случае коэффициент отражения от дна, определяющий зависимость  $F_j(\kappa)$ , дается выражением (5).

Основное требование, которое должно быть выполнено, — это малость изменения функции  $F_j(\kappa)$  на интервале  $\Delta\kappa$  (23). Оценим величину этого интервала. Имея ввиду (21), (22), напомним:

$$\Delta\kappa = \kappa - \kappa_0 = \sqrt{\frac{2\pi}{\pm w''(\kappa_0)}} = \sqrt{\frac{2\pi k}{R_j}} \cos \theta_j,$$

$$\Delta\kappa = k \sqrt{\frac{2\pi k}{k^2 R_j}} \cos \theta_j = k \sqrt{\frac{\lambda}{r}} \cos \theta_j.$$

Эффективный интервал углов  $\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{ef}}$  при интегрировании по переменной  $\kappa = k \sin \theta$  составляет:

$$\sin \theta_{\text{ef}} - \sin \theta_j = \pm \sqrt{\frac{\lambda}{r}} \sin \theta_j \cos \theta_j, \quad (30)$$

где  $\lambda$  — длина волны источника.

Если учесть, что нас интересует поле на дистанции  $r \sim (10^3 - 10^4)\lambda$  и более, то интервал интегрирования будет на порядок, на два менее диапазона значений  $\kappa$ .

Рассмотрим поведение функции  $F(\kappa)$  для двухслойной среды во всем диапазоне изменения  $\kappa$ :  $0 \leq \kappa \leq k$ , т.е. в диапазоне углов:  $\pi/2 > \theta_j \geq 0$ . Поведение  $F(\kappa)$  определяется угловой зависимостью коэффициента отражения от дна  $V(\kappa)$ , (4), (5). Эта зависимость представляет собой своего рода  $z$ -функцию ([1], с. 12). При  $0 \leq \kappa \leq k_1$  модуль коэффициента отражения меньше единицы ( $|V| < 1$ ). Здесь  $\kappa_1 = k \sin \theta_1$ , где  $\theta_1$  – граничный угол полного внутреннего отражения, равный  $\theta_1 = \arcsin n$ , где  $n = c/c_1$ , т.е.  $\kappa_1 = kn = \omega/c_1$ . При  $k_1 < \kappa < k$   $|V| = 1$  и фаза есть монотонная функция, имеющая свои значения  $\varphi(\kappa = k_1) = 0$  и  $\varphi(\kappa = k) = \pi$ , т.е.:

$$V = \exp(i\varphi), \quad \varphi = -2 \operatorname{arctg} \frac{b\sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\cos \theta}. \quad (31)$$

Область распространяющихся в слое волн, не имеющих потерь при отражениях, ограничена интервалом  $k_1 \leq \kappa \leq k$ . На границах этой области при  $k_1 \pm \Delta\kappa$  и  $k \pm \Delta\kappa$  модуль коэффициента отражения терпит резкие изменения и отраженное поле при этих значениях нельзя представить в форме (27) [1, 3]. Вкладом результата интегрирования в (15) по этим областям с углами вблизи особых точек (31) можно пренебречь. Следовательно, в сумме (28) необходимо учесть только те члены, для которых:

$$k_1 + \Delta\kappa < \kappa_j < k - \Delta\kappa. \quad (32)$$

В сумме (28) остается  $2(N - M)$  членов, где  $N$  определяется условием  $\theta_N > \theta_1 + \Delta\theta$ , а  $M$  определяется из условия  $\theta_M < \pi/2 - \Delta\theta$ .

Для двухслойной среды формула (28) будет иметь вид:

$$P(\omega, r, z, z_0) = \sum_{j=-N}^{+N} A_j(r, z, z_0) \exp(i\omega\tau_j(r, z, z_0)). \quad (33)$$

Здесь диапазон номеров мнимых источников определяется из условий  $\theta_N \geq \arcsin(c/c_1) - \Delta\theta_{\text{ef}}$ ;  $\theta_M < \pi/2 - \Delta\theta_{\text{ef}}$ , где эффективный интервал углов  $\Delta\theta_{\text{ef}}$  зависит от отношения  $\lambda/r$  (30);

$$A_j(r, z, z_0) = \frac{(-1)^{s_j} \exp(i\varphi_j l_j)}{r} \sin \theta_j; \quad (34)$$

$$\tau_j = \frac{R_j}{c} = \frac{r}{c \sin \theta_j} = \frac{\sqrt{r^2 + \Delta z_j^2}}{c}; \quad (35)$$

фаза  $\varphi_j$  отраженной от дна волны дается выражением (31) с заменой  $\theta$  на  $\theta_j$ .

### Заключение

Представление поля в двухслойной среде в форме многократных отражений (33) эквивалентно модовому представлению. Оно расширяет возможности моделирования и интерпретации экспериментальных результатов, в частности, по исследованию явлений интерференции широкополосного звука в среде, частотно-фазовой и пространственно-временной структур поля импульсных сигналов.

### Библиографический список

1. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 344 с.
2. **Пекерис К.** Теория распространения звука взрыва в мелкой воде // Распространение звука в океане: сб. ст.: [пер. с англ. под ред. Л.М. Бреховских]. – М.: Издательство иностранной литературы, 1951. С. 48–156.

3. **Бреховских, Л.М.** Теоретические основы акустики океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. – М.: Наука, 2007. – 370 с.
4. **Толстой, И.** Акустика океана / И. Толстой, К.С. Клей. – М.: Мир, 1969. – 304 с.
5. **Зверев, В.А.** Радиооптика (преобразования сигналов в радио и оптике) / В.А. Зверев.– М.: Советское радио, 1975. – 304 с.
6. **Вакман, Д.Е.** Асимптотические методы в линейной радиотехнике / Д.Е. Вакман. – М.: Советское радио, 1962. – 248 с.
7. **Янке, Е.** Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1977. – 342 с.

*Дата поступления  
в редакцию 24.001.2013*

**E.F. Orlov**

## **THE FIELD OF THE FREQUENTATIVE REFLECTIONS IN TWO-LAYER AMBIENCE**

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

The asymptotic decision of the known integral presentation of the field is Given in two-layer ambience as amounts integral-flap of the frequentative reflections of the spherical wave from borders layer. The Decision allows at description of the field use the picture of the rumpled sources, which number depends on distances and is defined углом of the full internal reflection from bottom.

*Key words:* acoustic model of the ocean, acoustic field in two-layer ambience, method of the rumpled sources.

УДК 537.86

Н.В. Асеева<sup>1</sup>, Е.М. Громов<sup>1</sup>, О.В. Подчищаева<sup>2</sup>, В.В. Тютин<sup>1</sup>**ДИНАМИКА СОЛИТОНОВ В РАМКАХ РАСШИРЕННОГО  
НЕОДНОРОДНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА  
С УЧЕТОМ НЕЛОКАЛЬНОСТИ НЕЛИНЕЙНОСТИ**Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>2</sup>

Показано, что уменьшение волнового числа пакетов, обусловленное пространственным индуцированным рассеянием Рамана, можно компенсировать возрастающими в пространстве линейной дисперсией второго порядка и кубичной нелинейностью, увеличивающими волновое число пакета. Аналитически найден новый класс солитонов, существование которых обусловлено равновесием индуцированного рассеяния и неоднородности среды. Аналитически найден режим динамического равновесия рассеяния и неоднородности среды, при котором параметры солитона меняются во времени периодически. Аналитические результаты подтверждены численным счетом.

*Ключевые слова:* расширенное нелинейное уравнение Шредингера, солитон, пространственное вынужденное рассеяние Рамана, неоднородность, линейная дисперсия второго порядка, кубичная нелинейность, аналитическое исследование, численный эксперимент

**Введение**

Интерес к солитонам, как локализованным, стационарным и устойчивым волновым пакетам, обусловлен их возможностью сохранять без изменений свою форму в течение длительного времени. Солитонные решения возникают в нелинейных моделях различных областей физики, например, при исследовании оптических импульсов в волоконно-оптических линиях связи, электромагнитных и ленгмюровских волн в плазме, поверхностных волн на глубокой воде [1–4].

Динамика высокочастотных (ВЧ) волновых пакетов довольно большой протяженности хорошо описывается классическим нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) [5, 6]. Солитонное решение в рамках этого уравнения возникает в результате равновесия линейной дисперсии второго порядка и кубичной нелинейности.

Динамика ВЧ волновых пакетов малой протяженности описывается в рамках нелинейного уравнения Шредингера третьего порядка (НУШ-3) [7–13], учитывающего члены третьего порядка малости: нелинейную дисперсию (самоукручение) [14], вынужденное рассеяние Рамана [15, 16] и дисперсию третьего порядка. В рамках НУШ-3 без вынужденного рассеяния Рамана солитонное решение возникает в результате равновесия линейной дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии [17–24]. В [25, 26] были найдены стационарные нелокализованные волны перепада в рамках НУШ-3 без учета линейной дисперсии третьего порядка. Это решение существует в результате равновесия нелинейной дисперсии и вынужденного рассеяния Рамана.

Вынужденное рамановское рассеяние приводит к сдвигу спектра частот солитона в область низких частот [15, 16], что ведет к его разрушению. В работе [27] была рассмотрена компенсация рамановского рассеяния линейным излучением волнового поля малой интенсивности из области ядра солитона. Компенсация рамановского рассеяния в неоднородных средах рассматривалась в следующих случаях: для сред с периодической линейной дисперсией второго порядка [28, 29], для сред со сдвинутой точкой нулевой дисперсии [30] и для волоконных передающих линий связи с убывающей дисперсией [31].

Вынужденное рамановское рассеяние в пространственном представлении (пространственное вынужденное рассеяние Рамана) приводит к сдвигу спектра волнового числа соли-

тона в область малых значений. В то время неоднородность среды также приводит к изменению волнового числа волнового пакета. В частности, в приближении геометрической оптики величина изменения волнового числа в плавно неоднородной среде описывается хорошо известным уравнением  $\dot{k} = -\partial\omega/\partial\xi$ , где  $\omega = \omega(k, \xi, |U|^2)$  - дисперсионное соотношение. При неоднородности линейной дисперсии второго порядка  $q(\xi) = -\partial^2\omega/\partial k^2$  скорость изменения волнового числа пропорциональна градиенту дисперсии  $\dot{k} = (\partial q/\partial\xi)(k - k_0)^2/2$  и при положительном градиенте дисперсии  $\partial q/\partial\xi > 0$  волновое число возрастает. Равновесие между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающей дисперсии второго порядка приводит к стабилизации спектра волнового числа солитона [32]. При неоднородности кубичной нелинейности среды  $\alpha(\xi) = -\partial\omega/\partial|U|^2$  скорость изменения волнового числа пропорциональна градиенту нелинейности  $\dot{k} = (\partial\alpha/\partial\xi)|U|^2$  и при положительном градиенте нелинейности  $\partial\alpha/\partial\xi > 0$  волновое число солитона возрастает. Равновесие между эффектами вынужденного пространственного рассеяния Рамана и возрастающей кубичной нелинейностью также приводит к стабилизации спектра волнового числа солитона.

В данной работе рассмотрена динамика солитона в средах с пространственным вынужденным рассеянием Рамана и неоднородностями как линейной дисперсии второго порядка, так и кубичной нелинейности. Аналитически найдено солитонное решение. Этот солитон существует в результате равновесия вынужденного пространственного рассеяния Рамана и возрастающих дисперсии второго порядка и нелинейности. Найден режим динамического равновесия между вынужденным рамановским рассеянием и неоднородностями среды, при котором существует солитон с периодически изменяющимися во времени параметрами.

### Основное уравнение и интегралы

Рассмотрим динамику высокочастотного волнового поля  $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$  в рамках расширенного НУШ при учете пространственного вынужденного рассеяния Рамана и с неоднородностями как линейной дисперсии второго порядка, так и нелинейности:

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

где  $\mu$  - параметр вынужденного рассеяния.

Уравнение (1) при нулевых условиях на бесконечности  $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$  имеет следующие интегралы:

– скорость изменения энергии волнового поля:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} K|U|^2 d\xi, \quad (2)$$

– скорость изменения импульса волнового поля:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} K|U|^2 d\xi = -\frac{\mu}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi}\right)^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} \left|\frac{\partial U}{\partial \xi}\right|^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} |U|^4 d\xi, \quad (3)$$

– скорость изменения квадрата модуля градиента волнового поля:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left|\frac{\partial U}{\partial \xi}\right|^2 d\xi = -\mu \int_{-\infty}^{+\infty} K \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi}\right)^2 d\xi + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} K|U|^4 d\xi + \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha K \frac{\partial |U|^4}{\partial \xi} d\xi, \quad (4)$$

– скорость изменения квадрата градиента интенсивности волнового поля:



$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} q \frac{\partial^2 |U|^2}{\partial \xi^2} \frac{\partial (K|U|^2)}{\partial \xi} d\xi, \quad (5)$$

– скорость изменения квадрата интенсивности волнового поля:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi = -2 \int_{-\infty}^{+\infty} q |U|^2 \frac{\partial (K|U|^2)}{\partial \xi} d\xi, \quad (6)$$

– скорость изменения первого момента интенсивности волнового поля:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} q K |U|^2 d\xi, \quad (7)$$

где  $U = |U| \exp(i\varphi)$  - огибающая волнового поля;  $K = \partial \varphi / \partial \xi$  - добавочное локальное волновое число пакета.

### Аналитические результаты

При анализе динамики волнового пакета, предположим, что масштабы пространственных неоднородностей и дисперсии второго порядка, и нелинейности среды, и волнового числа  $K$ , много больше характерного масштаба огибающей волнового пакета  $L_{q,\alpha,K} \gg L_{|U|}$ . Тогда приближенное пространственное изменение волнового числа в

окрестности «центра масс» солитона  $\bar{\xi} = N^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi$  ( $N = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\xi$ ) можно описать линейной функцией  $K(\xi, t) = K(\bar{\xi}) + (\partial K / \partial \xi)_{\bar{\xi}} (\xi - \bar{\xi})$ . Тогда из мнимой части уравнения (1) при условии  $(\partial |U| / \partial \xi)_{\bar{\xi}} = 0$  можно получить градиент волнового числа:

$$\left( \frac{\partial K}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} = - \left( \frac{2}{q|U|} \frac{\partial |U|}{\partial t} \right)_{\bar{\xi}}. \quad (8)$$

Пространственное изменение волнового числа вызвано изменением во времени амплитуды волнового пакета. Для солитонно - подобных пакетов  $N(t) \sim |U(\bar{\xi})| \sqrt{q(\bar{\xi}) / \alpha(\bar{\xi})}$  при учете (2) и (7) мы получаем закон распределения волнового числа:

$$K(\xi, t) = K(\bar{\xi}) \left( 1 - \left( \frac{q'(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} + \frac{\alpha'(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) (\xi - \bar{\xi}) \right), \quad (9)$$

где  $q'(\bar{\xi}) = (\partial q / \partial \xi)_{\bar{\xi}}$  и  $\alpha'(\bar{\xi}) = (\partial \alpha / \partial \xi)_{\bar{\xi}}$  - градиенты дисперсии второго порядка и кубичной нелинейности в точке «центра масс» пакета. При учете (9) система (2)–(7) принимает вид:

$$2n \frac{dk}{dt} = -\mu \frac{I_0}{N_0} i + q'(\bar{\xi}) z + \alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} m - 2q'(\bar{\xi}) n k^2, \quad (10)$$

$$\frac{dz}{dt} = \left( 2\alpha'(\bar{\xi}) \frac{M_0}{N_0} m + q'(\bar{\xi}) \frac{\alpha(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} \frac{M_0}{N_0} m - \mu \frac{I_0}{N_0} i \right) k, \quad (11)$$

$$\frac{di}{dt} = \left( 2q'(\bar{\xi}) + 3\alpha'(\bar{\xi}) \frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) k i, \quad (12)$$

$$\frac{dm}{dt} = \left( 2q'(\bar{\xi}) + \alpha'(\bar{\xi}) \frac{q(\bar{\xi})}{\alpha(\bar{\xi})} \right) k m, \quad (13)$$

$$\frac{dn}{dt} = q'(\bar{\xi})kn, \tag{14}$$

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = q(\bar{\xi})k, \tag{15}$$

где  $k = K(\bar{\xi})$  - волновое число в «центре масс» волнового пакета;  $n = N / N_0$ ,  $i = I / I_0$ ,

$$z = Z / N_0, \quad m = M / M_0; \quad Z = \int_{-\infty}^{\infty} |\partial U / \partial \xi|^2 d\xi, \quad I = \int_{-\infty}^{\infty} (\partial |U|^2 / \partial \xi)^2 d\xi, \quad M = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi$$

- текущие интегральные характеристики волнового пакета;  $N_0, M_0, I_0, Z_0$  - исходные интегральные характеристики волнового пакета. Система уравнений (10)–(15) имеет состояние равновесия

$$k = 0, \quad \mu I_0 = q'(\bar{\xi}_0)Z_0 + \alpha'(\bar{\xi}_0)M_0. \tag{16}$$

При выполнении (16) интегралы и волновое число волнового пакета во времени не меняются, что соответствует равновесию вынужденного пространственного рамановского рассеяния и неоднородностей среды. Для дальнейшего анализа системы (10) – (15) рассмотрим среды с линейными профилями неоднородности как дисперсии второго порядка, так и кубичной нелинейности:  $q'(\bar{\xi}) = q' = \text{const}$ ,  $\alpha'(\bar{\xi}) = \alpha' = \text{const}$ . При  $q' \neq 0$  система (10) – (15) после замены  $\tau = tq'$  сводится к виду

$$2n \frac{dk}{d\tau} = -pi + z + \sigma m - 2nk^2, \tag{17}$$

$$\frac{dz}{d\tau} = (m\delta + 2m\sigma - pi)k, \tag{18}$$

$$\frac{di}{d\tau} = \left(2 + 3\frac{\sigma}{\delta}\right)ki, \tag{19}$$

$$\frac{dm}{d\tau} = \left(2 + \frac{\sigma}{\delta}\right)km, \tag{20}$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = (\sigma - \delta)k, \tag{21}$$

$$\frac{dn}{d\tau} = nk, \tag{22}$$

где  $p = \mu I_0 / (q'N_0)$ ,  $\sigma = \alpha' M_0 / (q'N_0)$ ,  $\delta(\bar{\xi}) = \alpha(\bar{\xi})M_0 / (q(\bar{\xi})N_0)$ . Уравнения (18)–(21) при учете (22) имеют интегралы:

$$z = -\frac{p}{5}a^3(n^5 - 1) - \frac{3}{4}pa^2b(n^4 - 1) + (a^2\delta_0 - pab^2)(n^3 - 1) + \left(2ab\delta_0 - \frac{p}{2}b^3\right)(n^2 - 1) + \delta_0b^2(n - 1) + z_0,$$

$$\delta = \delta_0\left(a + \frac{b}{n}\right), \quad m = n^2(an + b), \quad i = n^2(an + b)^3, \tag{23}$$

где  $\delta_0 = \alpha_0 M_0 / (q_0 N_0)$ ,  $z_0 = Z_0 / N_0$ ,  $q_0 = q(0)$ ,  $\alpha_0 = \alpha(0)$ ,  $a = \sigma / \delta_0$ ,  $b = 1 - a$ . При учете (23) система шести уравнений (17)–(22) сводится к системе двух уравнений:

$$2n\left(\frac{dk}{d\tau} + k^2\right) = -pn^2(an + b)^3 + a\delta_0n^2(an + b) - \frac{p}{5}a^3(n^5 - 1) - \frac{3}{4}pa^2b(n^4 - 1) +$$

$$+ (a^2\delta_0 - pab^2)(n^3 - 1) + \left(2ab\delta_0 - \frac{p}{2}b^3\right)(n^2 - 1) + \delta_0b^2(n - 1) + z_0, \tag{24}$$

$$\frac{dn}{d\tau} = kn. \quad (25)$$

При  $k = 0$  состояние равновесия системы (24) – (25) достигается при условии

$$\begin{aligned} p(n^2 - 1)(an + b)^3 + p(an + b)^3 = a\delta_0(n^2 - 1)(an + b) + a\delta_0(an + b) - \frac{p}{5}a^3(n^5 - 1) - \\ - \frac{3}{4}pa^2b(n^4 - 1) + (a^2\delta_0 - pab^2)(n^3 - 1) + \left(2ab\delta_0 - \frac{p}{2}b^3\right)(n^2 - 1) + \delta_0b^2(n - 1) + z_0. \end{aligned} \quad (26)$$

Условие (26) имеет решение  $n = 1$  при  $p = p_* = z_0 + a\delta_0$ . В этом случае интегралы и волновое число волнового пакета во времени не меняются. Линеаризация системы в области состояния равновесия ( $k = 0, n = 1$ ) приводит к уравнению

$$2d^2k/d\tau^2 + k((a+1)(3z_0 - \delta_0) + 2a^2\delta_0) = 0,$$

которое при условии  $\delta_0/3 < z_0 < 3\delta_0$  описывает состояние равновесия типа центр при любом значении  $a$ . При условии  $\delta_0 - z_0 = p_c(3a^2b/4 + a^3/5 + ab^2 + b^3/2)$  система (24) – (25) имеет два состояния равновесия ( $k = \pm|1 - a|\sqrt{\delta_0/2}, n = 0$ ). Первый интеграл системы (24) – (25) имеет вид:

$$\begin{aligned} k^2n^2 + \frac{p}{5}a^3(n^6 - 1) + \frac{3}{4}pa^2b(n^5 - 1) + \left(pab^2 - \frac{a^2}{2}\delta_0\right)(n^4 - 1) + \left(\frac{p}{2}b^3 - ab\delta_0\right)(n^3 - 1) + \\ + \left(\delta_0 - \frac{3}{4}pa^2b - \frac{p}{5}a^3 - pab^2 - \frac{p}{2}b^3 - z_0\right)(n - 1) - \frac{\delta_0}{2}b^2(n^2 - 1) = k_0^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Уравнение (27) описывает траектории, проходящие через точку  $(k_0, n = 1)$ .

### Траектории солитонов

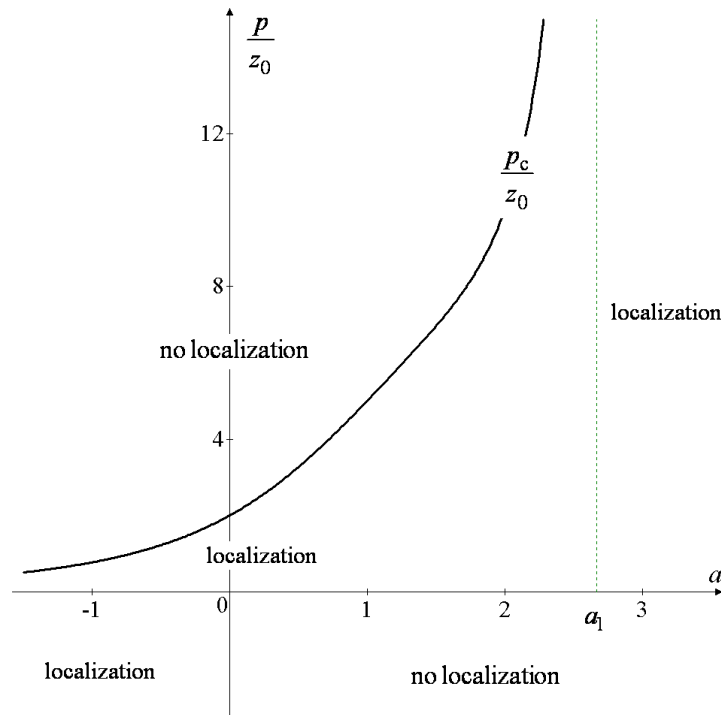
Более подробно рассмотрим траектории (27) для начального волнового пакета с нулевым волновым числом  $k_0 = 0$  и огибающей классического солитона:

$$U(\xi, t = 0) = \frac{A_0}{\cosh(\xi A_0 \sqrt{\alpha_0/q_0})}. \quad (28)$$

В этом случае  $2z_0 = \delta_0 = 2\alpha_0 A_0^2/(3q_0)$ ,  $p = 8\mu\alpha_0 A_0^4/(15q'q_0)$ ,  $\sigma = \alpha' A_0^2/(3q')$ ,  $p_* = z_0(1 + 2a)$ , а уравнение (27) преобразуется к виду:

$$k^2 = z_0(b + an)^2 - pn\left(\frac{1}{5}a^3n^3 + \frac{3}{4}ba^2n^2 + b^2an + \frac{1}{2}b^3\right) + \frac{w}{n}, \quad (29)$$

где  $w = p(a^3/5 + 3a^2b/4 + b^2a + b^3/2) - z_0$ . Уравнение (29) описывает траектории, проходящие через точку ( $k = 0, n = 1$ ). При  $n \rightarrow 0$  волновое число ограничено при условии  $w \leq 0$ . В частности, при условии  $w = 0$ , соответствующем  $p_c(a^3/5 + 3a^2b/4 + b^2a + b^3/2) - z_0 = 0$ , уравнение (29) описывает сепаратрисы, идущие от начальной точки в состояние равновесия ( $k = -|1 - a|\sqrt{z_0}, n = 0$ ). При  $n \gg 1$ , траектории (29) ограничены при условии  $pa > 0$ . На рис. 1 показано разделение плоскости параметров  $(a, p/z_0)$  на области, соответствующие ограниченному и неограниченному траекториям солитона. Величина  $a_1$  получена как решение уравнения  $a^3/5 + 3a^2b/4 + b^2a + b^3/2 = 0$ .



**Рис. 1. Разделение плоскости параметров  $(a, p/z_0)$  на области, соответствующие локализованным и нелокализованным траекториям солитона**

На рис. 2 приведены траектории солитона (29) на плоскости  $(k, n)$  при различных значениях  $a$  и  $p$ . При  $a = 1$  (соответствует пропорциональному изменению дисперсии второго порядка и нелинейности среды) уравнение (29) преобразуется к виду  $5nk^2 + pn^5 - 5z_0n^3 + (5z_0 - p) = 0$ . Траектории солитона в этом случае локализованы при выполнении условия  $0 < p \leq 5z_0$  (рис. 2, d). Это соответствует динамическому равновесию вынужденного рамановского рассеяния и пропорционально увеличивающимся дисперсии второго порядка и нелинейности среды. При  $p > 5z_0$  вынужденное рамановское рассеяние доминирует, и волновое число солитона уменьшается; при  $p < 0$  доминируют пропорционально увеличивающиеся дисперсия второго порядка и нелинейность среды, а волновое число солитона возрастает.

При  $a = 0$  (изменяется только дисперсия второго порядка) уравнение (29) сводится к виду  $pn^2 + 2n(k^2 - z_0) - (p - 2z_0) = 0$ . В этом случае траектории солитона локализованы при выполнении условия  $0 < p \leq 2z_0$  (рис. 2, b).

При  $q' = 0$  (изменяется только нелинейность среды) система уравнений (10) – (15) преобразуется к системе:

$$2 \frac{dk}{dt} = -\mu \frac{I_0}{N_0} m^3 + \alpha' \frac{M_0}{N_0} m, \tag{30}$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha' \frac{q}{\alpha_0} k. \tag{31}$$

Первый интеграл системы (30)–(31):

$$4k^2 = 4k_0^2 - r(m^4 - 1) + 2\delta_0(m^2 - 1), \tag{32}$$

где  $r = \mu I_0 \alpha_0 / (\alpha' N_0 q_0)$ .

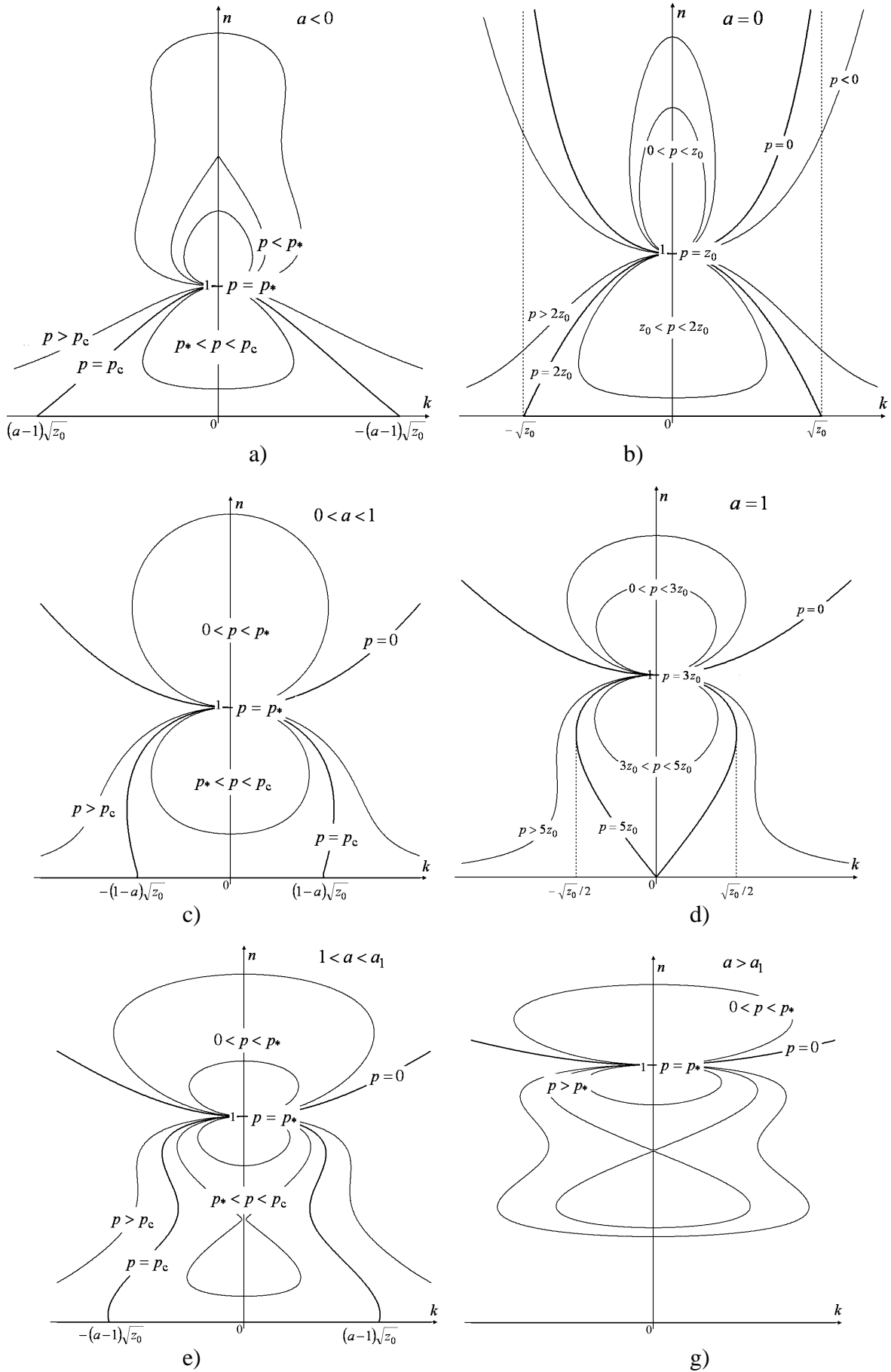


Рис. 2. Траектории солитона (29) при начальных условиях  $k_0 = 0$ ,  $n_0 = 1$  и при различных  $a$  и  $p$

На рис. 3 показаны траектории, описываемые (32), для начальных условий  $k_0 = 0$ ,  $m_0 = 1$  и при различных значениях  $r$ .

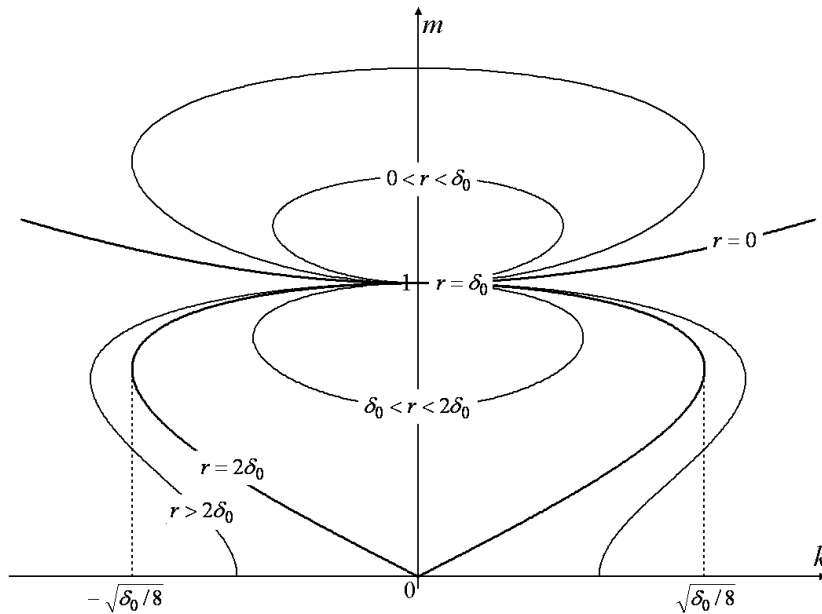


Рис. 3 Траектории (32) при условиях  $k(0) = 0$ ,  $m(0) = 1$  и при различных  $r$

При  $r = \delta_0$  траектория совпадает с исходной точкой  $k = 0, m = 1$ . Это соответствует равновесию пространственного вынужденного рамановского рассеяния и возрастающей нелинейности среды. В этом случае интегралы и волновое число волнового пакета постоянны во времени. При  $0 < r \leq 2\delta_0$  траектории ограничены. Это соответствует динамическому равновесию пространственного вынужденного рамановского рассеяния и возрастающей нелинейности среды. При  $p \leq 0$  возрастающая нелинейность среды доминирует, и волновое число увеличивается. При  $r > 2z_0$  доминирует пространственное вынужденное рамановское рассеяние, и волновое число уменьшается, а солитон достигает состояния разрушения, чему соответствует достигнутая величина  $m = \alpha / \alpha_0 = 0$ .

### Солитонное решение

Рассмотрим решение уравнения (1) в виде стационарной волны  $U(\xi, t) = \psi(\xi) \exp(i\Omega t)$  при линейных профилях дисперсии второго порядка  $q(\xi) = q_0 + q' \cdot \xi$  и нелинейности среды  $\alpha(\xi) = \alpha_0 + \alpha' \cdot \xi$ :

$$-2\Omega\psi + (q_0 + q' \cdot \xi) \frac{d^2\psi}{d\xi^2} + 2(\alpha_0 + \alpha' \cdot \xi)\psi^3 + \mu\psi \frac{d(\psi^2)}{d\xi} = 0. \tag{33}$$

Примем, что пространственный масштаб неоднородностей как дисперсии второго порядка, так и нелинейности среды много больше характерного масштаба огибающей волнового пакета  $L_{q,\alpha} \gg L_\psi$ . Принимая во внимание  $\epsilon \sim \xi q' \sim \xi \alpha' \sim L_\psi / L_{\alpha,q} \sim \mu \ll \alpha_0, q_0$ , решение (33) будем искать в виде  $\psi = \psi_0 + \psi_1$ , где  $\psi_1 \sim \epsilon \psi_0 \ll \psi_0$  - малая величина. Удерживая члены порядка  $\epsilon$ , получаем:

$$q_0 \frac{d^2\psi_0}{d\xi^2} + 2\alpha_0\psi_0^3 - 2\Omega\psi_0 = 0, \tag{34}$$

$$q_0 \frac{d^2 \psi_1}{d\xi^2} + (6\alpha_0 \psi_0^2 - 2\Omega) \psi_1 = -2\alpha' \psi_0^3 \xi - q' \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} \xi - \frac{2}{3} \mu \frac{d(\psi_0^3)}{d\xi}. \quad (35)$$

Уравнение (34) имеет решение в виде классического солитона  $\psi_0 = A_0 / \cosh(\xi/\Delta)$ , где  $\Delta = \sqrt{q_0/\alpha_0}/A_0$ ,  $\Omega = \alpha_0 A_0^2/2$ . Принимая во внимание решения (34) и используя подстановки  $\eta = \xi/\Delta$  и  $\Psi = \psi_1 q_0 / (A_0 q'_\eta)$ , уравнение (35) принимает вид:

$$\frac{d^2 \Psi}{d\eta^2} + \left( \frac{6}{\cosh^2 \eta} - 1 \right) \Psi = -2(a-1) \frac{\eta}{\cosh^3 \eta} - \frac{\eta}{\cosh \eta} + \frac{5}{4} \frac{\mu}{\mu_*} (1+2a) \frac{\sinh \eta}{\cosh^4 \eta}, \quad (36)$$

где  $\mu_* = 5(1+2a)q'_\eta \sqrt{\alpha_0/q_0} / (8A_0)$  - равновесное значение параметра пространственного вынужденного рассеяния Рамана. При условии  $\Psi(0) = 0$  уравнение (36) имеет точное решение:

$$\Psi(\eta) = \frac{1}{4 \cosh \eta} \left( 4\Psi'(0)\eta + \eta^2 \tanh \eta - 2a(\eta - \tanh \eta) + (1+2a) \frac{\mu}{\mu_*} \tanh \eta \ln(\cosh \eta) + \right) + \frac{(1+2a)}{12} \left( \frac{\mu}{\mu_*} - 1 \right) \tanh^2 \eta \sinh \eta. \quad (37)$$

При  $\mu = \mu_*$  решение (37) на бесконечности стремится к нулю  $\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty) \rightarrow 0$ . Это солитонное решение существует в результате равновесия пространственного вынужденного рассеяния Рамана и неоднородных как дисперсии второго порядка, так и нелинейности среды. На рис. 4 показаны распределения огибающей волнового пакета  $\Psi(\eta)$  при  $a = 1$ ,  $\mu = \mu_*$  различных начальных значениях  $\Psi'(0)$ .

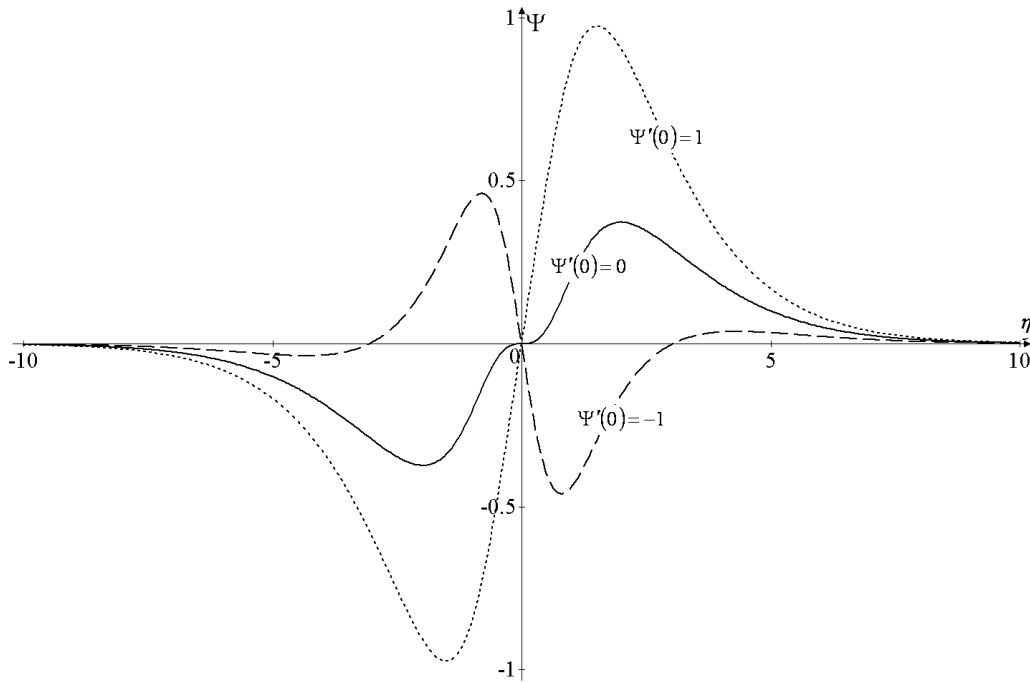


Рис. 4. Распределения  $\Psi(\eta)$  при  $a = 1$ ,  $\mu = \mu_*$  различных  $\Psi'(0)$

При  $\mu \neq \mu_*$  решение (37) неограниченно возрастает на бесконечности  $|\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty)| \rightarrow \infty$ . На рис. 5 показаны распределения  $\Psi(\eta)$  при  $a = 1$ , начальных значениях  $\Psi(0) = \Psi'(0) = 0$  и при различных  $\mu$ .

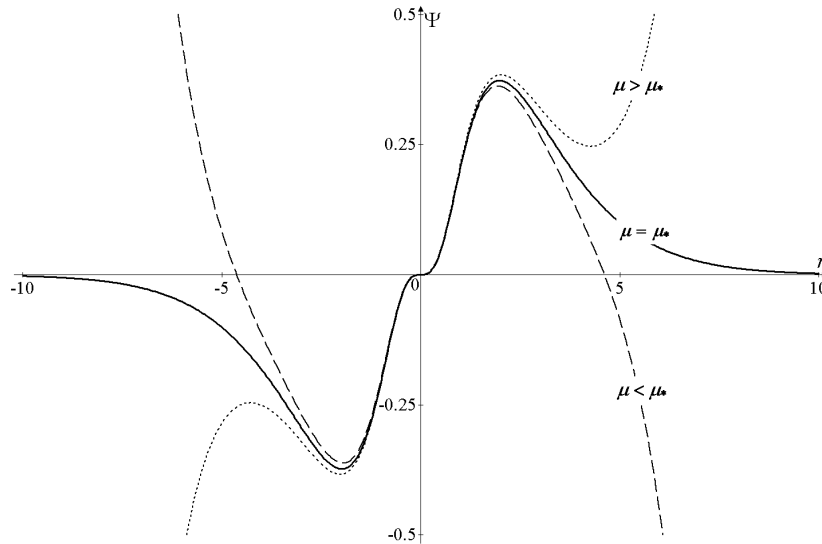


Рис. 5. Распределения  $\Psi(\eta)$  при  $a = 1$ ,  $\Psi(0) = \Psi'(0) = 0$  и различных  $\mu$

### Результаты численного эксперимента

Рассмотрим численно начальную задачу динамики волнового пакета  $U(\xi, t = 0) = 1/\cosh \xi$  в рамках уравнения (1) при  $\alpha(\xi) = 1 + \xi/L_\alpha$ ,  $q(\xi) = 1 + \xi/L_q$  с различными  $\mu$ ,  $L_q$ ,  $L_\alpha$ . Равновесие между пространственным вынужденным рассеянием Рамана и неоднородностями среды достигается при  $\mu_* = 5(L_q^{-1} + 2L_\alpha^{-1})/8$ .

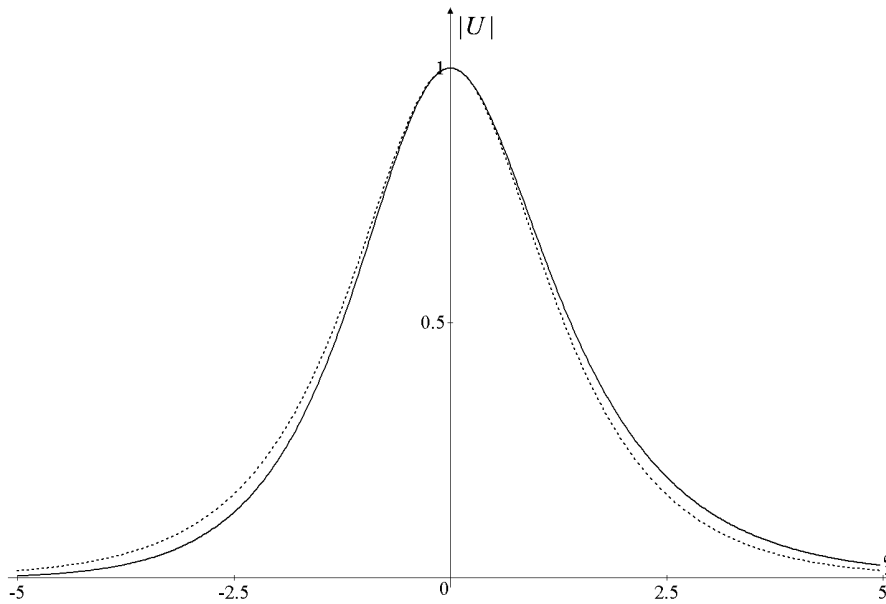
При  $L_q = L_\alpha = 20$  мы имеем  $\mu_* = 3/32$ . В численном эксперименте импульс при  $\mu = 3/32$  на больших временах  $t > 10$  стремится к стационарному ограниченному распределению (непрерывная кривая на рис. 6) с нулевым волновым числом. Это распределение совпадает с аналитическим солитонным решением системы (34) – (35) при  $\alpha_0 = q_0 = A_0 = 1$ ,  $L_q = L_\alpha = 20$  и  $\mu = \mu_*$ :

$$|U| = \frac{1}{\cosh \xi} \left( 1 + \frac{1}{80} \left( 3 \tanh \xi \ln(\cosh \xi) + 2(\tanh \xi - \xi) + \xi^2 \tanh \xi \right) \right).$$

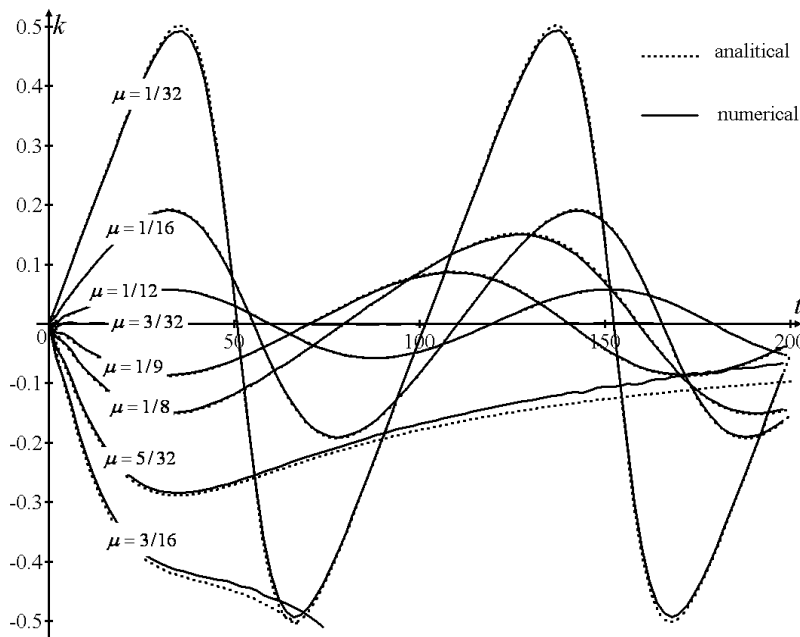
Для сравнения на рис. 6 показан профиль классического солитонного решения  $|U| = 1/\cosh \xi$  (пунктирная кривая).

Изменение параметра  $\mu$  приводит к изменению параметров солитона (волнового числа, амплитуды). На рис. 7 показаны численные (непрерывные кривые) и аналитические (пунктирные кривые) результаты исследования динамики волнового числа  $k$  в точке расположения максимума модуля огибающей волнового пакета  $|U| = \max$  в виде функции времени  $t$  при  $L_{\alpha,q} = 20$  и при различных  $\mu$ . При  $\mu < 5/32$  имеет место динамическое равновесие пространственного вынужденного рамановского рассеяния и возрастающих дисперсии второго порядка и нелинейности среды. В этом режиме аналитические и численные результаты находятся в хорошем соответствии. При  $\mu = 5/32$  имеет место сепаратрисный режим: волновое число на больших временах стремится к нулю. При  $\mu > 5/32$  волновое число неограниченно убывает (результат доминирования вынужденного рассеяния). Такое поведение соответствует полученным ранее аналитическим результатам (рис. 2, d).





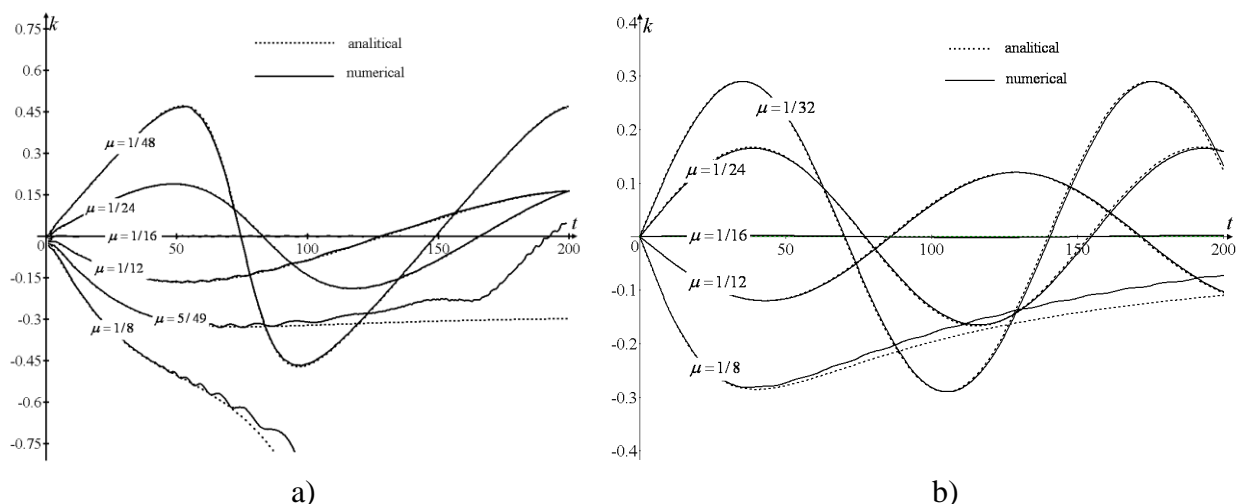
**Рис. 6.** Распределение модуля огибающей солитона  $|U|$  по  $\xi$  в момент времени  $10 < t \leq 200$  при  $\mu = 1/32$ ,  $L_{\alpha,q} = 20$ . Непрерывная кривая - численный результат, пунктирная кривая – классический солитон



**Рис. 7.** Численные (непрерывные кривые) и аналитические (пунктирные кривые) результаты описания волнового числа  $k$  в центре волнового пакета в зависимости от  $t$  при  $L_{\alpha,q} = 20$  и различных значениях

При любых прочих соотношениях градиентов линейной дисперсии второго порядка и нелинейности среды, численные и аналитические результаты в режиме динамического равновесия вынужденного рассеяния и неоднородностей среды так же хорошо согласуются. Так, на рис. 8 показаны численные (непрерывные кривые) и аналитические (пунктирные кривые) результаты исследования динамики локального волнового числа  $k$  как функция времени  $t$  в

центре волнового пакета  $|U| = \max$  при  $L_\alpha = 40$  и  $L_q = 20$  (рис. 8, а), при  $L_\alpha = 20$  и  $L_q = \infty$  (рис.8, б), для различных значений  $\mu$ .



**Рис. 8. Численная (непрерывные кривые) и аналитическая (пунктирные кривые) динамика волнового числа  $k$  в центре волнового пакета в зависимости от времени  $t$  при  $L_\alpha = 40$  и  $L_q = 20$  (а), при  $L_\alpha = 20$  и  $L_q = \infty$  (б) для различных  $\mu$**

### Заключение

В данной работе рассмотрена динамика солитона огибающей в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера, учитывающего вынужденное пространственное рассеяние Рамана, неоднородности как линейной дисперсии второго порядка, так и нелинейности среды. Проведено сравнение аналитических результатов с результатами численного эксперимента. Показана возможность компенсации сдвига вниз по спектру собственного волнового числа солитона (эффект вынужденного рассеяния) смещением волнового числа солитона вверх по спектру (эффект возрастающих дисперсии второго порядка и нелинейности среды). Аналитически в явном виде найдено стационарное солитонное решение расширенного нелинейного уравнения Шредингера. Этот солитон существует как результат равновесия вынужденного рассеяния, с одной стороны, и неоднородностей дисперсии и нелинейности среды, с другой стороны. Найден режим динамического равновесия вынужденного рассеяния и неоднородностей среды, при котором параметры солитона периодически изменяются во времени. Аналитические и численные результаты для этого режима хорошо согласуются.

В данной работе динамика солитонов рассматривалась в пренебрежении линейной групповой скоростью, нелинейной дисперсией и линейной дисперсией третьего порядка. Компенсация эффектов вынужденного рассеяния и неоднородностей среды с учетом этих членов в расширенном нелинейном уравнении Шредингера будет рассмотрена в следующих работах.

В данной научной работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 11-01-0066, реализованного в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2012-2013 гг.

### Библиографический список

1. **Agraval, G.P.** Nonlinear Fiber Optic / G.P. Agraval. – San Diego: Academic Press, 2001.
2. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang. – New York: Springer, 2001.

3. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S. Kivshar, G.P. Agrawal. – San Diego: Academic, 2003.
4. **Dickey, L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems / L.A. Dickey. – New York: World Scientific, 2005.
5. **Zakharov, V.E.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / V.E. Zakharov, A.B. Shabat // Sov. Phys. 1972. JETP. 34. P. 62–69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. 1973. Lett. 23. P. 142–144.
7. **Kodama, Y. J.** Optical solitons in a monomode fiber // Stat. 1985. Phys. 39. P. 597–614.
8. **Kodama, Y.** Nonlinear pulse propagation in a monomode dielectric guide / Y. Kodama, A. Hasegawa // IEEE J. Quantum Electron 23. 1987. P. 510–524.
9. **Zaspel, C.E.** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. 1999. Lett. 82. P. 723–726.
10. **Hong, B.** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation / B. Hong, D. Lu // Inter. Journal of Nonlinear. 2009. Science 7. P. 360–367.
11. **Nagaraja, Kumar C.** New phase modulated solutions for a higher-order nonlinear Schrödinger equation / C. Nagaraja Kumar, P. Durganandini // Pramana - J. Phys. 53. 1999. P. 271–277.
12. **Kuznetsov, E.A.** Bifurcations of solitons and their stability / E.A. Kuznetsov, F. Dias // Physics Reports 507. 2011. P. 43–105.
13. **Karpman, V.I.** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B 39. 2004. P. 341–350.
14. **Oliviera, J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliveira, M.A. Moura // Phys. Rev. E 57. 1998. P. 4751–4755.
15. **Mitschke, F.M.** Discovery of the soliton self-frequency shift / F.M. Mitschke, L.F. Mollenauer // Opt. Lett. 11. 1986. P. 659–661.
16. **Gordon, J.P.** Theory of the Soliton Self-frequency Shift // Opt. Lett. 11. 1986. P. 662–664.
17. **Gromov, E.M.** Nonlinear Dynamics of Short Wave Trains in Dispersive Media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 110 (1996) 137; Sov. Phys. 1996. JETP. 83. P. 73–79.
18. **Gromov, E.M.** Short envelope-solitons (combined nonlinear equation) / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Radiophysics and Quantum Electronics, 39.1996. P. 735–756.
19. **Gromov, E.M.** Short Optical Solitons in Fibers/ E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 10. 2000. P. 551–558.
20. **Obregon M.A., Stepanyants Yu.A.** Oblique magneto-acoustic solitons in a rotating plasma M.A.Obregon, Yu.A. Stepanyants // Physics Letters A 249.1998. P. 315–323.
21. **Scalora, M.** Generalized nonlinear Schrödinger equation for dispersive susceptibility and permeability: application to negative index materials / M Scalora [et al.] // Phys. Rev. 2005. Lett. 95 013902.
22. **Wen, S.C.** Modulation instability in nonlinear negative-index material / S.C. Wen [et al.] // Phys. Rev. 2006. E 73. 036617.
23. **Marklund, M.** Ultrashort solitons and kinetic effects in nonlinear metamaterials / M. Marklund, P.K. Shukla, L. Stenflo // Phys. Rev. 2006. E 73 037601.
24. **Tsitsas, N.L.** Higher-order effects and ultrashort solitons in left-handed metamaterials / N.L. Tsitsas [et al.] // Phys. Rev. 2009. E 79 037601.
25. **Kivshar, Y.S.** Dark-soliton Dynamics and shock waves induced by the stimulated Raman effect in optical fibers // Phys. Rev. A 42 .1990. P. 1757–1761.
26. **Kivshar, Y.S.** Raman-induced optical shocks in nonlinear fibers / Y.S. Kivshar, B.A. Malomed // Optics. 1993. Letters 18. P. 485–487.
27. **Biancalama F., Skrybin D.V., Yulin A.V.** Theory of the soliton self-frequency shift compensation by the resonant radiation in photonic crystal fibers / F. Biancalama, D.V. Skrybin, A.V. Yulin // Phys. Rev. 2004. E 70 011615.
28. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultra short solitons in high-speed communication systems. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers / R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal // Journal of the Optical Society of America. 1997. B 14. P. 314–322.
29. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultra short solitons in high-speed communication systems. II. Control of jitter by periodic optical phase conjugation / R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal // Journal of the Optical Society of America. 1997. B 14. P. 323–330.

30. **Andrianov, A.** DDF-based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication Range / A. Andrianov, S. Muraviev, A. Kim, A. Sysoliatin // *Laser Physics* 17. 2007. P. 1296–1302.
31. **Chernikov, S.** Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber / S. Chernikov, E. Dianov, D. Richardson, D. Payne // *Optics. 1993. Letters* 18. P. 476–478.
32. **Aseeva, N.V.** Soliton self-wave number down shift compensation by the increasing second-order dispersion / N.V. Aseeva, E.M. Gromov, V.V. Tyutin // *Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis* / Ed. by B. Goldengorin, V. Kalyagin, P. Pardalos. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 32 of Springer Series in Mathematics & Statistics. P. 1–10.

*Дата поступления  
в редакцию* 22.01.2013

N.V. Aseeva<sup>1</sup>, E.M. Gromov<sup>2</sup>, O.V. Podchishaeva<sup>2</sup>, V.V. Tyutin<sup>1</sup>

### SOLITON DYNAMICS IN THE FRAME OF EXTENDED INHOMOGENEOUS NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH TAKING INTO ACCOUNT NONLOCAL NONLINEARITY

National Investigate University Higher School of Economics<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state university n.a. N.I. Lobachevsky<sup>2</sup>

**Purpose:** Dynamics of solitons in the frame of the extended nonlinear Schrödinger equation taking into account stimulated Raman scattering in space presentation (space stimulated Raman scattering), smoothly inhomogeneous both second-order dispersion and self-phase modulation is considered.

**Approach:** Soliton's dynamic investigated as analytically as numerically.

**Findings:** It is shown that wave number down shift (by space stimulated Raman scattering) is compensated with up shift (by increasing second-order dispersion or self-phase modulation). Analytical soliton solutions as a result of equilibrium of space stimulated Raman scattering and increasing both second-order dispersion and self-phase modulation is found. Regime of the dynamical equilibrium of space stimulated Raman scattering and inhomogeneous media with periodical variation of soliton's parameters is found. Analytical and numerical results for this regime are in a good agreement.

**Originality:** The obtained results is original and can be important for optical fibers application.

*Key words:* Extended Nonlinear Schrödinger Equation, Soliton, Nonlocal Nonlinearity, Space Stimulated Raman-Scattering, Inhomogeneous, Second-Order Linear Dispersion, Self-Phase Modulation, Analytical Investigation, Numerical Simulation.

# ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 534.87

В. Е. Гай

## МЕТОД ОБРАБОТКИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

Приводится описание метода идентификации диктора. Рассматривается вся последовательность этапов решения задачи идентификации, начиная с построения сигнатуры диктора. Разработанный алгоритм основан на использовании теории активного восприятия, адаптированной к анализу речевых сигналов. Результаты проведённых экспериментов подтверждают возможность использования предложенного алгоритма для решения поставленной задачи.

*Ключевые слова:* цифровая обработка сигналов, анализ речевых сигналов, идентификация диктора.

### Введение

Биометрическая информация может использоваться при решении задач обеспечения безопасности и повышения качества обслуживания. Применения включают управление правами пользования материальными и информационными ресурсами. В полуавтоматическом режиме биометрические системы позволяют решать технические проблемы, связанные с поиском идентификационной информации и формированием гипотез для обоснованного принятия решения человеком.

С точки зрения практического применения биометрических технологий актуальны вопросы взаимодействия человека с системой: время считывания идентификационных признаков, время идентификации, физические и психологические препятствия для считывания признаков, удобство и естественность протоколов взаимодействия с системой (табл. 1) [1].

Таблица 1

Сравнительная характеристика биометрических систем в %

	Отпечаток пальца	Голос	Радужная оболочка	Лицо
Equal Error Rate (EER)	2-3.3	0.1-0.86	4.1-4.6	4.1
Ошибка регистрации	4	2	7	~0
Номинальное значение вероятности «допуска чужого»	2.5	0.75	6	4
Номинальное значение вероятности «отвержения своего»	0.1	0.75	0.001	10
Стоимость системы	Высокая	Низкая	Очень высокая	Высокая

Биометрические параметры для проведения идентификации можно разделить на два класса: *статические* и *динамические*. К статическим параметрам относятся изображения отпечатков пальцев, радужной оболочки и сетчатки глаза, форма лица, форма ладони, расположение вен на кисти руки и т. д. Эти параметры практически не меняются со временем. Ди-

намические параметры – параметры, изменяющиеся во времени: голос, почерк, клавиатурный почерк, личная подпись и т. п.

Идентификация диктора – процесс определения личности по образцу голоса путём сравнения данного образца с шаблонами, сохранёнными в базе [2].

Существуют различные варианты задач идентификации (верификации), например, текстозависимая и текстонезависимая идентификация, идентификация на открытом множестве пользователей и на закрытом.

В общем случае алгоритм верификации/идентификации диктора состоит из следующих шагов:

1) этап идентификации – построение базы эталонов, выполняется определение структуры сигнала (под идентификацией системы понимается определение структуры и параметров системы по наблюдениям [3, 4]).

На данном этапе, в соответствии со сложившимся подходом к процедуре обработки речевого сигнала, используется кратковременный анализ речевого сигнала [2]. Сигнал разбивается на временные окна фиксированного размера, для более точного представления сигнала между окнами делают перекрытие, равное половине длины окна.

Далее, по каждому окну вычисляются акустические признаки. Для описания признаков обычно используются различные модели [2];

2) этап распознавания – входящий сигнал сравнивается с базой эталонов (задача опознавания сводится к сравнению признаков предъявляемых объектов с заранее известными [3]), выполняется поиск соответствия вычисленного описания – описаниям, хранящимся в базе данных (1-к-1 для решения задачи верификации, 1-ко-многим для решения задачи идентификации): в результате вычисляется расстояние от анализируемого сигнала до каждого диктора, хранящегося в базе данных (для идентификации) или расстояние от анализируемого сигнала до некоторой обобщённой модели диктора (для верификации);

3) этап принятия решения: на данном этапе принимается решение о том, является ли анализируемый диктор тем, за кого он себя выдаёт или нет.

Обычно оценка качества работы алгоритма идентификации диктора выполняется на основе следующих характеристик: FAR (False Acceptance Rate, частота ложных приёмов), FRR (False Rejection Rate, частота ложных отказов), EER (Equal Error Rate, частота ошибок) [5]. Показатели FAR и FRR связаны между собой. При уменьшении одного показателя, второй – увеличивается. Значение EER указывает, что при определённых настройках метода идентификации частота ложных приёмов равна числу ложных отказов. Чем ниже значение EER показателя, тем выше точность системы идентификации.

Рассмотрим алгоритмы, предлагаемые для решения этапов идентификации и распознавания.

### 1. Этап идентификации (формирование модели диктора)

Формирование описания анализируемого сигнала  $A$  выполняется на основе следующего алгоритма:

1) нормировка амплитуды сигнала на отрезке  $[0; 1]$ ;

2) формирование  $U$ -разложения  $D_A$  сигнала  $A$  [6]. Параметры разложения: длина анализируемого сегмента  $L$ , количество используемых фильтров  $F$ ;

3) для каждого спектра разложения  $D_A$  определяются три группы, которые описывают данный спектр: полная группа на операции сложения, полная группа на операции умножения и замкнутая группа [6]. В случае если для спектра нельзя определить полную или замкнутую группу, то данный спектр в дальнейшем не используется в алгоритме;

4) с каждой полной и замкнутой группой связывается число, в дальнейшем, при сравнении групп, надо будет сравнивать не операторы, входящие в состав группы (три или четыре числа), а только одно число; для этого формируется список полных и замкнутых групп с учётом инверсий элементов;

5) отбрасываются спектры с малой массой (данные спектры соответствуют участкам пауз в сигнале);

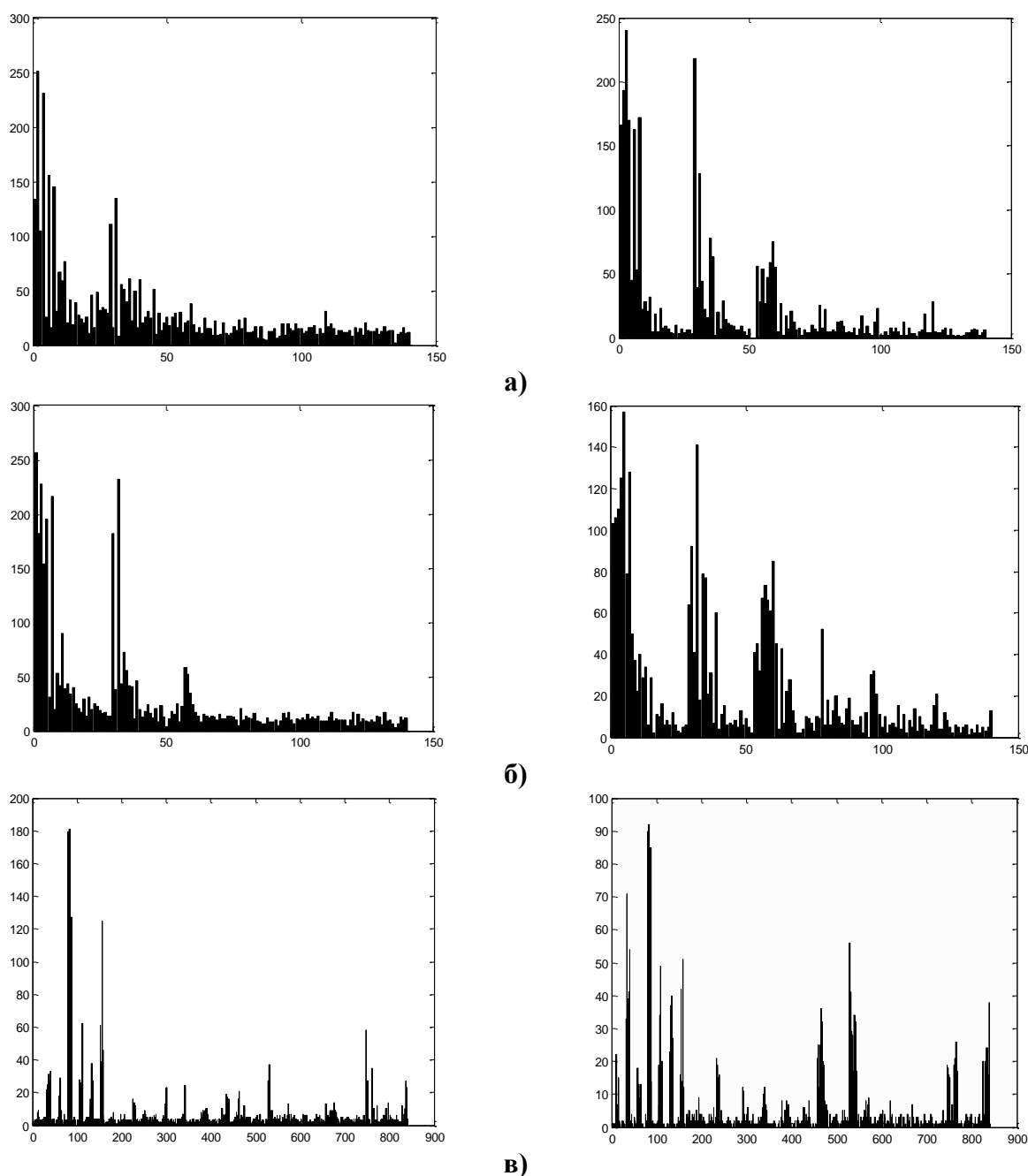
6) отбрасываются спектры, для которых по какой-то причине нельзя было вычислить полную на сложении, полную на умножении или замкнутую группу.

Шаги 4 – 6 позволяют ускорить сравнение сигналов на этапе распознавания.

В результате, для сигнала  $A$  формируется модель  $M_A$ . Единственный параметр данного алгоритма – длина сегмента сигнала, по которому вычисляется  $U$ -спектр.

## 2. Этап распознавания (сравнение моделей дикторов)

На рис. 1 показаны гистограммы частот появления полных и замкнутых групп для двух разных дикторов, длина записи 32 с (512000 отсчётов, частота дискретизации 16 кГц).



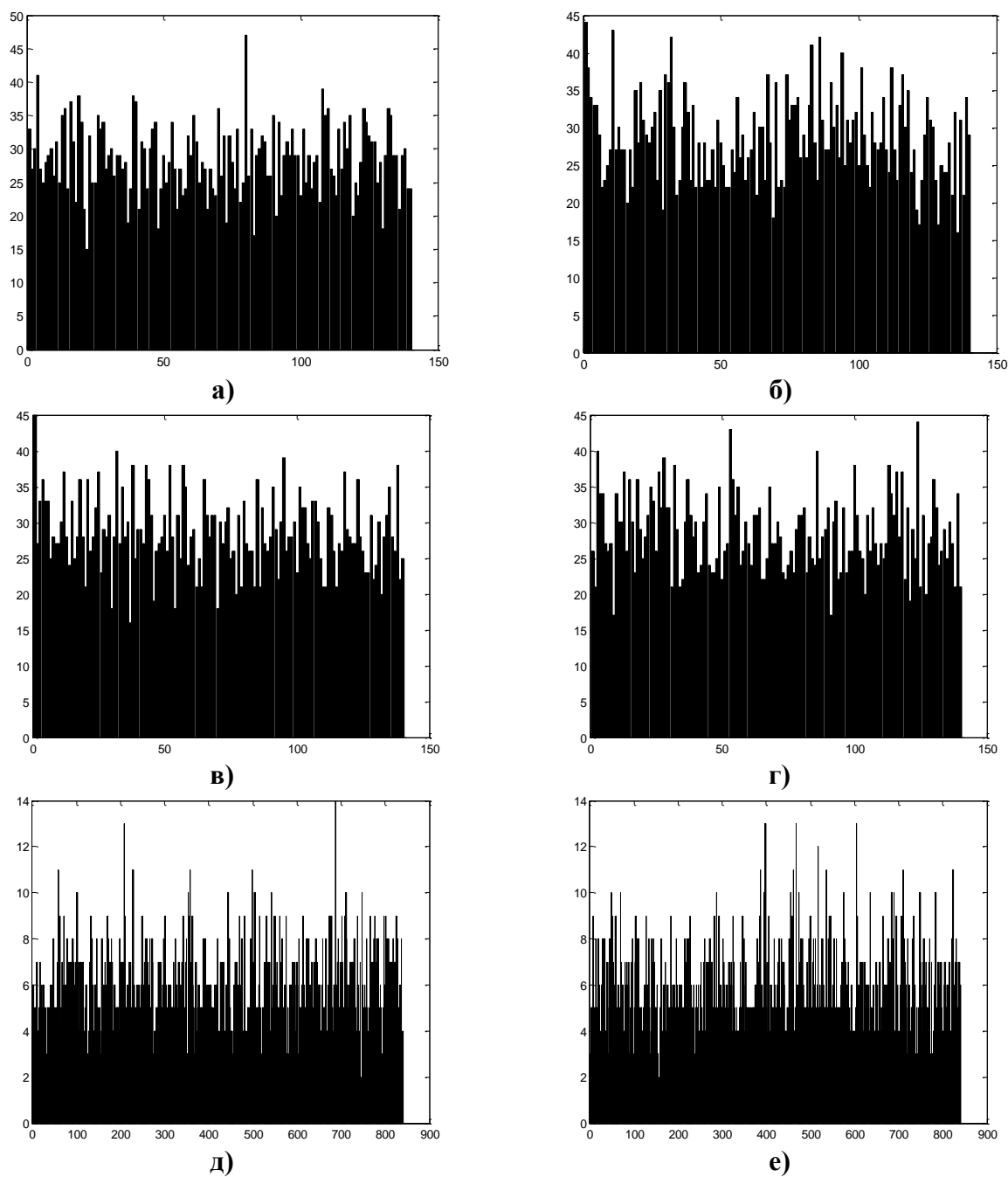
**Рис. 1. Гистограммы частоты появления:**

$a$  – полных групп на операции умножения;  $b$  – полных групп на операции сложения;  
 $в$  – замкнутых групп

Проанализировав гистограммы частот появления групп, можно отметить:

- 1) что в звуковых сигналах, содержащих записи речи дикторов, часто появляются одни и те же группы (полные и замкнутые);
- 2) частота появления разных групп – разная;
- 3) гистограммы частот появления групп для разных дикторов отличаются, указанный факт можно использовать для решения задачи идентификации дикторов.

На рис. 2 показаны гистограммы частоты появления групп, вычисленные по сигналу, представляющему собой нормальный и равномерный шум.



**Рис. 2. Гистограммы частоты появления:**  
*а, б* – полных групп на операции умножения;  
*в, г* – полных групп на операции сложения; *д, е* – замкнутых групп;  
*а, в, д* – равномерный шум; *б, г, е* – нормальный шум



Рассмотрим алгоритм, который выполняет сравнение моделей двух сигналов:

1) формируются гистограммы частот появления полных и замкнутых групп, входящих в модель диктора (для каждой модели сигнала формируются три гистограммы):  $AH_{psi}$ ,  $AH_{pnia}$ ,  $AH_{pnim}$ ,  $BH_{psi}$ ,  $BH_{pnia}$ ,  $BH_{pnim}$ ;

2) вычисляется расстояние между моделями:

$$DST[M_A, M_B] = \sum_{i=1}^{140} (AH_{pnia} - BH_{pnia}) + \sum_{i=1}^{140} (AH_{pnim} - BH_{pnim}) + \sum_{i=1}^{840} (AH_{psi} - BH_{psi}).$$

Меньшее значение расстояния  $DST$  соответствует большему подобию сигналов.

Похожий алгоритм используется в теории цифровой обработки изображений для сравнения двух изображений по гистограммам.

### 3. Исследование предложенного алгоритма

#### Описание эксперимента

Исследования предложенного алгоритма проводились на основе базы данных, содержащей записи голосов 20 дикторов. Рассмотрим этапы, из которых состоит эксперимент:

- 1) в  $i$ -й записи ( $i \in [1; N]$ ,  $N = 20$ ) выделяются два непересекающихся участка ( $A_i$  и  $B_i$ );
- 2) для  $A_i$  и  $B_i$  ( $i \in [1; N]$ ,  $N = 20$ ) формируются модели диктора:  $M_{A_i}$  и  $M_{B_i}$ ;
- 3) выполняется сравнение моделей дикторов на основе алгоритма, описанного в пункте 2 (формируется матрица):  $D[i, j] = DST[M_{A_i}, M_{B_j}]$ ,  $i \in [1; N]$ ,  $j \in [1; N]$ ;
- 4)  $\forall i \in [1; N]$  проверяется условие: если  $D[i, i] = \min_{j \in [1; N]} (D[i, j])$ , тогда считается, что идентификация диктора выполнена.

#### Результаты экспериментов

В табл. 2 приведены результаты исследования алгоритма идентификации в случае, если сравниваемые сигналы искажены равномерным шумом. Использование других параметров алгоритма при построении моделей дикторов показало невозможность устойчивой идентификации. Также результаты исследования алгоритма продемонстрировали, что при сравнении двух записей голоса одного диктора, одна из которых искажена, а другая – нет, выполнить идентификацию невозможно.

Таблица 1

Исследование алгоритма к искажениям сравниваемых сигналов

ОСШ (в Дб)	Длина сигнала	Длина сегмента	Ошибка идентификации (EER)
9	512000	512	1
15	512000	512	0
18	512000	512	0

В табл. 3 приведены временные характеристики производительности описанного алгоритма.

Таблица 2

Производительность алгоритма

Длина сегментов, на которые разбивается сигнал	Время формирования описания диктора (в секундах)	Время сравнения описаний двух дикторов (в секундах)
512	246	0.01
256	283	0.01
128	351	0.02
64	473	0.06
32	729	0.14

Анализируя табл. 3, можно отметить, что время сравнения описаний дикторов и время формирования описаний зависит от длины сегмента сигнала, по которому формируется спектр, и увеличивается с увеличением длины сегмента.

Таблица 3

## Результаты идентификации дикторов

Длина сигнала	Длина сегмента	Ошибка идентификации (EER)
256000	32	15%
256000	50	10%
512000	50	5%
512000	128	0%
512000	256	0%
512000	512	0%
512000	384	0%

Результаты, приведённые в табл. 4, указывают на то, что с увеличением длины сегментов, на которые разбивается сигнал, увеличивается точность идентификации дикторов.

В [7] приводятся результаты идентификации дикторов на основе различных методов (табл. 5).

Таблица 4

## Результаты идентификации на основе различных методов

Способ описания диктора	Метод сравнения	Тип идентификации	Количество дикторов	Ошибка идентификации
Кепстр	Сопоставление с образцом	Текстозависимая	10	2%@0.5с
Линейное предсказание	Долговременная статистика	Текстонезависимая	17	2%@39с
LAR (log area ratio)	Непараметрическая плотность распределения вероятностей	Текстонезависимая	21	2.5%@2с
Линейное предсказание, Кепстр	Сопоставление с образцом	Текстонезависимая	11	21%@3с

После символа «@» в столбце «Ошибка идентификации» указывается время идентификации.

Сравнивая результаты идентификации дикторов, приведённые в табл. 5, с результатами идентификации, полученными на основе предложенного алгоритма, можно отметить, что предложенный алгоритм, по качеству идентификации, не уступает другим алгоритмам идентификации дикторов.

#### 4. Анализ полных и замкнутых групп

Анализируя результаты идентификации дикторов, можно отметить, что не для каждого сегмента сигнала можно вычислить полную и замкнутую группу.

На рис. 3 схематично показаны типы сигналов, по которым нельзя вычислить одновременно полную группу (на операции сложения и умножения) и замкнутую группу. Рядом со схематичным изображением приведён пример сегмента реального сигнала. В табл. 6 представлены возможные сочетания групп, в столбце «Частота появления» приводится вероятность появления группы в сигнале (в процентах).

Таблица 5

## Возможные сочетания групп

№ п/п	Полная группа на операции умножения	Полная группа на операции сложения	Замкнутая группа	Частота появления	Рисунок
1	-	-	-	0	-
2	+	-	-	0	-
3	-	+	-	1	рис. 3, а, б
4	+	+	-	0	-
5	-	-	+	1	рис. 3, в, г, д
6	+	-	+	0	-
7	-	+	+	0	-
8	+	+	+	98	-

По сигналу первого типа можно вычислить замкнутую группу, но нельзя вычислить полную (ни на операции сложения, ни на операции умножения), по сигналу второго типа можно вычислить полную группу на операции сложения, но нельзя вычислить полную группу на операции умножения и замкнутую группу.

Доля указанных сегментов сигнала составляет около 1% от доли всех сегментов сигнала. Также можно отметить, что чем больше длина сегментов, на которые разбивается сигнал, тем меньше спектров указанных типов.

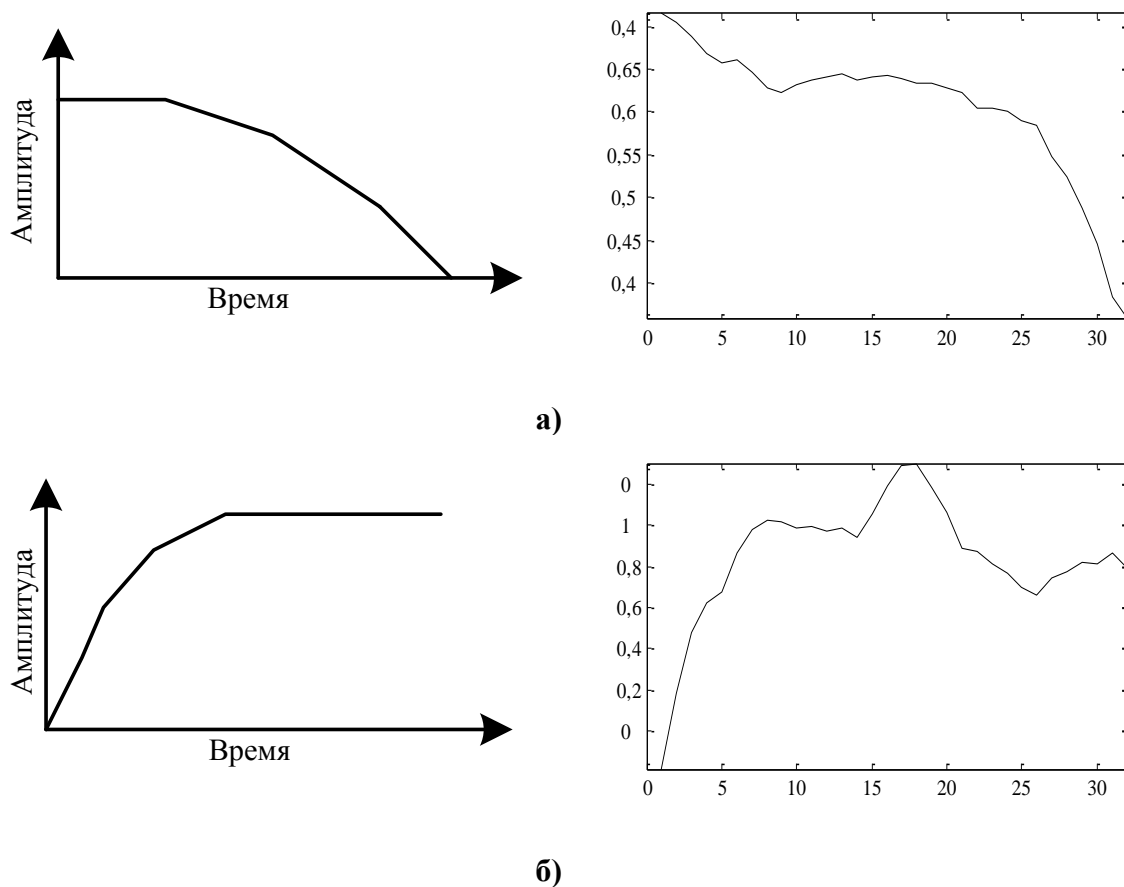
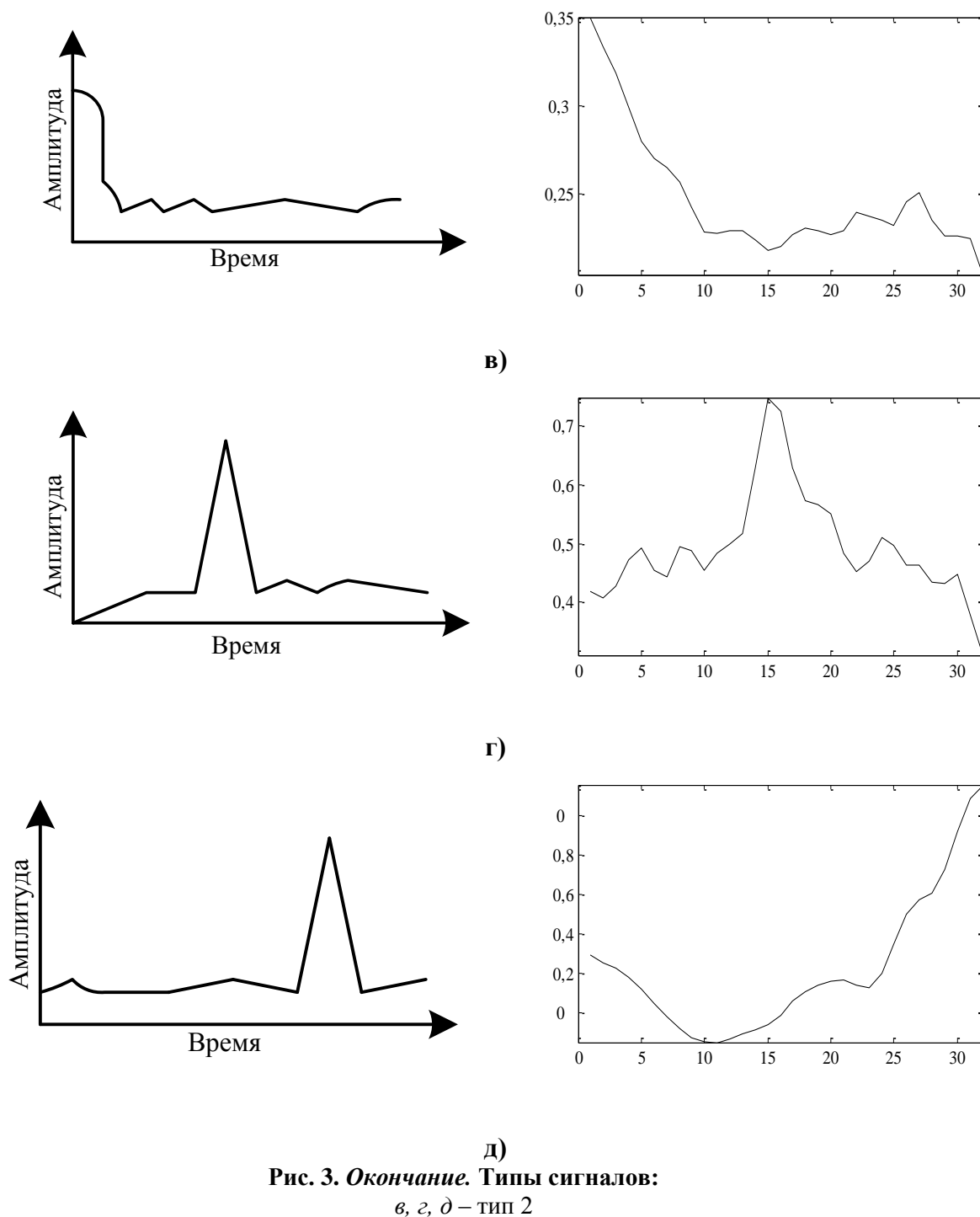


Рис. 3. Типы сигналов:  
а, б – тип 1



Проверена возможность использования спектров указанных типов при решении задачи идентификации. Результаты исследования показали, что их использование влияет на результат идентификации незначительно. Также, при использовании указанных спектров увеличивается время идентификации, так как выполняется обработка большего объема данных.

### Заключение

В данной работе описан метод решения задачи идентификации диктора на основе теории активного восприятия. Для описания речевого сигнала используется  $U$ -представление сигнала. Результаты экспериментов говорят об эффективности предложенного метода. К основным достоинствам предложенного метода можно отнести:

- 1) высокую точность идентификации по сравнению с другими методами идентификации дикторов;
- 2) низкую ошибку ложных срабатываний;
- 3) небольшое количество настраиваемых параметров.

Результаты исследований могут найти применение при построении систем обработки речевых сообщений, в системах текстозависимой и текстонезависимой идентификации, а также в системах верификации дикторов.

#### Библиографический список

1. **Зубов, Г.** Состояние рынка биометрических технологий / Г. Зубов, М. Хитров // Chip News 2007. №10 (123). С. 51-61.
2. **Первушин, Е. А.** Обзор основных методов распознавания дикторов // Математические структуры и моделирование, 2011. Вып. 24. С. 41-54.
3. **Цыпкин, Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
4. **Цыпкин, Я. З.** Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 336 с.
5. **Сорокин, В. Н.** Верификация диктора по спектрально-временным параметрам речевого сигнала / В. Н. Сорокин, А. И. Цыплихин // Информационные процессы. 2009. Т. 10. №2. С. 87-104.
6. **Утробин, В. А.** Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 10. С. 1089–1104.
7. **Anil, K. Jain, Ruud Bolle, Sharath Pankanti** Biometrics: personal identification in networked society // Springer. 1999. P. 411.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**V.E. Gay**

#### **METHOD FOR PROCESSING BIOMETRIC INFORMATION IN SYSTEMS FOR ACCESS CONTR**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. Alexeev

**Purpose:** The paper considers the description of method for speaker identification.

**Design/methodology/approach:** As a theoretical basis for the suggested method of identification used the theory of active perception. This theory is based on the use of the U-conversion. U-transform create multilevel (roughly-precision) representation of a signal using filter Walsh Hartmut system.

**Findings:** Developed algorithm of speaker identification may be used in biometric control systems. Study on algorithm of point to the possibility of its use in solving the problem. Advantages of the proposed algorithm is a low computational complexity and simplicity of implementation.

**Research results:** The results will be used in research on the application of the theory of active perception for processing sound signals. One possible practical applications of this algorithm is its use in locating records in the databases of the audio data, while monitoring the radio.

*Key words:* speaker identification, digital signal processing, analysis of speech signal.

УДК 004.057.7

П.А. Новиков

**ОРГАНИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ СЕТИ LTE**

ООО Мера-НН

Рассмотрена программная эмуляция элементов телекоммуникационной сети. Проведен анализ особенностей механизма качества обслуживания в сети четвертого поколения. Разработан новый алгоритм и архитектурно-функциональные особенности модуля QoS.

*Ключевые слова:* программная эмуляция; сеть связи; качество обслуживания; алгоритм; телекоммуникации.

**Введение**

Разработчикам аппаратных и программных средств для телекоммуникационных сетей необходимо проверять работоспособность проектируемого ими устройства или программного обеспечения в рамках определенной сетевой топологии. Такие эксперименты требуется выполнять как во время процесса разработки продукта, так и перед введением его в эксплуатацию. Натурный эксперимент в данной ситуации очень часто неприменим из-за экономической нецелесообразности или отсутствия законченных действующих решений. Задачу по созданию тестовых топологий позволяет успешно решить программная эмуляция реальных сетевых модулей. Эмуляционный подход имеет значительный экономический эффект по сравнению с использованием натурального моделирования, а также ускоряет и упрощает процесс тестирования разрабатываемого продукта.

Целью работы является исследование и проектирование модуля, предоставляющего качество обслуживания (QoS) в эмуляционных сетях LTE. *Во-первых*, такой модуль должен удовлетворять всем требованиям, предъявляемым стандартом LTE к QoS. Для реализации основной функциональности модуля качества обслуживания, отвечающей всем критериям стандарта связи, автором данной статьи предложен новый алгоритм обработки пакетов. Этот алгоритм интегрирует различные известные методы обработки очередей. Сутью предложенного алгоритма является применение для каждого типа потока трафика своего механизма обработки.

*Во-вторых*, разрабатываемый модуль QoS имеет специфическое назначение, он будет применяться в рамках эмуляции сети LTE. В связи с этим автором предлагается реализовать этот модуль с учетом ряда архитектурно-функциональных особенностей. Основной из них является проектирование модуля QoS как мультиплатформенного приложения. Часто при разработке и проверке какого-либо сетевого устройства возникает необходимость в построении разветвленных тестовых топологий, состоящих из большого числа сетевых элементов. А учитывая тот факт, что различные элементы тестовой топологии могут иметь различные и несовместимые операционные системы, важной задачей является разработка универсального программного обеспечения. Таким образом, реализация механизма качества обслуживания как мультиплатформенной программы позволяет добиться универсальности приложения, а значит и повышения скорости построения и удобства использования тестовых топологий.

*В-третьих*, для повышения гибкости настройки параметров модуля и выполнения контроля за применением политик обслуживания трафика, автором данной работы предлагается реализовать графический интерфейс и набор функций для пользовательской классификации трафика.

## 1. Организация телекоммуникационной сети LTE

В настоящее время мобильные сети используются как для сотовой связи, так и для передачи мультимедийной информации и работы с Интернет. Именно для целей предоставления комплексного мобильного сервиса была разработана технология LTE (Long Term Evolution), а далее ее последующая модификация LTE Advanced.

Для организации сетей LTE была предложена новая сетевая инфраструктура SAE (System Architecture Evolution) [1, 2, 3]. SAE описывает распределение необходимых функций к логическим узлам и требуемые интерфейсы между узлами. Как показано на рис. 1, системная архитектура разделена на две части: сеть радиодоступа (Radio access network - RAN) и core network(CN).

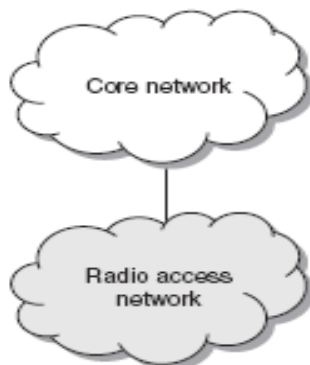


Рис. 1. Системная архитектура SAE

Далее (рис. 2) представлена упрощенная схема реализации архитектуры SAE в рамках сети LTE. Шлюз способен выполнять функции сети пакетных данных (PDN) и обслуживающего шлюза, при этом может быть настроен как на любую из этих ролей, так и на обе. Функционально MME отделен от шлюза – для облегчения развертывания сети, для перехода на независимую технологию и для максимально гибкой масштабируемости.

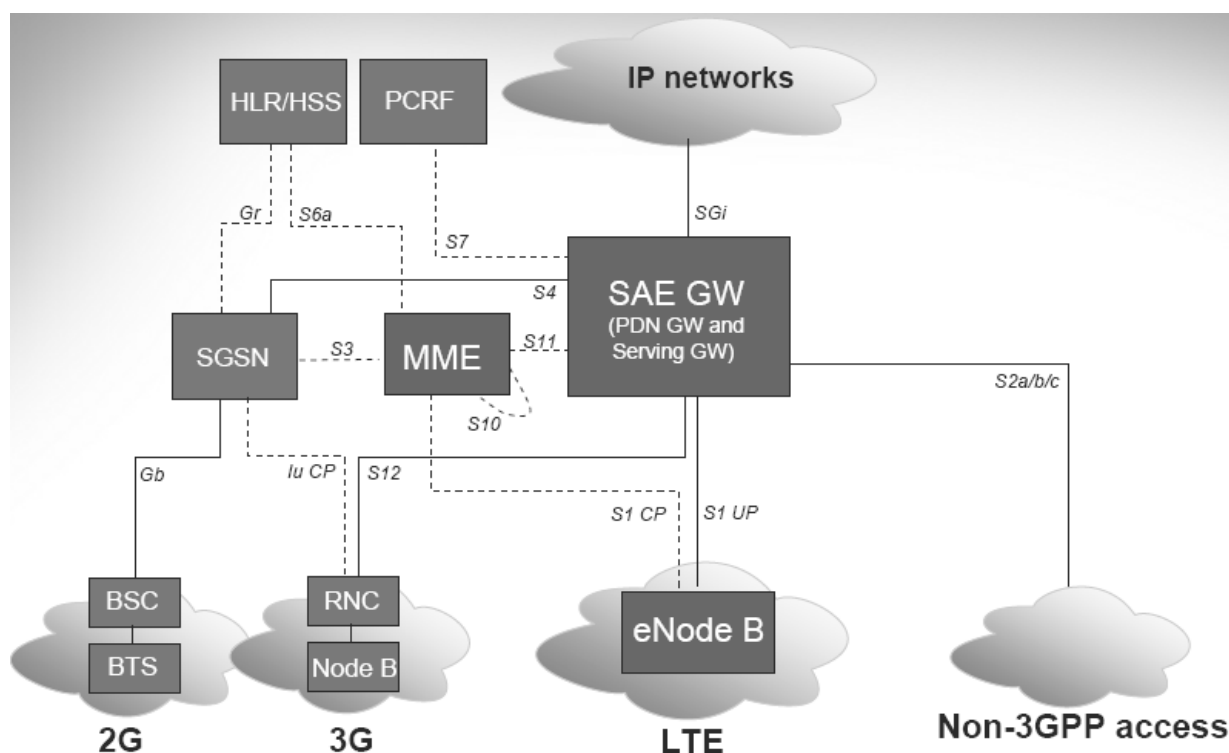


Рис. 2. Архитектура SAE в рамках сети LTE

PDN-шлюз служит общей опорной точкой для всех технологий доступа, обеспечивая стабильную IP-точку присутствия для всех пользователей вне зависимости от мобильности. MME – модуль управления мобильностью (Mobility Management Entity,) обеспечивает хранение служебной информации об абоненте и управление ею.

Далее рассмотрим телекоммуникационные сети с точки зрения их аппаратной реализации. Базовым элементом для построения ИТ-инфраструктуры любого предприятия является стоечная коробка. Простое увеличение количества серверов в стойках приводит и к пропорциональному увеличению выделяемого тепла, коммуникационных кабелей, потребляемой электроэнергии, занимает больше физического места и, конечно, требует больших затрат на администрирование. Повысить эффективность вычислительной системы дает возможность технология blade-servers. Процесс перехода к технологии blade-servers представлен на рис. 3.

Blade-server представляет собой готовые вычислительные блоки, состоящий из набора blade-systems – фактически, отдельных мощных компьютеров без собственного источника питания, выполненных в тонком корпусе (отсюда название blade – лезвие). Blade-systems можно установить на общее шасси, которое даёт им питание и высокоскоростной интерфейс для обмена данными. Вместе вся эта конструкция и представляет собой blade-server.

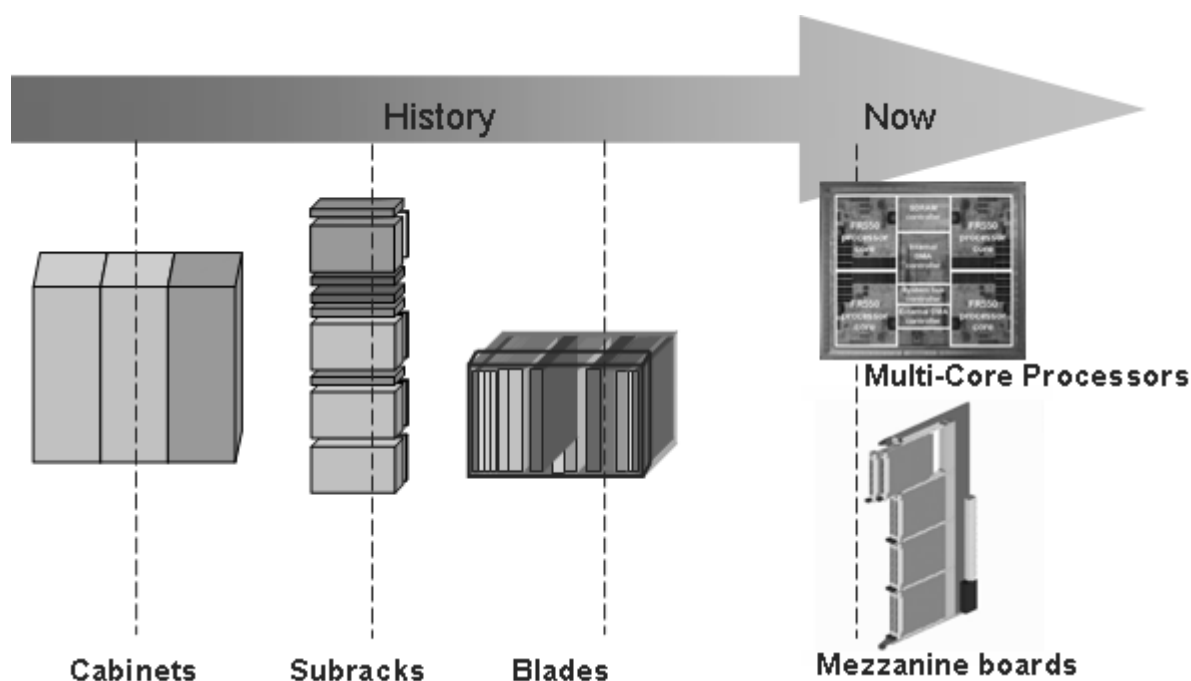


Рис. 3. Эволюция серверов для телекоммуникационных сетей

Инфраструктура blade-server обеспечивает взаимодействие всех blade-systems в subrack как единой системы, а также предоставляет оператору интерфейс для управления этой системой.

## 2. Эмуляция сети LTE программными средствами

В результате быстрого развития методов, принципов, технологий, применяемых в сетях связи, а также их программного представления, сложилась ситуация, когда скорость и время создания аппаратной части отстает от ее программной реализации. Также при разработке и проверке какого-либо сетевого устройства часто возникает необходимость в построении разветвленных тестовых топологий, состоящих из большого числа сетевых элементов. В связи с этим, при разработке программного обеспечения для сетевых устройств blade-systems в большинстве случаев нецелесообразно полностью собирать всю сеть со множе-



ством элементов и модулей. *Во-первых*, потому, что покупка каждой новой версии сетевого устройства является весьма затратным и экономически невыгодным решением. *Во-вторых*, новой версии электрической платы или устройства, для которой разработано программное обеспечение, может еще просто не существовать.

Одним из выходов из данной ситуации является программная эмуляция физических элементов сети, т.е. разработка программных моделей проектируемой аппаратуры. В таком случае можно использовать в качестве элементов сети эмуляционные модели реальных устройств, т.е. соединенные между собой машины с необходимым программным обеспечением. Этот подход дает возможность использовать вместо сетевого устройства обычный персональный компьютер с запущенной на нем программой, имитирующей поведение реального устройства. При этом компьютеры соединяются в локальную сеть, на каждом из них запускается программа определенного элемента сети. Таким образом, эмуляция сети LTE программными средствами позволяет использовать лишь компьютеры и радиочасти, что открывает возможность вести работу над программным обеспечением сети без наличия лаборатории с большим количеством дорогостоящих микросхем и аппаратуры.

Использование предварительной программной эмуляции элементов сети в итоге позволяет существенно снизить время разработки и внедрения новых аппаратных модулей и получить заметный экономический эффект. А учитывая тот факт, что различные элементы тестовой топологии могут иметь различные и несовместимые операционные системы, важной задачей является разработка универсального программного обеспечения.

Для эмуляции сети LTE необходимо программно реализовать каждый функциональный элемент сети. Элементы эмулируемой сети приведены на рис. 4, где представлена радиочасть и сетевая часть LTE [4, 5, 6].

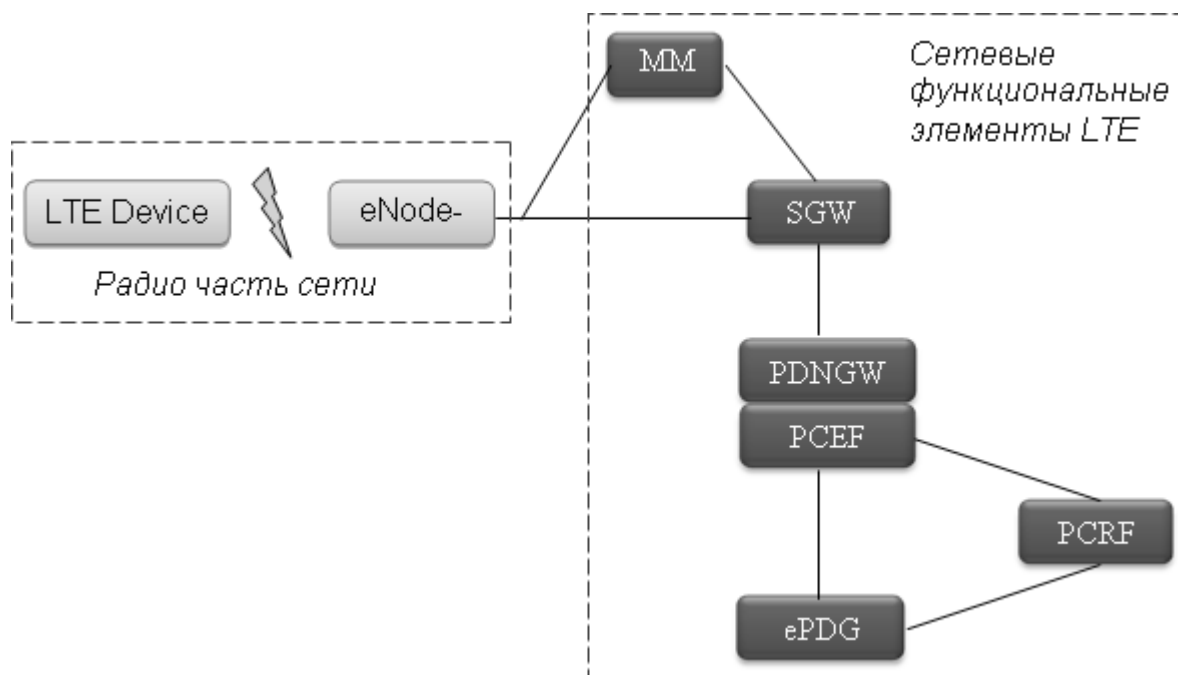


Рис. 4. Структура сети LTE

К радиочасти относятся мультимедийное устройство LTE и приемная часть – базовая станция. Сетевая часть состоит из функциональных блоков. Эти блоки реализованы в виде специальных программ, которые эмулируют элементы LTE сети. MME (Mobility Management Entity) – модуль управления мобильной частью. SGW (Serving Gateway) – модуль, осуществляющий маршрутизацию пользовательского трафика. PDNGW (Packet Data Network Gateway) – модуль, предоставляющий возможность доступа в пакетные сети. ePDG (Evolved

Packet Data Gateway) – функциональность PDN GW для Untrusted Non-3GPP Access. PCRF (Policy and Charging Rules Function) – модуль управления качеством услуг. PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) – модуль выявляет применимый трафик и выполнение применяемой политики. Этот модуль обычно размещен в узле межсетевого интерфейса.

### **3. Применение механизма эмуляции для модуля, управляющего качеством обслуживания**

В связи с повсеместным ростом объемов трафика, такие явления, как перегрузка или задержка трафика становятся насущной проблемой и могут серьезно повлиять на качество доставки пакетов. Провайдеры, в свою очередь, обязаны гарантировать оговоренный уровень сервиса независимо от количества трафика в сети. Для обеспечения требуемого уровня сервиса применяется набор механизмов QoS, которые позволяют обеспечить качество с помощью приоритизации данных и гарантируют производительность в рамках соглашения о качестве обслуживания или тарифа. Применяя необходимые механизмы QoS, провайдеры могут обеспечить, например, корректное распознавание и приоритизацию пакетов с голосом и видео.

Автором в составе группы инженеров велась разработка программного обеспечения для blade-system, которая должна была стать одним из ключевых элементов телекоммуникационной сети. Эта система должна была предоставлять возможности коммутации и маршрутизации трафика, т.е. предоставлять ряд сервисов и возможностей на L2 и L3 уровнях. Целью разработки такого модуля было последующее применение его операторами и провайдерами в рамках блока SAE GW (Core Network) в LTE сетях как многофункционального маршрутизатора. Помимо прочих функций обработки и управления трафиком на L2 и L3 уровнях, такая система должна была содержать модуль QoS (Quality of Service), отвечающий всем требованиям сетей LTE.

В ходе разработки данного программного продукта, возникла необходимость тестировать blade-system в рамках сложных и многоэлементных сетевых топологий на предмет соответствия стандартам работы стека протоколов. Для формирования необходимых топологий было решено прибегнуть к эмуляции элементов сети.

Модуль, обеспечивающий QoS, является одним из важнейших как в реальной сети, так и в ее программной модели. С помощью QoS можно предлагать различные уровни сервиса. При соответствующей конфигурации, для нужного потока данных QoS позволит обеспечить поддержку тарифов с параметрами, оговоренными с заказчиком. Таким образом, провайдер может создать ценовую политику, основываясь на различных классах приоритета.

Автором были рассмотрены особенности реализации QoS модуля в рамках эмуляционной модели современной сети. Проведен анализ особенностей механизма качества обслуживания для сети LTE. Разработан алгоритм, позволяющий учесть требования стандарта LTE к модулю QoS. Рассмотрены способы повышения эффективности применения приложения, предоставляющего качество обслуживания, выраженное в реализации ряда архитектурно-функциональных особенностей модуля. В частности, реализация механизма качества обслуживания как мультиплатформенной программы. Такая особенность позволяет добиться универсальности приложения, а значит, и повышения эффективности при построении и использовании тестовых топологий.

### **4. Анализ особенностей механизма QoS в сетях LTE**

Механизм QoS применяется для потоков данных в PCEF, эти потоки данных представлены IP пакетами. PCEF применяет правила PCC (контроль управления и загрузки) для классификации трафика по потокам сервисных данных. Правила могут быть определены заранее или динамически обеспечены в PCEF. Динамические правила PCC получают из модуля PCRF на основе информации, предоставленной AF (согласно необходимой полосе пропускания), данных PCEF (согласно необходимому QoS на уровне трафика пользователя) и других особых данных абонента, при их наличии [7, 8].

Тип трафика однозначно характеризуется маркером QCI (*QoS Class Identifier*), который определяется в PCRF для каждого из пакетов. При поступлении пакетов трафика, PCEF отправляет запрос в PCRF с целью их классификации. PCEF посылает в PCRF идентификатор пользователя или его IP адрес, а также тип обрабатываемых данных ToS (*Type of Service*). На основании этих параметров PCRF формирует и высылает обратно в PCEF тот или иной QCI. В зависимости от значения, принятого QCI в PCRF к пакету применяется тот или иной тип обслуживания.

Информация о соответствии значения QCI трафику определенного типа, а так же требования к качеству обслуживания такого трафика находится в модуле PCRF. Стандарт требований к качеству для LTE сети представлен в табл. 1. PCRF предоставляет эту информацию, когда в PCEF необходимо принять решение о том, как поступить с тем или иным пакетом.

Таблица 1

Соответствие значений QCI характеристикам трафика

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Conversational voice
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Conversational video (live streaming)
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Real time gaming
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Non-conversational video (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	$10^{-3}$	IMS signaling
6		6	300 ms	$10^{-6}$	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	$10^{-6}$	Voice, Video (live streaming), Interactive gaming
8		8	300ms	$10^{-3}$	Video (buffered streaming), TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
9		9		$10^{-6}$	

Основными параметрами трафика, которые ставятся в соответствии значению QCI, являются следующие: GBR (*Guaranteed bit rate*), Priority, Resource Type, Packet Budget Delay, Packet Error Loss Rate. Таким образом, качество обслуживания в LTE сети должно соответствовать требуемым для каждого конкретного потока уровням задержки и потери пакетов. Кроме того, сигнальному трафику с наивысшим приоритетом должно отдаваться абсолютное предпочтение при обслуживании. Однако, как правило, объем сигнального трафика не велик и не требует всей ширины пропускания канала. Следовательно, чтобы избежать простоев системы, необходима параллельная обработка очередей. Часть классов трафика требует гарантированно выделенной полосы пропускания. Для таких очередей необходимо производить анализ имеющейся в наличии свободной полосы пропускания и начинать обработку только в том случае, если требуемая полоса пропускания доступна. Обработка потоков с GBR начинается только в том случае, если свободна необходимая полоса пропускания либо ее можно освободить от менее приоритетного трафика с non-GBR.

## 5. Алгоритм и функциональные особенности QoS модуля

Реализация механизма качества обслуживания заключается в реализации модуля QoS (*routing\_pcc\_qos*). Этот модуль запускается на PCEF и применяет политику QoS к проходящему через PCEF трафику. Для классификации входящих пакетов модуль *routing\_pcc\_qos* отправляет запрос к PCRF. На PCRF запущен модуль, обрабатывающий присылаемые PCEF

параметры, идентифицирующие пользователя. После обработки принятых данных PCRF определяет QCI и отправляет требования к качеству обслуживания для трафика назад PCEF.

Как известно, основными алгоритмами обработки очередей в рамках модуля QoS являются следующие [9]:

- алгоритм FIFO (First In – First Out);
- приоритетное обслуживание PQ (Priority Queuing);
- настраиваемые очереди CQ (Custom Queuing);
- взвешенное справедливое обслуживание WFQ (Weighted Fair Queuing).

Однако из анализа требований к QoS в сетях LTE видно, что ни один из перечисленных алгоритмов не может быть эффективно использован для удовлетворения всем особенностям LTE. Алгоритм FIFO не обладает поддержкой дифференцированного качества обслуживания. В механизме PQ приоритеты очередей имеют абсолютный характер предпочтения при обработке: пока из более приоритетной очереди не будут выбраны все пакеты, устройство не переходит к обработке следующей, менее приоритетной. Для CQ с каждой очередью связывается доля пропускной способности, предоставляемая трафику с данным приоритетом, но такое распределение полосы пропускания не эффективно для non-GBR трафика. В механизме WFQ очередям в порядке круговой очереди выделяется сетевой ресурс, пропорциональный назначенным им весам. Однако предварительное выделение постоянного сетевого ресурса очередям, не требующим гарантированной полосы пропускания, является неэффективным решением.

В связи с этим для QoS модуля в данной работе предлагается использовать новый алгоритм, построенный на следующих принципах:

- все очереди обрабатываются параллельно;
- приоритет для сигнального трафика, характеризующегося  $QCI = 5$ , имеет абсолютный характер и наибольшее значение;
- очереди с  $QCI = 1, 2, 3$  и  $4$ , характеризующиеся GBR, связываются с установленным значением пропускной способности выходного интерфейса, гарантируемой данному классу трафика;
- полоса пропускания для очередей с GBR резервируется с ущербом для менее приоритетного трафика, но без помех для сигнального трафика с  $QCI = 5$ ;
- очереди с non-GBR трафиком используют всю оставшуюся от более приоритетного трафика полосу пропускания, используют абсолютный характер приоритета по значению QCI.

Этот алгоритм определяет базовые функции обработки пользовательского трафика в зависимости от значения QCI. Таким образом, в модуле routing\_pcc\_qos на PCEF должны быть реализованы фильтрация пакетов, распределение пакетов по различным очередям в соответствии с их QCI, обработка пакетов с учетом требуемых критериев качества, удаление из очереди пакетов с истекшим временем жизни. Пакеты из входящего потока помещаются в девять входных очередей в соответствии с их значением QCI. Каждая очередь характеризуется порядковым номером  $N = 1, 2, \dots, 9$ , соответствующим приоритету трафика, для которого эта очередь предназначена. Для обработки пакеты из этих очередей помещаются в специальный буфер. Размер буфера (buffValue) формируется исходя из пропускной способности выходного (BR) канала:  $buffValue = BR [bit / s] \cdot TimeSlot [s]$ , где TimeSlot временной интервал, в течение которого формируется буфер. Таким образом, происходит циклическое заполнение буфера пакетами в соответствии с приоритетами, а затем его освобождение и передача пакетов на выход системы. Длительность одной итерации равна TimeSlot, алгоритм ее выполнения представлен на рис. 5. Операция записи пакетов из текущей очереди в буфер выполняется пока в буфере остается свободное место либо пока во входной очереди имеются пакеты.

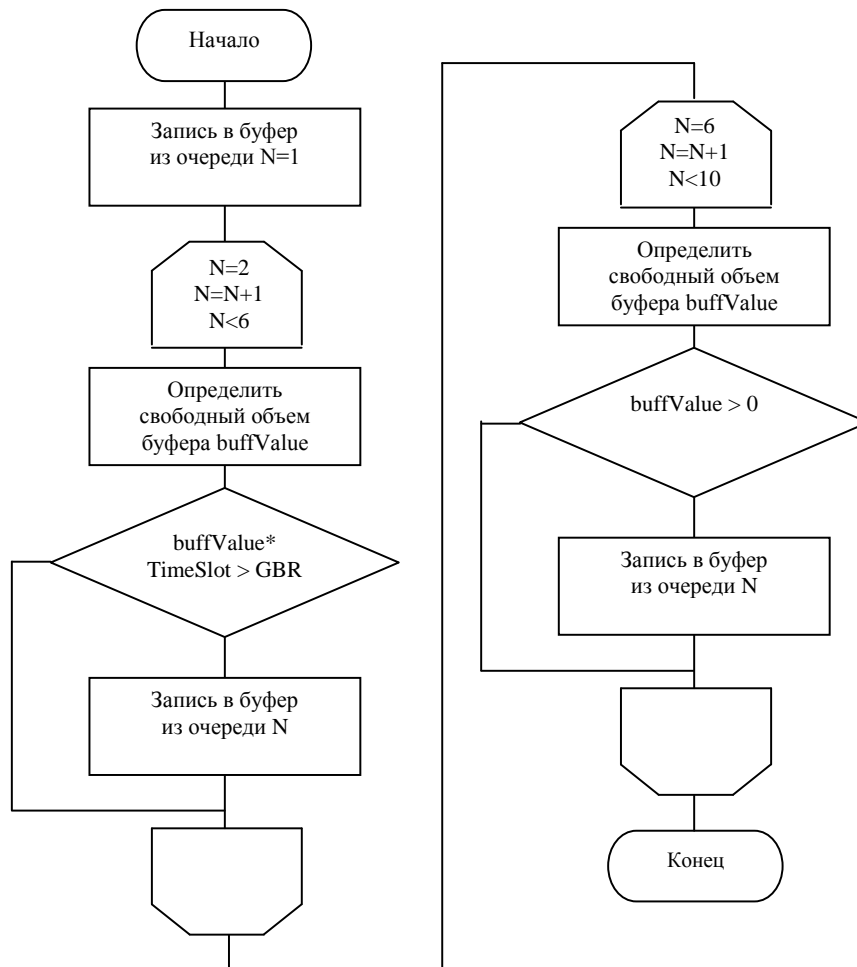


Рис. 5. Алгоритм одной итерации формирования буфера пакетов

Кроме базовой функциональности обеспечения качества обслуживания в QoS приложении с целью повышения эффективности его использования предлагается реализовать следующие возможности:

- мультиплатформенность программы, что упростит переносимость разрабатываемого продукта и устранит привязку к конкретной операционной системе и оборудованию;
- возможность редактировать таблицу параметров (критериев качества обслуживания, приведенных на рис. 2 трафика или использовать предустановленные значения, что позволит формировать при тестировании различные политики и условия обработки трафика;
- графический пользовательский интерфейс для настройки основных параметров программы и критериев качества обслуживания, который позволит разработчику быстро сконфигурировать приложение под выполнение требуемых задач.

Часто при разработке и проверке какого-либо сетевого устройства возникает необходимость в построении разветвленных тестовых топологий, состоящих из большого числа сетевых элементов. В таких случаях целесообразнее использовать в качестве элементов сети эмуляционные модели реальных устройств, т.е. соединенные между собой машины с необходимым программным обеспечением. Различные сетевые устройства, серверы и компьютеры могут иметь различные операционные системы и аппаратные особенности. Программное обеспечение, независимое от платформы и системы, может быть установлено на любое устройство. Такая универсальность заметно упрощает установку, настройку программного обеспечения, а также взаимодействие сетевых элементов друг с другом. Таким образом, для программного модуля QoS, используемого в рамках эмуляционной модели сети, мультиплатформенность является одной из наиболее важных архитектурных особенностей. Такие

же особенности, как графический интерфейс и возможность пользовательской настройки, улучшают и упрощают процесс тестирования.

### Заключение

Предложен новый алгоритм для управления качеством обслуживания пользовательского трафика в эмуляционной модели LTE сети, позволяющий обрабатывать множество потоков одновременно в соответствии с их типами и приоритетами и тем самым улучшить эффективность использования полосы пропускания канала.

Программа, реализованная на основе предложенного алгоритма с учетом рассмотренных архитектурно-функциональных особенностей, позволит оценить эффективность применения профилей и тарифов к каждому потоку данных в эмуляционной LTE сети. Программное обеспечение, независимое от платформы и системы, может быть установлено на любые устройства в рамках тестовой топологии. Такая универсальность заметно упрощает установку, настройку программного обеспечения, а также взаимодействие сетевых элементов друг с другом. Таким образом, для программного модуля QoS, используемого в рамках эмуляционной модели сети, мультиплатформенность является одной из наиболее важных архитектурных особенностей. Такие же особенности, как графический интерфейс и возможность пользовательской настройки улучшают и упрощают процесс тестирования.

### Библиографический список

1. **Fritze, M.Sc.** SAE – The Core Network for LTE. // Ericsson Austria GmbH. 2008.
2. **Beming, P.** LTE-SAE architecture and performance / P. Beming, L. Frid // Ericsson, 2007.
3. **Дальман, Э.** Радио-интерфейс LTE в деталях / Э. Дальман, А.Фурускар, И. Ядинг. – М.: Сети и Системы связи, 2008.
4. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий [и др.]. – М.: Техносфера, 2005.
5. **Zyren, J.** Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer – White Paper, [www.freescale.com](http://www.freescale.com)
6. **Graf, T.** Remco van Mook and other / T. Graf, G. Maxwell // Linux Advanced Routing & Traffic Control, 2004.
7. Long Term Evolution (LTE): an introduction. White Paper // Ericsson. 2007.
8. **Катал, М.** Анализ и сравнение контроля QoS (качества услуг) в сетях следующего поколения / М. Катал. – М., 2008.
9. **Sierra, R.** Fair queuing in data networks // Internetworking, 2002.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.3013*

**P. Novikov**

### THE QUALITY OF SERVICE MODULE FOR PROGRAMMING EMULATION OF THE NETWORK

**Purpose:** Developing of programming emulation model for 4<sup>th</sup> Generation telecommunication network and design of a QoS mechanism as part of this investigation.

**Design/methodology/approach:** Developing of specific Java/JUnit framework. Combination of different types of QoS algorithms.

**Findings:** Analysis of quality of service for 4th generation network is proposed in the paper.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further creation of programming emulation model for LTE network.

**Originality/value:** New algorithm and features of QoS are proposed in the paper. The approach to design of QoS framework was specified during the investigation.

*Key words:* programming emulation; network; quality of service; algorithm; telecommunication.

УДК 004.057

О.В. Аверин

## РЕАЛИЗАЦИЯ ТОКЕНИЗАТОРА НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

**Цель:** Разработка эффективного алгоритма для графического процессора токенизации текстов на естественном языке.

**Методология проведения работы:** Применяются различные алгоритмы распараллеливания токенизации текста для SIMT архитектуры. Для проверки эффективности проводится ряд экспериментов.

**Результаты и область применения:** Использование графических процессоров для токенизации текста подтверждено экспериментально, а следовательно, полученный алгоритм может быть использован для решения широкого круга задач компьютерной лингвистики.

**Выводы:** Предложенный алгоритм позволяет значительно сократить время выполнения процедуры токенизации текста.

*Ключевые слова:* CUDA, параллельные вычисления, компьютерная лингвистика

## Введение

Задачи обработки текстовой информации на естественных языках, такие как рубрикация, установление авторства, поиск фактов и т.д., являются весьма важными. Этот класс задач решается с помощью различных лексических анализаторов, для которых элементарной составляющей текста является, как правило, токен или лексема. Данный этап обработки текстовой информации может занимать значительную часть времени выполнения всего алгоритма.

Применение современных графических процессоров может значительно сократить время токенизации текста на естественном языке, без применения использования дорогостоящих многопроцессорных систем. Кроме того, для разработчиков стали доступны несколько языков высокого уровня для графических процессоров, таких как CUDA [1] и OpenCL [2], а следовательно, исчезла необходимость изучать особенности программирования графических процессоров для решения неграфических задач [3].

## Многопоточные алгоритмы токенизации

Наиболее простым способом сокращения времени токенизации является переложение однопоточного алгоритма для центрального процессора на архитектуру графического процессора путём распараллеливания по входным данным.

Обозначим символы, которые могут входить в состав токена, – «1», а символы, разделяющие токены, – «0».

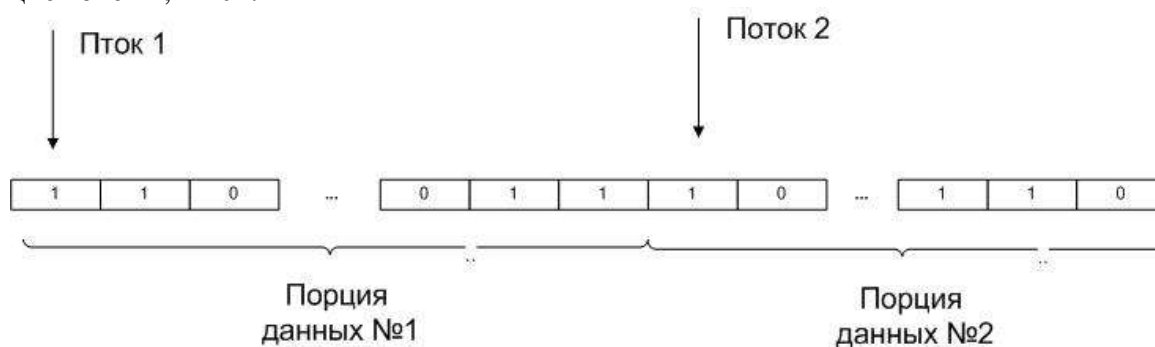


Рис. 1. Распараллеливание по входным данным

Таким образом, если видеокарта может параллельно выполнять  $N$  потоков, а обработать необходимо текст, состоящий из  $M$  символов, то каждый поток должен обработать  $M/N$  символов, а время вычислений может быть сокращено в  $N$  раз.

Однако такой алгоритм имеет ряд существенных недостатков:

1) Некоторые токены могут находиться на границе, разделяющей блоки данных, обрабатываемых разными потоками. Это повлечет за собой постобработку результатов работы токенизатора и «склеивание» таких токенов.

2) При реализации данного алгоритма на графических процессорах компании NVIDIA значительный объём данных негативно скажется на производительности, так как объёмы «быстрых» видов памяти незначительны и размещение входных данных будет возможно только в глобальной памяти видеопроцессора, обладающей высокой латентностью. Если  $M/N > 128$  байт, где  $M$  – количество символов во входном тексте, а  $N$  – количество потоков, то все обращения к глобальной памяти будут безколлизийными [1], а следовательно, время вычислений возрастет.

*Первая проблема* может быть решена путём перекрытия областей обработки данных потоками, если порции данных будут пересекаться  $n$  символами, где  $n$  – максимальная длина токена.

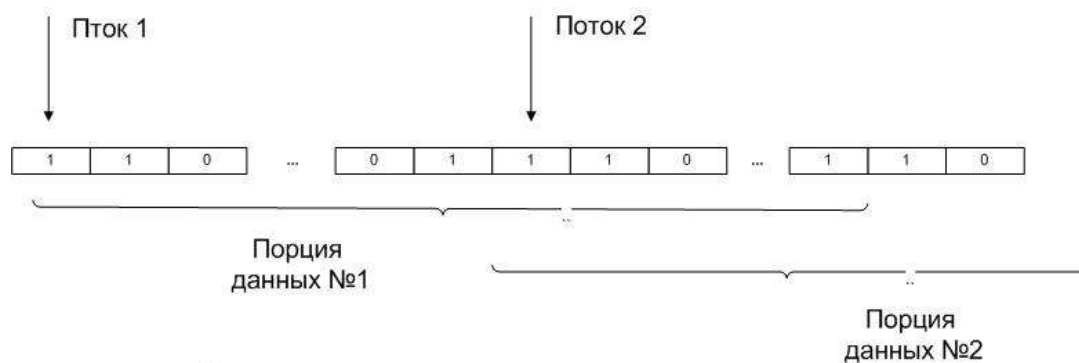


Рис. 2. Перекрытие порций данных

*Вторая* (при условии незначительных размеров порций данных для каждого потока) может быть решена путём копирования исходных данных в общую память (shared memory) мультипроцессора. Данная процедура может быть реализована очень быстро, благодаря коллизиям при обращениях к глобальной памяти.

Следует заметить, что для повышения производительности массив данных в общей памяти должен индексироваться так, чтобы соседние символы находились в соседних блоках. Это дает возможность избавиться от коллизий при обращениях к общей памяти.

Данный алгоритм позволяет значительно ускорить процесс токенизации, но он также не лишен недостатков:

1. При значительном объёме входных данных необходим значительный объём общей памяти, а это снижает количество блоков потоков, которое может выполняться на одном мультипроцессоре одновременно, что снижает производительность.

2. Необходим контроль попадания токена на границу блоков данных.

3. Требуется дублирование данных в общей памяти мультипроцессоров.

Рассмотрим подробнее проблему вхождения токенов друг в друга. Пусть мультипроцессор может одновременно выполнять два потока, порция данных на один поток составляет четыре символа, токен может состоять из любых непобельных символов, а текст для токенизации состоит всего из одного слова – к примеру «молоко», тогда при простом распараллеливании по входным данным мы получим два токена «моло» и «ко».

Если увеличить порцию данных до шести символов, а размер перекрытия порций сделать равным двум, как это было предложено ранее, то результатом станут два токена – «мо-



локо» и «ко». Это может быть исправлено на этапе постобработки, однако это может значительно увеличить время работы алгоритма.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается следующий алгоритм:

1. Каждый символ входного текста обрабатывается одним потоком.
2. В общей памяти каждого мультимикропроцессора каждый блок потоков загружает  $N + M$  символов, где  $N$  – количество потоков в одном блоке,  $M$  – максимальная длина токена.
3. Таким образом, решается вопрос минимизации выделения общей памяти и максимизируется количество блоков потоков, обрабатываемых на одном мультимикропроцессоре.

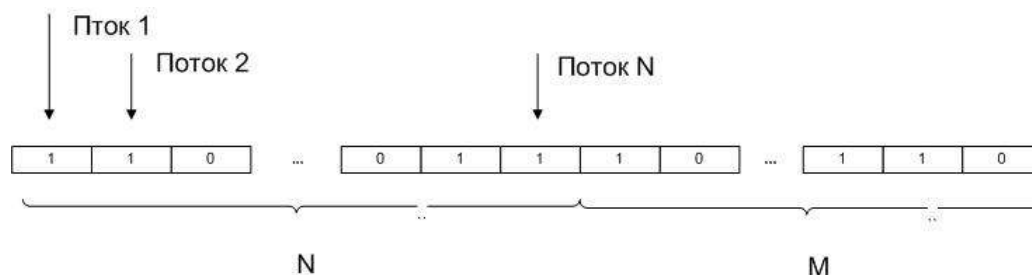


Рис. 3. Один поток на один символ

Токен начинается не с любого разрешённого символа, а с пары символов – неразрешённый затем разрешённый. Это позволит избавиться от постпроверки токенов на вхождение друг в друга.

Такой алгоритм токенизации для одного потока, может быть реализован в виде простого конечного автомата.

Разобьём все символы алфавита на четыре класса:

- 1) Символы, которые могут входить в токен на любой позиции.
- 2) Символы, которые не могут входить в токен.
- 3) Символы знаков препинания.
- 4) Символы, которые могут находиться только внутри токена, т.е. не могут находиться на первой и последней позициях.

Типы символов вычисляются по массиву в константной памяти, где индекс элемента соответствует ASCII-коду соответствующего символа. Например, символу 'т' соответствует ASCII-код равный 231, соответственно в 231-й ячейке массива будет храниться 1, т.е. это символ, который может входить в токен в любой позиции.

Рассмотрим все варианты комбинаций из двух символов. Для этого построим таблицу, где индексу строки соответствует номер класса первого символа, а номер столбца – классу второго символа.

Таким образом, мы получим шесть видов комбинаций:

1. Символ внутри токена.
2. Последний символ в токене.
3. Символ перед словом.
4. Знак препинания.
5. Игнорирующиеся символы.
6. Знак препинания, за которым следует начало слова.

Таблица 1

#### Пары символов

Виды комбинаций				
	1	2	3	4
1	1	1	2	2
2	1	4	4	4
3	3	5	5	5
4	6	4	4	4

Для повышения производительности данная таблица помещается в константную память видеопроцессора.

Необходимо отметить, что для подобного алгоритма будет свойственно избыточное выделение памяти, так как токен может начинаться с каждой позиции во входном тексте. Блоки потоков не могут быть синхронизированы между собой, а следовательно, необходимо резервировать память под количество токенов, равное количеству потоков, которое в свою очередь равно количеству символов во входном тексте, а следовательно, большая часть памяти будет соответствовать символам, с которых не начинаются токены, для удаления которых потребуется постобработка.

Если она будет выполняться на *CPU*, то потребуется совершить копирование значительного количества «пустых данных» из памяти графического процессора в оперативную память. Это процедура довольно медленная, и для сокращения времени её выполнения необходимо минимизировать объём данных.

### Обработка ошибок и исключений

Рассмотрим ошибки, порождаемые предложенной ранее классификацией символов. Очевидно, что некоторые символы могут быть как разделителями между токенами, так и их частью –, например, «точка», которая может выступать как терминальный символ естественного языка, так и частью *URL* или символом, разделяющим целую и дробную части числа.

Для решения этой проблемы реализуется последующая проверка последовательностей токенов. В ходе выделения токены классифицируются как числовые, кириллические, латинские, смешанные и т.д. Затем определяются последовательности, которые могут быть объединены в один токен.

Данные последовательности записываются в виде векторов фиксированной длины в константную память видеопроцессора. В первый элемент вектора помещается действительная длина последовательности.

Стоит отметить, что подобный подход имеет ряд недостатков:

1. Ограничена максимальная длина последовательности.
2. Часть выделенной константной памяти не будет использована.

При проверке последовательностей распараллеливание по данным происходит аналогично процедуре поиска токенов.

### Результаты испытаний

Для тестирования производительности предложенных алгоритмов использовалось следующее оборудование и программное обеспечение:

1. Процессор Intel Core 2 Duo E6700.
2. Оперативная память DDR 2 объёмом 4ГБ.
3. Видеопроцессор GeForce GTS 250.
4. Видеопроцессор GeForce GTS 450.
5. Операционная система Windows 7 x64.

Все эксперименты проводились на случайных текстах размером порядка одного Гбайта.

Таблица 2

### Результаты тестирования

Условия эксперимента	Производительность Мбайт/с
Аналогичный алгоритм на CPU (один поток)	10.1
GeForce GTS 250	55.2
GeForce GTS 450	85.3

Следует отметить, что при использовании видеопроцессора одновременно для расчётов средствами технологии CUDA и отображения информации на мониторе, его производительность значительно снижается. По этой причине для отображения использовалась интегрированная видеокарта.

### Выводы

Проведено исследование, которое наглядно показывает, что область применения современных графических процессоров не ограничивается обработкой видео. Этот класс устройств позволяет значительно повысить производительность обработки текстовой информации, что немаловажно для широкого круга задач корпусной лингвистики, где объёмы исходных данных значительны.

Необходимо заметить, что предложенный алгоритм реализует довольно простые правила токенизации естественного языка, что влечёт за собой появление ошибок и неточностей, что делает его малоприменимым для синтаксического анализа текста. Однако при решении таких задач, как поиск ключевых слов и словосочетаний частотными методами для рубрикации и определения тональности текста, а также при определении авторства – данными ошибками можно пренебречь.

Очевидно, что при использовании более мощных видеопроцессоров последних поколений (GeForce 400 и 500) производительность данных алгоритмов значительно возрастет, однако и использование относительно старых устройств позволяет получить показатели выше, чем у современных центральных процессоров.

### Библиографический список

1. **Nvidia, C.** Compute Unified Device Architecture Programming Guide/ C. Nvidia. – Santa Clara, CA. 2012.
2. **Munshi, A.** The OpenCL specification version 1.0. Khronos OpenCL Working Group. 2009.
3. **Harris, M.** GPGPU: General-purpose computation on graphics hardware / M. Harris, D. Luebke // In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques: ACM SIGGRAPH 2005. Courses. – Los Angeles, California. 2005.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**O.V. Averin**

### GPU TOKENIZER

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

**Purpose:** Effective algorithm development for text tokenization graphical processor with native language.

**Design/methodology/approach:** Variety of algorithms for parallel text tokenization are to be implemented for SIMT architecture. Row of experiments is to be applied to verify effectiveness and performance.

**Results and scope of use:** Possibility of graphical processors usage for text tokenization has been successfully confirmed within held experiments and therefore developed algorithm can be applied for the wide range of computer linguistic tasks.

**Summary:** Introduced algorithm allows to significantly speedup text tokenization procedure.

*Key words:* CUDA, parallel computing, computer linguistics.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 658.527.011

А.А. Иванов

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель работы.** Установление оптимальной зависимости между числом каналов обслуживания и их производительностью, которая предполагает минимизацию затрат и потерь, связанных с простоями технологического оборудования.

**Метод проведения работы.** В работе использована математическая модель системы массового обслуживания (СМО) в виде ориентированного графа с заданными процедурой обслуживания, а также интенсивностями заявок и обслуживания. При этом принято допущение, что все потоки в СМО являются пуассоновскими, а процесс функционирования системы представляет собой марковский случайный процесс. Для вычисления вероятностей состояний системы используются базовые уравнения СМО.

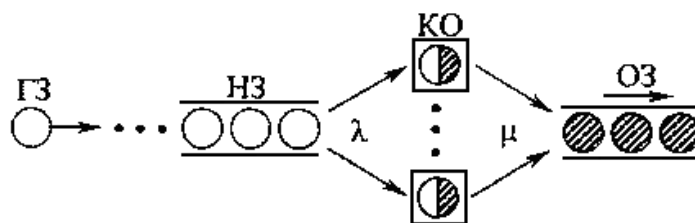
**Результаты и область их применения.** Показано, что решение базового уравнения для СМО с двумя состояниями может быть выполнено с помощью формулы полной вероятности, а для более сложной СМО – с помощью численных методов на ЭВМ. Задавая входные и выходные характеристики стационарной СМО, можно быстро вычислять вероятности ее состояний, что важно при проектировании отказоустойчивых автоматизированных комплексов и линий.

**Выводы.** Предложена методика расчета вероятностей состояний системы массового обслуживания, позволяющая установить оптимальную зависимость между числом каналов обслуживания и их производительностью.

*Ключевые слова:* система массового обслуживания, вероятность состояния системы, интенсивности заявок и обслуживания, дисциплина очереди.

Теория массового обслуживания изучает процессы, связанные с удовлетворением массового спроса на обслуживание технических объектов или людей с учетом *случайного* спроса и предложения. Поэтому работа системы массового обслуживания (СМО) ведется нерегулярно: то образуется *очередь* заявок на обслуживание, то начинают *простаивать* каналы обслуживания (технические устройства, приборы).

Основная задача теории массового обслуживания – установить *оптимальную* зависимость между числом каналов обслуживания и их производительностью. Оптимальная зависимость предполагает минимизацию затрат на каналы обслуживания и потерь, связанных с простоями технологического оборудования в очереди на обслуживание и с простоями каналов обслуживания. Обобщенная схема СМО показана на рис. 1.



**Рис. 1. Обобщенная схема СМО:**

ГЗ – генератор заявок; НЗ – накопитель заявок; КО – каналы обслуживания; ОЗ – обслуженные заявки;  $\lambda$ ,  $\mu$  – характеристики входного и выходного потока заявок соответственно

Математическая модель СМО может быть представлена в виде ориентированного графа, вершины которого есть состояния системы, а на дугах графа указаны входные  $\lambda$  и выходные  $\mu$  характеристики (рис. 2).

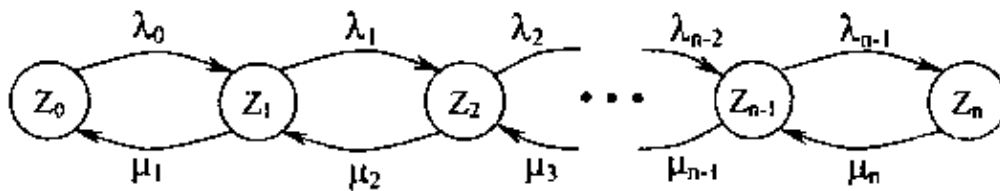


Рис. 2. Пример графа СМО с  $n$  состояниями

Для построения математической модели СМО необходимо иметь следующие исходные данные:

- интенсивность заявок, т.е. среднее число заявок в единицу времени

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{cp}}}, \text{ ч}^{-1},$$

где  $t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$  - среднее время между заявками;  $n$  – число наблюдений;

- интенсивность обслуживания, т.е. среднее число обслуженных заявок в единицу времени

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{об}}}, \text{ ч}^{-1},$$

где  $t_{\text{об}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$  - среднее время обслуживания заявки;

- процедура обслуживания (дисциплина очереди). Живая очередь (первым пришел – первым обслужен); срочное обслуживание (по шкале приоритетов).

Относительный приоритет – поступившая заявка начинает обслуживаться, когда закончится обслуживание предыдущей заявки. Абсолютный приоритет – поступившая заявка начинает обслуживаться сразу (обслуживание предыдущей заявки прерывается).

Принимая допущение, что все потоки  $\lambda$  и  $\mu$  в модели СМО являются простейшими (пуассоновскими), заключаем, что процесс функционирования системы представляет собой марковский случайный процесс [1, 2, 3, 4]. Как известно, в простейшем потоке событий число заявок  $k$  за время  $t$  распределяется по закону Пуассона:

$$P_t(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t}.$$

Заявки поступают в систему в случайные моменты времени, причем вероятность поступления одной заявки  $P_i(t)$  в интервале от  $t$  до  $t + \Delta t$  равна  $P_i(t) = \lambda \Delta t$  и не зависит от  $t$ . Вероятность появления в этом интервале двух и более заявок пренебрежимо мала.

Длительности обслуживания отдельных заявок предполагаются также случайными величинами с экспоненциальным законом распределения. Это свидетельствует о том, что вероятность окончания обслуживания очередной заявки в промежутке от  $t$  до  $t + \Delta t$  не зависит от времени  $t$  и равна  $P_{\text{об}}(t) = \mu \Delta t$ .

Базовые уравнения СМО используются для вычисления вероятностей состояний системы во время переходного и установившегося (стационарного) режима. Переходный процесс характеризуется пошаговым изменением вероятностей состояний системы от начального к установившемуся.

Сначала рассмотрим минимальный граф СМО с двумя возможными состояниями (рис. 3).

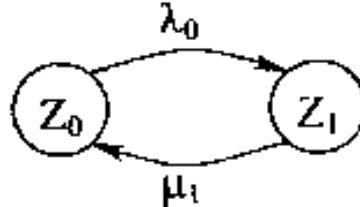


Рис. 3. Граф СМО с двумя состояниями

Расчет вероятностей состояний системы за период  $\Delta t$  проведем, считая потоки пуассоновскими. Рассмотрим возможные ситуации:

1. Вероятность пребывания системы в состоянии  $z_0$  в момент  $t$  равна

$$P_0(t).$$

Это означает, что в момент  $t$  и за период  $\Delta t$  в систему не поступило ни одной заявки.

2. Вероятность перехода системы из  $z_0$  в  $z_1$  при поступлении заявки в период  $\Delta t$ .

Найдем вероятность поступления заявки в систему за период  $\Delta t$  (аналогично вероятности появления отказа)

$$1 - \overset{\Delta t}{\underset{0}{a}}^{-\lambda} = 1 - (1 - \lambda_0 \Delta t) = \lambda_0 \Delta t,$$

где  $\overset{\Delta t}{\underset{0}{a}}^{-\lambda} \approx 1 - \lambda_0 \Delta t$  – вероятность непоступления заявки.

Тогда вероятность перехода системы из  $z_0$  в  $z_1$  по теореме умножения первой и второй вероятностей равна

$$- P_0(t) \cdot \lambda_0 \Delta t.$$

Знак минус показывает уменьшение вероятности состояния  $z_0$ .

3. Вероятность перехода системы из  $z_1$  в  $z_0$  при обслуживании заявки за период  $\Delta t$ .

Вероятность пребывания системы в состоянии  $z_1$  равна

$$P_1(t).$$

Вероятность обслуживания заявки за период  $\Delta t$  равна

$$1 - \overset{\Delta t}{\underset{0}{a}}^{-\mu_1} = 1 - (1 - \mu_1 \Delta t) = \mu_1 \Delta t.$$

Аналогично вторая вероятность перехода системы из  $z_1$  в  $z_0$  по теореме умножения вероятностей равна

$$P_1(t) \cdot \mu_1 \Delta t.$$

Знак плюс показывает увеличение вероятности состояния  $z_0$ .

Вероятность состояния системы, включающего все три ситуации, находим по теореме сложения вероятностей:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) - P_0(t) \cdot \lambda_0 \Delta t + P_1(t) \cdot \mu_1 \Delta t.$$

Перенесем  $P_0(t)$  влево и разделим на  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta P_0(t)}{\Delta t} = -P_0(t) \cdot \lambda_0 + P_1(t) \cdot \mu_1.$$

Переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим первое дифференциальное уравнение Колмогорова:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -P_0 \lambda_0 + P_1 \mu_1.$$

Теперь рассмотрим граф СМО с тремя состояниями, считая, что в момент  $t + \Delta t$  в системе находится  $n$  заявок (рис. 4).

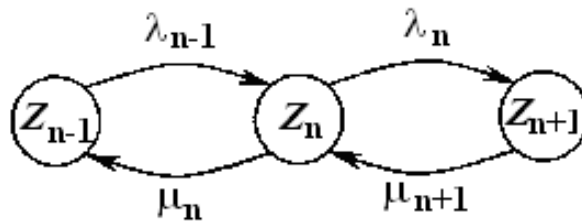


Рис. 4. Граф СМО с тремя состояниями

Перечислим возможные ситуации СМО:

1. Вероятность пребывания системы в состоянии  $z_0$  в момент  $t$ :  $P_n(t)$ .

Число заявок в системе не меняется и равно  $n$ .

2. Вероятность перехода системы из  $z_n$  в  $z_{n+1}$  при поступлении заявки за период  $\Delta t$ :  $-P_n(t) \cdot \lambda_n \Delta t$ .
3. Вероятность перехода системы из  $z_n$  в  $z_{n-1}$  при обслуживании заявки за время  $\Delta t$ :  $-P_n(t) \cdot \mu_n \Delta t$ .
4. Вероятность перехода системы из  $z_{n-1}$  в  $z_n$  при поступлении заявки за время  $\Delta t$ :  $P_{n-1}(t) \cdot \lambda_{n-1} \Delta t$ .
5. Вероятность перехода системы из  $z_{n+1}$  в  $z_n$  при обслуживании заявки за время  $\Delta t$ :  $P_{n+1}(t) \cdot \mu_{n+1} \Delta t$ .

Вероятность состояния системы, включающего все пять ситуаций, находим по теореме сложения вероятностей:

$$P_n(t + \Delta t) = P_n(t) - P_n(t) \cdot \lambda_n \Delta t - P_n(t) \cdot \mu_n \Delta t + P_{n-1}(t) \cdot \lambda_{n-1} \Delta t + P_{n+1}(t) \cdot \mu_{n+1} \Delta t.$$

Перенесем  $P_n(t)$  влево, разделим на  $\Delta t$  и, переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим второе дифференциальное уравнение Колмогорова:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -P_n(\lambda_n + \mu_n) + P_{n-1}\lambda_{n-1} + P_{n+1}\mu_{n+1}.$$

Решение этих уравнений производится численными методами на ЭВМ. Однако решение первого уравнения для СМО с двумя состояниями может быть выполнено с помощью формулы полной вероятности

$$P(A) = \sum_{i=1}^n p(B_i) p_{B_i}(A),$$

где  $P(A)$  – полная вероятность появления события  $A$ ;  $p(B_i)$  – безусловная вероятность;  $p_{B_i}(A)$  – условная вероятность.

Событие  $A$  может наступить лишь при появлении одного из несовместных событий  $B_i$ .

Приведем пример расчета вероятностей для минимального графа СМО с заданными числовыми характеристиками (рис. 5).

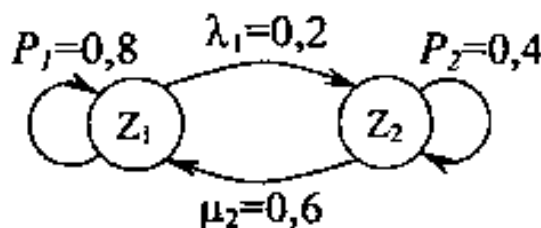


Рис. 5. Минимальный граф СМО с заданными числовыми характеристиками

Произвольно зададим распределение вероятностей на нулевом шаге  $n = 0$  (начальный момент):

$p_{n=0} = (1, 0)$ , т.е.  $p_{16} = 1$  и  $p_{26} = 0$  (это безусловные вероятности).

Для 1-го шага ( $n = 1$ ) находим:

$$p_{n=1}(z_1) = p_{16} \cdot p_{1y} + p_{26} \cdot \mu_2 = 1 \cdot 0,8 + 0 \cdot 0,6 = 0,8,$$

где  $p_{1y} = 0,8$  и  $\mu_2 = 0,6$  - условные вероятности ( $\mu_2$  увеличивает вероятность пребывания системы в состоянии  $z_1$ ),

$$p_{n=1}(z_2) = p_{26} \cdot p_{2y} + p_{16} \cdot \lambda_1 = 0 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,2 = 0,2.$$

Для 2-го шага ( $n = 2$ ) расчет ведем с учетом новых значений безусловных вероятностей  $p_{n=1}(0,8; 0,2)$ :

$$p_{n=2}(z_1) = 0,8 \cdot 0,8 + 0,2 \cdot 0,6 = 0,76,$$

$$p_{n=2}(z_2) = 0,2 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,2 = 0,24.$$

Уже при  $n = 5$  имеем:  $p_{n=5}(z_1) = 0,75008$  и  $p_{n=5}(z_2) = 0,24992$ .

При  $n \rightarrow \infty$  получим предельные значения вероятностей, характерные для установившегося состояния системы

$$p_n(z_1) = 0,75; \quad p_n(z_2) = 0,25.$$

Проведем проверку:  $p_1 + p_2 = 0,75 + 0,25 = 1$ .

Вероятности переходов независимы от начального состояния системы. Пусть начальное состояние будет:  $p_{n=0} = (0, 1)$ , т.е.  $p_{16} = 0$  и  $p_{26} = 1$ .

Тогда для  $n = 1$  имеем:

$$p_{n=1}(z_1) = 0 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,6 = 0,6;$$

$$p_{n=1}(z_2) = 1 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,2 = 0,4,$$

а для  $n = 2$ :

$$p_{n=2}(z_1) = 0,72, \quad p_{n=2}(z_2) = 0,28$$

и т.д. до  $p_1 = 0,74976$  и  $p_2 = 0,25024$ .

В установившемся режиме вероятности состояний системы не меняются  $p_n(t) = \text{const}$ , производная  $dp_n(t)/dt = 0$  и дифференциальные уравнения Колмогорова превращаются в алгебраические

$$p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1; \quad p_n(\lambda_n + \mu_n) = p_{n-1} \lambda_{n-1} + p_{n+1} \mu_{n+1}.$$

Последовательно задавая  $n = 1, 2, \dots$  во втором уравнении, получим систему

$$p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1; \quad p_1 \lambda_1 = p_2 \mu_2; \quad \dots \quad p_n \lambda_n = p_{n+1} \mu_{n+1}.$$

Например, при  $n = 1$  имеем

$$p_1(\lambda_1 + \mu_1) = p_0 \lambda_0 + p_2 \mu_2.$$

Подставляя в это уравнение  $p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1$ , получим  $p_1 \lambda_1 = p_2 \mu_2$ .

Из полученной системы найдем значения вероятностей

$$p_1 = p_0 \frac{\lambda_0}{\mu_1}; \quad p_2 = p_0 \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2}; \quad \dots \quad p_n = p_0 \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}.$$

При вычислении  $p_i$  необходимо дополнительно использовать условие

$$p_0 + p_i = 1, \quad \text{откуда} \quad p_i = 1 - p_0.$$

Используя полученные уравнения установившегося режима, вычислим предельные значения вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  СМО с двумя состояниями (см. рис. 5)

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{\lambda_1}{\mu_2} \quad \text{и} \quad p_1 = 1 - p_2.$$

Подставив  $p_1$  в первое уравнение, получим

$$p_2 = (1 - p_2) \frac{\lambda_1}{\mu_2}, \quad \text{откуда} \quad p_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2 + \lambda_1} = 1/4 = 0,25 \quad \text{и} \quad p_1 = 1 - 0,25 = 0,75.$$



Как видим, эти значения вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  совпадают со значениями, полученными с помощью формулы полной вероятности.

Таким образом, задавая входную ( $\lambda$ ) и выходную ( $\mu$ ) характеристики стационарной СМО с двумя состояниями, можно легко вычислять вероятности состояний системы, что важно при проектировании отказоустойчивых автоматизированных комплексов и линий.

### Вывод

Предложена методика расчета вероятностей состояний системы массового обслуживания, позволяющая установить оптимальную зависимость между числом каналов обслуживания и их производительностью, которая предполагает минимизацию затрат на каналы обслуживания и потерь, связанных с простоями технологического оборудования. Результаты моделирования используются для структурного и параметрического синтеза технической системы с оптимизацией ее по важнейшим параметрам: производительность, надежность, экономическая эффективность.

### Библиографический список

1. **Иванов, А.А.** Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 224 с.
2. **Саломатин, Н.А.** Имитационное моделирование в оперативном управлении производством / Н.А.Саломатин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
3. **Гмурман, В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1975. – 333 с.
4. **Зельдович, Я.Б.** Элементы прикладной математики / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1965. – 616 с.

*Дата поступления  
в редакцию 28.01.2013*

**A.A. Ivanov**

## OBJECT MODELING OF THE AUTOMATED PRODUCTION BASED ON THE THEORY OF MASS SERVICE

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

**Purpose:** Some optimal dependence between the number of some service channels and their productivity is established. It proposes as a result to minimize expenditures of labour and some losses connected with the technological equipment standing idle.

**Methodology:** There is some mathematical model of the mass service system (MSS) given as some oriented graph with some service procedure setpoints. Besides the intensity of orders and service is also taken into consideration. Meanwhile some assumption is adopted that Poisson flows are widely spread in MSS. It is important to know that the system functioning process is Markov random process. For example, for computing system state probabilities some basic equations of MSS are employed.

**Findings:** It is possible, for example to fulfil the base equation solution for MSS with two states with the help of the total probability formula. By analogy such equations for more complicated MSS can be solved with the help of numerical computation. As a result, if input and output characteristics of the stationary MSS are given it is possible to computerize some probabilities of its states rather quickly. It should be noted it is very important while designing fault-tolerant automated complexes and lines.

**Research limitations/implications:** The present study provides methodology of computerizing some probabilities of MSS states. Moreover, this methodology makes it possible to establish optimal dependence between the number of service channels and their productivity.

*Key words:* mass service system, system state probability, intensity of orders and service, queue discipline.

УДК 621.9

И.Л. Лаптев<sup>1</sup>, Д.А. Шатагин<sup>1</sup>, С. В. Серый<sup>2</sup>, Е.Н. Бурдасов<sup>2</sup>**ФРАКТАЛЬНЫЙ И ВЭЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет<sup>2</sup>

Разработана методика диагностики износа инструмента и устойчивости процесса резания на основе фрактального анализа виброакустического сигнала. Выявлена связь степени износа инструмента с величиной фрактальной размерности акустического сигнала при резании.

*Ключевые слова:* резание, износ инструмента, диагностика, фрактальная размерность.

Динамические процессы при резании существенно определяют износ режущего инструмента, точность и качество механообработки. Изнашивание инструмента, в свою очередь, инициирует рост амплитуды автоколебаний при резании [1–2].

В работе [1] изложен новый подход к моделированию динамических процессов при резании, на основе качественной теории дифференциальных уравнений и фрактального анализа. В результате предложена новая характеристика процесса резания, характеризующая ее динамическую устойчивость в контексте эволюции – фрактальная размерность. Теория фракталов, наряду с качественной теорией динамических систем, является основой нового направления в теории синергетики – нелинейной динамики.

**Моделирование и нелинейная динамика**

Наиболее распространенным способом моделирования уравнений, описывающих реальные динамические системы, ее эволюционное развитие, является так называемый «прямой подход», изложенный в работах [4, 5].

Применяя этот подход к моделированию динамических процессов или систем, разрабатывается обобщенная математическая модель. Затем составляются уравнения (обычно дифференциальные), определяющие взаимосвязь динамических характеристик исследуемого процесса. Учитывая параметры (физические, механические, термодинамические, структурные и т.д.) моделируемого процесса, определяются условия адекватности уравнений и налагаются соответствующие ограничения. Важно также максимально точно и подробно описать физику процесса при помощи системы уравнений, отразить все взаимосвязи множества динамических параметров, участвующих в процессе.

В результате этим способом моделирования получают математическую модель. Как показывает практика такого моделирования, предполагаемая модель получается громоздкой и мало удобной в практическом применении. При этом результат использования такой модели не обязательно точен в силу того, что приходится пренебрегать многими, малозначимыми на первый взгляд параметрами, или упрощать их описание, основываясь на собственной интуиции.

Дополнительные неточности возникают также потому, что абсолютно все величины, участвующие в динамическом процессе и влияющие на работу системы, учесть невозможно. В этом состоит главная проблема данного подхода к моделированию. Также дополнительные проблемы использования модели создает тот факт, что идентичные по начальным параметрам динамические процессы, запущенные на одинаковом оборудовании, на практике ведут себя по-разному. Это связано с тем, что в реальности не существует двух абсолютно одинаковых динамических систем, они различаются и эти небольшие различия приводят к разнице в поведении [4].

Кроме того, существует проблема практического применения таких моделей, так как их программная реализация зачастую сложна [4], что связано в основном с неинтегрируемо-

стью таких систем дифференциальных уравнений, входящих в модель. Последнее обстоятельство обусловило разработку Пуанкаре и Андроном [4] качественной теории дифференциальных уравнений.

Изучение эволюционного поведения системы при моделировании можно проводить вне зависимости от их физического содержания. Как уже отмечалось ранее, отличительные черты поведения таких систем – это свойства универсальности и самоподобия, наличие параметров порядка и их смена при самоорганизации системы, т.е. при образовании новых структур (неоднородностей), возникающих вследствие потери системой устойчивости в некоторых локальных областях. Дальнейшая эволюция системы в этих локальных областях, а также потеря устойчивости развиваются по бифуркационному сценарию, переход системы через динамический хаос ведет к возникновению неоднородности и самоорганизации ее отдельных частей.

Принципиальным для эволюции большинства динамических систем является наличие диссипативных процессов: вязкости, диффузии, теплопроводности (добавим, пластичности и накопления повреждений и разрушения). Они позволяют системам «забывать» начальные данные и независимо от их «деталей» формировать с течением времени одни и те же или похожие стационарные распределения изучаемых переменных. Но также именно наличие нелинейных диссипативных процессов обеспечивает, с одной стороны, нелинейные связи в системе, а с другой стороны, регулирует либо развитие в среде неустойчивостей, либо переход к устойчивому равновесному состоянию в зависимости от конкурирующего воздействия извне.

Согласно работам И. Пригожина [5], поток тепла или вещества в открытой системе, т.е. внешнее воздействие, заставляющее систему более интенсивно диссипировать подводимую энергию, «является связью в том смысле, что без него система бы эволюционировала к равновесию».

Одним из центральных вопросов нелинейной динамики является проблема параметров порядка [6]. Ответ на вопрос о том, какие именно переменные для исследуемой системы будут параметрами порядка и каков алгоритм их смены – важнейший этап при ее моделировании. Сценарий проникновения в хаос через последовательности бифуркаций определяется особыми свойствами нелинейных уравнений, что составляет другую важную отличительную черту нелинейной динамики.

Для выявления сути нелинейных явлений, а также и нелинейных уравнений бифуркационный сценарий приобретает фундаментальное значение. Сама возможность динамического хаоса, сценарии, по которому порядок переходит в хаос, выявили общие универсальные свойства сложных динамических систем и процессов. Конкретный вид перехода к хаосу не является принципиальным. Фундаментальное значение здесь имеет природа границ между областями притяжения – различными зонами притяжения аттракторов.

Центры этих зон притяжения – аттракторы – ведут борьбу за влияние на плоскости (любая начальная точка  $X_0$  в течение процесса либо приходит к тому или другому центру, либо «лежит» на границе области и не может принять определенное значение). С изменением управляющего параметра меняются как сами области притяжения, так и границы. В случае фрактальной структуры границ областей притяжения соответствующий аттрактор называется *странным*. Важно здесь иметь в виду, что в любой системе всегда идет борьба, своеобразная конкуренция, между равновесием и бифуркационным, хаотическим неустойчивым поведением. Следовательно, определяющие нелинейные уравнения должны быть записаны как эволюционные уравнения – в релаксационной форме.

Из изложенного ясно, что моделирование, воспроизводящее эволюцию систем по законам синергетики, т.е. нелинейной динамики, должно опираться на систему нелинейных уравнений, учитывающих диссипацию. Определяющие уравнения, записанные в релаксационной форме, должны ввести в рассмотрение конкурирующие процессы во временном аспекте.

В динамических системах различие пространственно-временных масштабов слишком велико. Достаточно сравнить характерные времена и масштабы микроскопических процессов, ограниченные временами порядка  $10^{-3} \div 10^{-7}$  с.

Характерные времена релаксации в станочной системе могут меняться уже на порядки и необходимое время расчетов эволюции системы катастрофически возрастает.

Эволюция системы во времени обеспечивается также взаимодействиями – положительными и отрицательными обратными связями – между макроскопическими переменными  $X_i$  и так называемыми управляющими параметрами  $\lambda$  [5], которые входят в эволюционные уравнения вида

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = F_i(\{X\}, \lambda). \quad (1)$$

Управляющие параметры в уравнении (1) связаны с «внешним миром». Другими словами, они существенно связаны с внешними воздействиями и ограничениями, т.е. обусловлены взаимодействиями системы с окружающей средой, например, определяются условиями нагружения, т.е. скоростью подвода энергии к системе. Частный вид такого эволюционного уравнения (1):

$$\frac{dX}{dt} = \lambda - KX. \quad (2)$$

Равновесие или стационарное состояние достигается при

$$\lambda - KX = 0. \quad (3)$$

Это динамическое равновесие обусловлено внешними воздействиями, с одной стороны, и способностью системы диссипировать подводимую к ней энергию, с другой.

Таким образом, прямой подход к моделированию обладает рядом существенных недостатков:

- не является универсальным,
- обладает узкими рамками применимости,
- сложностью учета всех динамических величин, участвующих в процессе,
- сложность практического применения,
- не учитывает индивидуальных особенностей моделируемой системы.

Эффективным альтернативным подходом к исследованию и моделированию нелинейных процессов является «обратный подход». Он основывается на применении методов и алгоритмов нелинейной динамики – науки, изучающей структуру и свойства эволюционных процессов в нелинейных динамических системах и обладающей развитым математическим аппаратом для исследования и анализа реальных динамических систем. При этом для моделирования динамических процессов не обязательно знать внутреннюю структуру исследуемого объекта, достаточно иметь наблюдаемую реализацию какого-либо сигнала, в котором заложена динамика процесса, например, виброакустической эмиссии [1].

В настоящей работе исследовалась динамика станочной системы на основе результатов, полученных при снятии сигнала виброакустической (ВА) эмиссии со станка в процессе резания инструментом, имеющим различную степень износа. При исследовании динамики процесса резания на основе «обратного подхода» были применены следующие виды анализа сигналов ВА: фрактальный, вэйвлет-анализ и классический спектральный анализ сигналов.

### **Применение фрактального анализа при механообработке**

Фрактальный анализ в последнее время является достаточно распространенным видом анализа при решении подобного класса задач, применение этого вида анализа подробно изложено в [1].

### **Применение вейвлет-анализа при механообработке**

Одна из главных идей представления сигналов на различных уровнях разложения (декомпозиции) заключается в разделении функции приближения к сигналу на две группы: аппроксимирующую – грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменения, и детализирующую – с локальной и быстрой динамикой изменения на фоне плавной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. *Новое направление цифровой обработки сигналов – вэйвлет-анализ, делает это возможным как во временной, так и в частотной областях представления сигналов в режиме реального времени.*

Рассмотрим преимущества вэйвлет-анализа на примере классического подхода к анализу сигналов – расчет амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) на основе разложения на ряды Фурье.

Преобразование Фурье является классическим методом частотного анализа сигналов, суть которого возможно выразить формулой:

$$C(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (4)$$

Преобразование Фурье представляет сигнал, заданный во временной области, в виде разложения по ортогональным базисным функциям (синусам и косинусам), выделяя таким образом частотные компоненты, результат преобразования Фурье – амплитудно-частотный спектр по которому можно определить присутствие некоторой частоты в исследуемом сигнале. Недостаток преобразования Фурье заключается в том, что частотные компоненты не могут быть локализованы во времени, что накладывает ограничения на применимость данного метода к ряду задач (например, в случае изучения динамики изменения частотных параметров сигнала на временном интервале).

В случае, когда не ставится вопрос о локализации временного положения частот, метод Фурье дает хорошие результаты. Но при необходимости определить временной интервал присутствия частоты приходится применять другие методы.

Вэйвлет-анализ [7–9] не обладает подобного рода недостатками – здесь можно локализовать любую частоту в любой момент времени. Поэтому, в настоящее время вэйвлет-анализ является доминирующим подходом к исследованию нестационарных сигналов такого типа, в режиме реального времени.

Основная область применения вэйвлет-преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результат анализа должен содержать не только общую частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения об определенных локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих сигнала.

Идея применения вэйвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа. Сигнал анализируется путем разложения по этим функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов. Такая базисная функция называется *вэйвлетом* [8].

Сверка сигнала с вэйвлет-функцией позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этого вэйвлета, причем, чем больший масштаб имеет вэйвлет, тем более широкая область будет оказывать влияние на результат свертки. Вэйвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах.

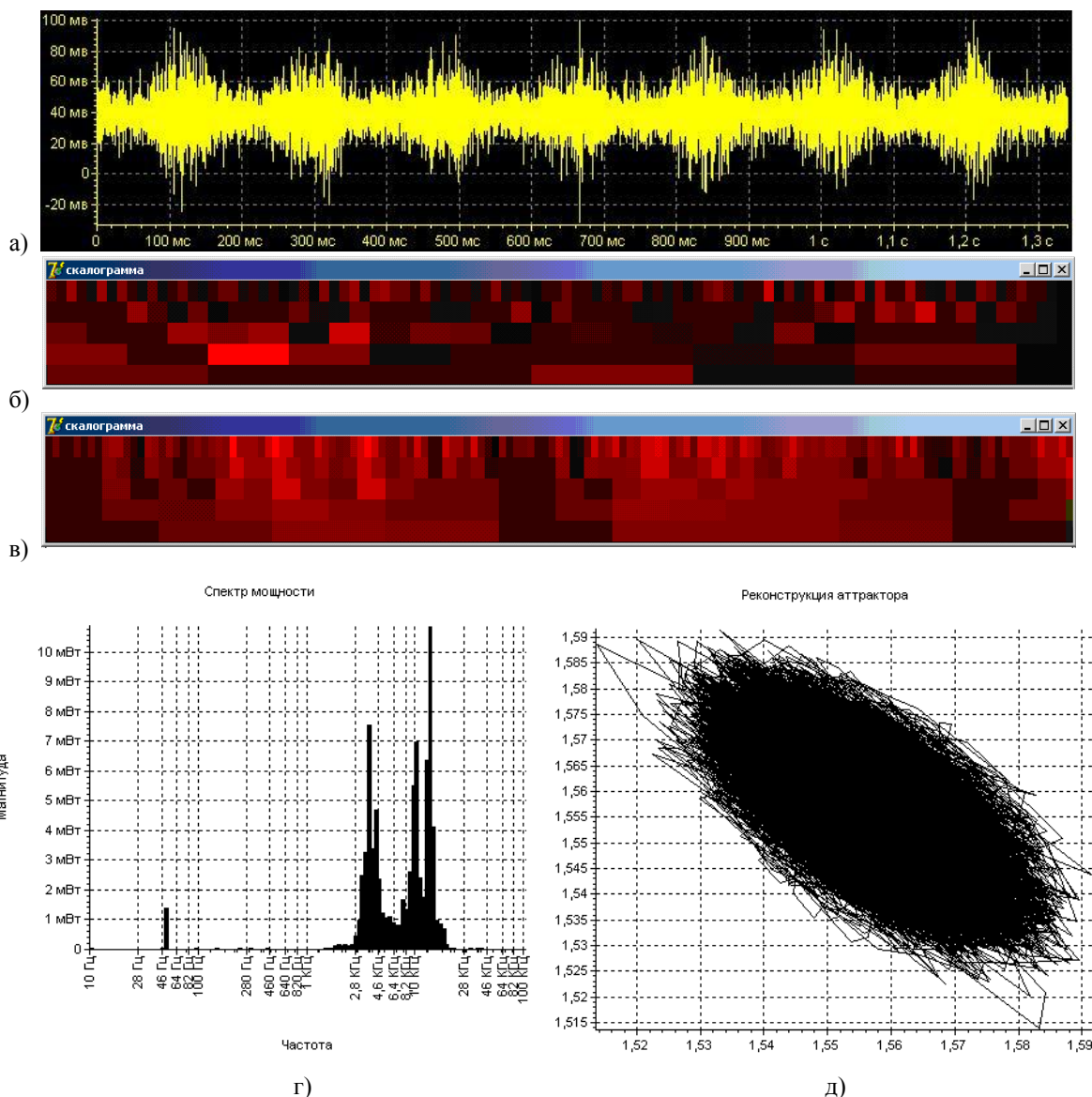
По сравнению с разложением сигнала на ряды Фурье, вэйвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов первого рода (скачков). Благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов вэйвлет-преобразование стало мощной альтернативой преобразованию Фурье.

Различают дискретный и непрерывный вэйвлет-анализ, аппарат которого можно применять как для непрерывных, так и для дискретных сигналов.

Очевидно, идея использовать вэйвлет-преобразование для обработки дискретных данных является весьма привлекательной (дискретизация данных необходима, например, при обработке на ЭВМ).

Как известно [8], алгоритм вэйвлет-преобразования имеет фрактальный характер. Идея применения вэйвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису (вэйвлет), образованному сдвигами и разномасштабными

ми копиями функции-прототипа на основе его подобия с анализируемым участком сигнала – то есть вэйвлет-преобразование по своей сути является фрактальным.



**Рис. 1. Данные при параметрах: Сталь45, T15K6,  $D=93.5$ ,  $s=0.11$ ,  $t=0.75$ ,  $n=315$ ,  $h_z=0$ мм:**  
 а – осциллограмма; б - вэйвлет-скалограмма; в - фрактальная скалограмма;  
 г – спектр сигнала; д - аттрактор

Алгоритм фрактального анализа ВА сигнала аналогичен алгоритму поиска коэффициентов вэйвлет-преобразований за исключением того, что в качестве базиса берется не заведомо известная функция (вэйвлет), а участок временного ряда, над которым в процессе работы алгоритма производятся те же самые операции, что и над вэйвлет-функцией – масштабирование, параллельный перенос и т.д.

Общий алгоритм фрактального анализа сигнала:

- берется произвольный участок исходных данных;
- к этому участку применяется некоторое преобразование (обычно это аффинные преобразования – сдвиг, сжатие, растяжение);
- далее, измененным участком покрывается весь временной ряд;
- в каждой точке временного ряда ищутся коэффициенты подобия исходного участка – текущему (обычно по методу наименьших квадратов);

- далее за исходный участок берется следующая часть временного ряда, и алгоритм повторяется с первого пункта;
- в итоге исследователь получает набор коэффициентов подобия и видит тем самым распределение степени подобия (его фрактальных свойств) по временному ряду в каждой его точке.

Следует указать, что алгоритмы фрактального и вэйвлет-анализа успешно используются также для сжатия данных, так как коэффициенты фрактальных- и вэйвлет-преобразований занимают на несколько порядков меньший размер, чем исходные данные.

Как показали исследования, при нулевом износе режущего инструмента ( $h_z=0$ ) путем применения фрактального и вэйвлет-анализа (рис. 1) было выявлено, что на скалограммах (рис. 1, б, в) компоненты на всем спектре частот ярко выделены, хорошо прослеживается периодичность сигнала, что соответствует визуальной картине колебаний на осциллограмме. Мощность сигнала распределена по средней части спектра частот.

При незначительном износе  $h_z=0.15\text{мм}$  происходит смещение спектра доминирующих частот в сторону более высокочастотных компонент (рис. 2). Визуальная картина на скалограммах в области низких частот получается более размытой, чем при нулевом износе.

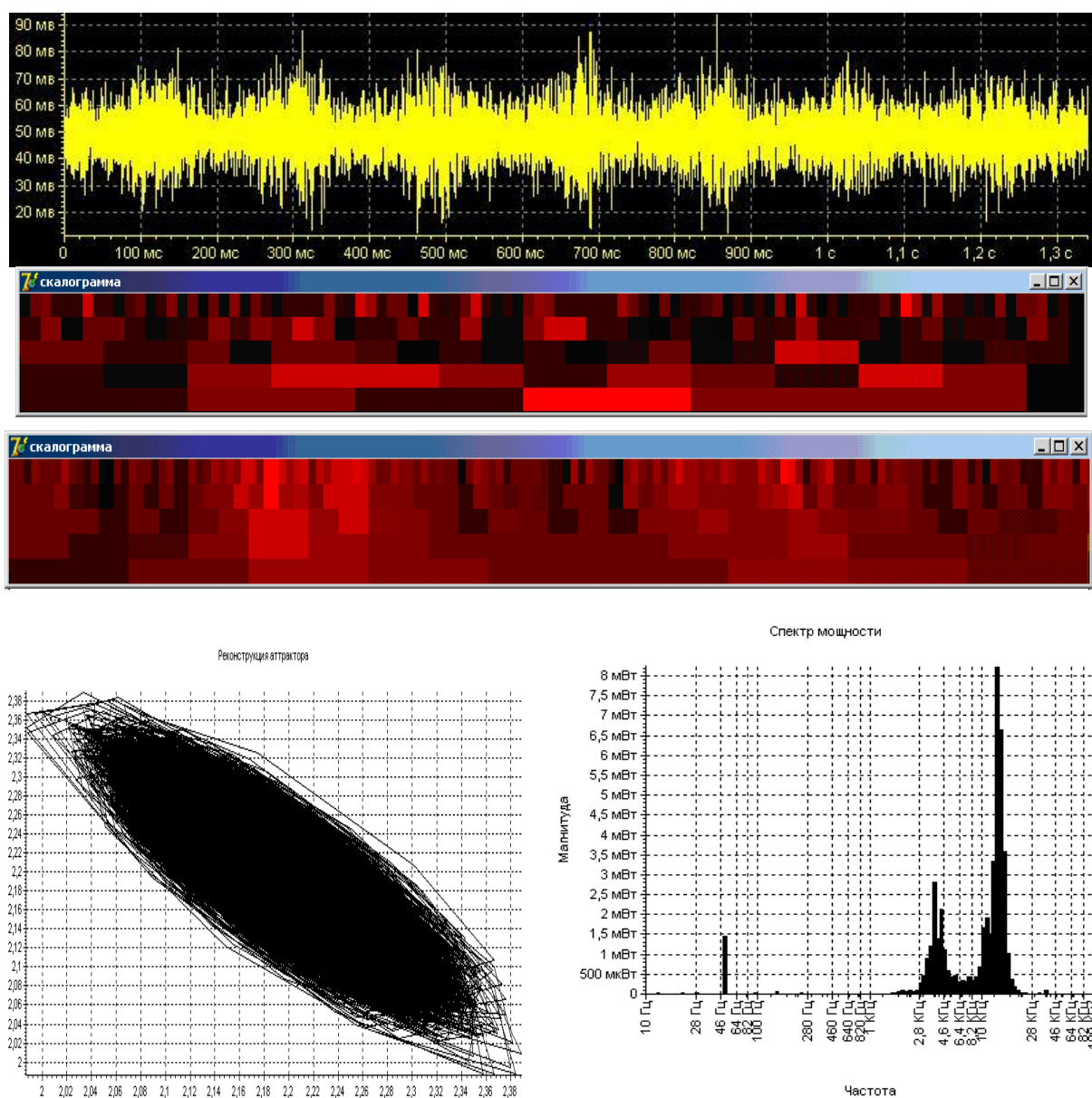


Рис. 2. Данные при параметрах: Сталь45, T15K6,  $D=92.0$ ,  $s=0.11$ ,  $t=0.75$ ,  $n=315$ ,  $h_z=0.15\text{мм}$



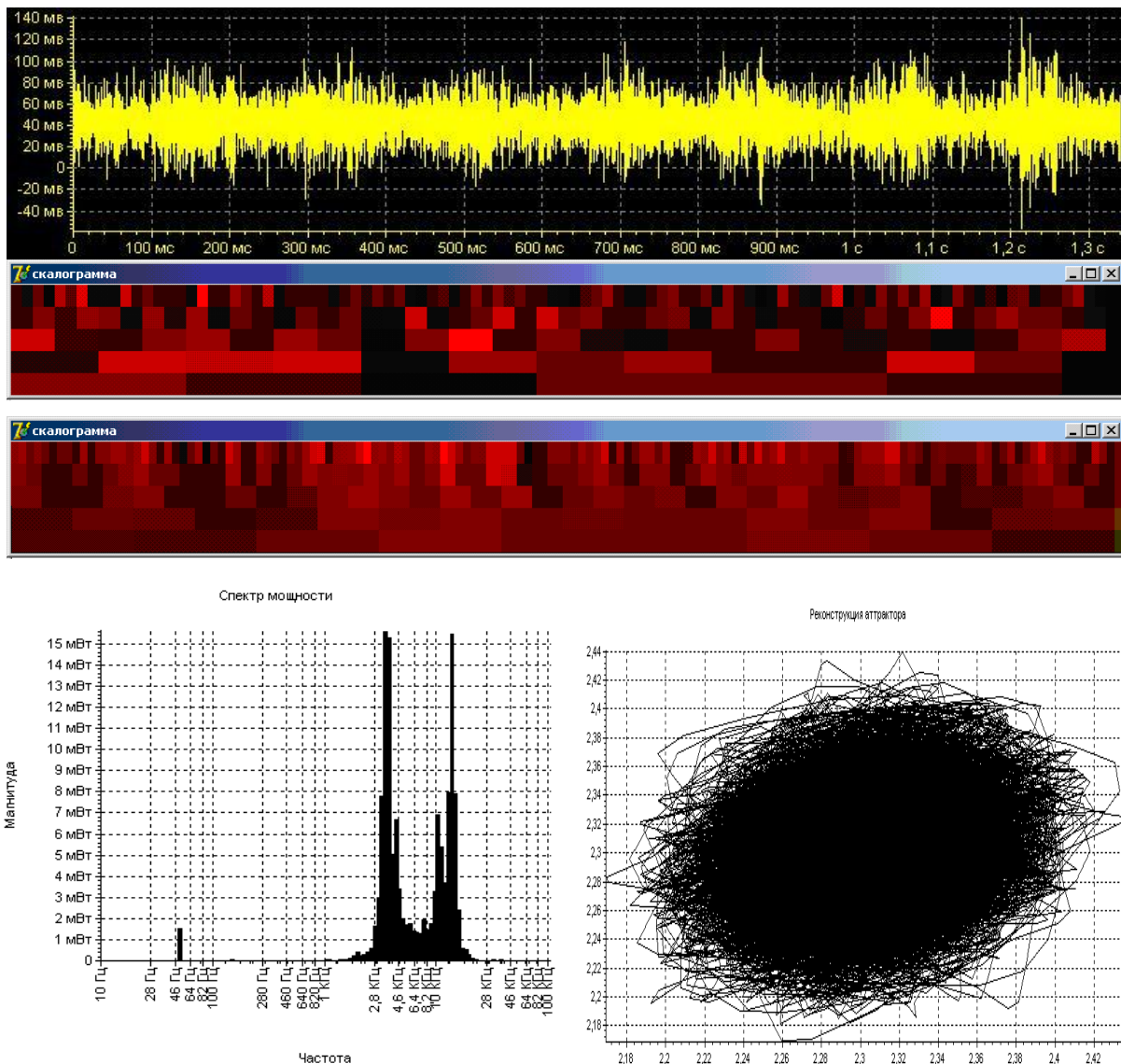


Рис. 3. Данные при параметрах: Сталь45, T15K6,  $D=92.0$ ,  $s=0.11$ ,  $t=0.75$ ,  $n=315$ ,  $h_z=0.5$ мм

С увеличением износа до  $h_z=0.5$ мм наблюдается та же самая закономерность, выделяются все более высокие частоты, которые характеризуют шумовые составляющие при заданной степени износа (рис. 3). Особенно хорошо это заметно на вэйвлет-скалограмме. При катастрофическом износе  $h_z=1.1$ мм, картина получается еще более размытой, практически вся мощность сигнала приходится на высокие частоты, доминируют шумовые высокочастотные компоненты (рис. 4), информация в сигнале, характеризующая сам процесс резания слабо выражена.

При повышении степени износа инструмента происходит потеря полезных свойств сигнала, а именно – искажение и утрата информации о динамике процесса механообработки, за счет увеличения влияния на сигнал шумовых компонент.

С увеличением износа инструмента меняется энергетика сигнала – при параметрах износа, близких к катастрофическому, основная мощность сигнала приходится на высокочастотные шумовые компоненты, что свидетельствует об отсутствии процесса резания как такового, а поступающая от резца энергия затрачивается на поверхностное упрочнение заготовки и нагрев. Внешний вид аттрактора не меняется, однако с ростом износа увеличивается масштаб аттрактора динамической системы резания.

Исследования показывают, что при увеличении износа инструмента компоненты сиг-



нала (2,5-3,5 кГц), характеризующие процесс резания, принимают более сглаженный характер, но при этом появляются высокочастотные всплески (это особенно хорошо заметно на фрактальной скалограмме), что свидетельствует о повышении уровня зашумленности. В тоже время на вейвлет-скалограмме видно, что при увеличении износа инструмента спектр частот, характеризующих резание, расширяется, мощность его увеличивается. Расширение спектра говорит о повышении энергии виброакустического сигнала и соответственно об увеличении энергии разрушения и дальнейшем увеличении степени износа. При этом значение доминирующей частоты не меняется и составляет 2,8-3,2 кГц, но существенно меняется ее мощность (рис. 5). Для подтверждения изложенных выводов был проведен анализ фрактальной размерности на различных стадиях износа режущего инструмента. Как известно, фрактальная размерность показывает хаотичность состояния системы, т.е. уровень её нестабильности [1].

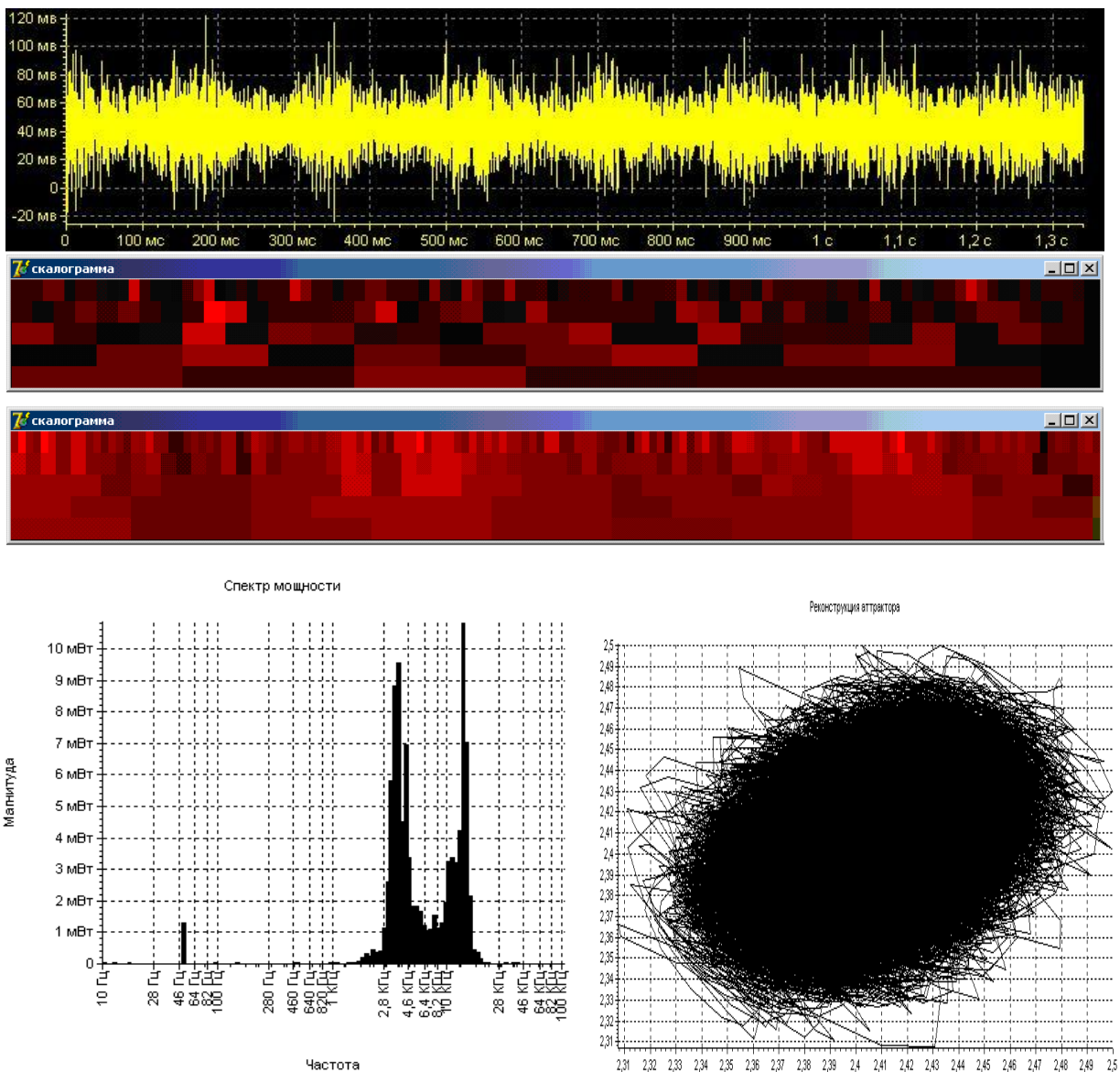


Рис. 4. Данные при параметрах: Сталь45, Т15К6,  $D=92.0$ ,  $s=0.11$ ,  $t=0.75$ ,  $n=315$ ,  $h_z=1.1$  мм

Как видно из приведенного графика, с увеличением износа инструмента происходит увеличение действительного значения фрактальной размерности. С увеличением износа инструмента хаотичность динамики процессарезания также увеличивается, прослеживается корреляция между этими характеристиками. Устойчивое движение системы резания

обусловлено самоорганизацией процессов пластической деформации в приконтактных слоях стружки.

На практике приведенные результаты предполагается использовать путем разработки диагностической методики, основанной на текущей оценке степени износа на базе фрактального и вэйвлет-анализа, осуществляя тем самым надежный автоматический контроль за состоянием инструмента и динамических процессов в системе резания при металлообработке. Необходимость такой оценки обусловлена большим влиянием износа режущего инструмента на состояние динамической системы станка и его параметрической надежности, вплоть до его отказа.

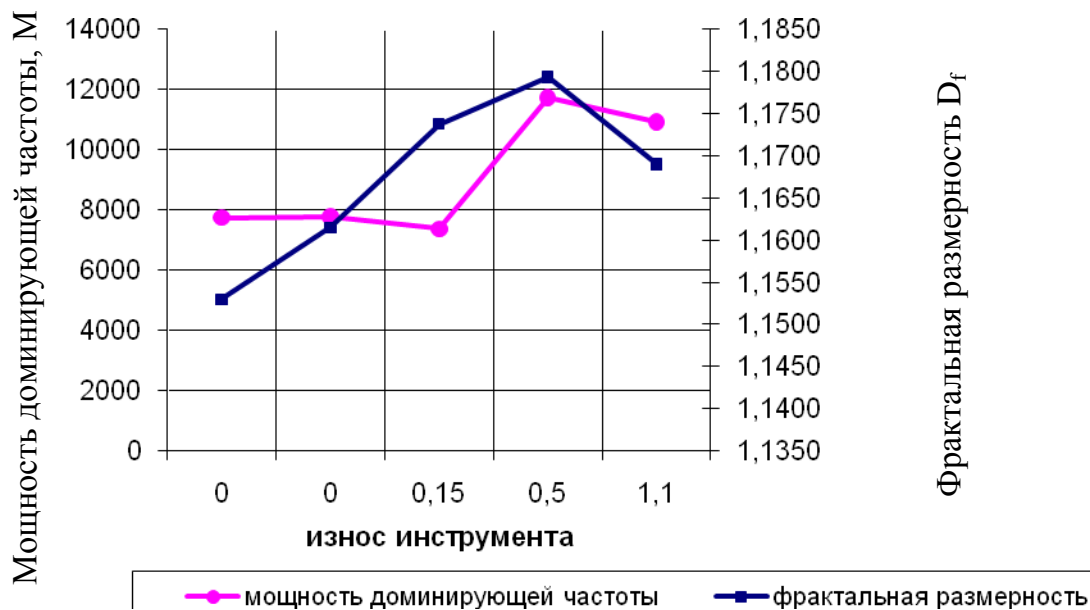


Рис. 5. Изменение фрактальной размерности и мощности доминирующей частоты в сигнале в зависимости от степени износа

#### Библиографический список

1. Кабалдин, Ю.Г. Управление динамическим качеством металлорежущих систем на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет", 2004. – 240 с.
2. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
4. Заковоротный, В.Л. Динамика процесса резания. Состояние и перспективы // Научный Вестник ДГТУ, 2005. Т. 5. №3. С. 329–356.
5. Неймарк, Ю.И. Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда. – М.: Наука, 1987. – 424 с.
6. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И.Р. Пригожин. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
7. Хакен, Г. Синергетика: [пер. с англ.] / Г. Хакен. – Мир 1980. – 410 с.
8. Воробьев, В.И. Теория и практика вэйвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – СПб.: ВУС, 1999. – 208 с.
9. Давыдов, А.В. Вэйвлетные преобразования сигналов: тематические лекции / А.В. Давыдов. – Екатеринбург: УГГУ, ИГиГ, ГИН, Фонд электронных документов, 2004.

10. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам: [пер. с англ. Е. В. Мищенко] / И. Добеши; под ред. А.П.Петухова. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 463 с.
11. Кудинов, В.А. Автоколебания при низких и высоких частотах (устойчивость движений) при резании // СТИН. 1997. № 2. С. 16-22.

*Дата поступления  
в редакцию 28.01.2013*

**I.L. Laptev<sup>1</sup>, D.A. Shatagin<sup>1</sup>, S.V. Sery<sup>2</sup>, E.N. Burdasov<sup>2</sup>**

**FRACTAL AND WAVELET ANALYSIS IN THE DIAGNOSIS OF DYNAMICS  
OF THE PROCESS OF CUTTING AND TOOL WEAR**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Komsomolsk-on-Amur state technical university<sup>2</sup>

**Objective:** To develop diagnostic techniques for tool wear and stability of the cutting process. Dynamic processes of cutting significantly determine the wear of cutting tools, precision and quality machining. Wear of the tool, in turn, initiates the growth of the amplitude oscillations of cutting. Therefore, at this time, wavelet analysis is the dominant approach to the study of non-stationary signals of the type in real time.

**The methodology of the work:** estimate of the fractal dimension of the acoustic signal during cutting.

**The results:** the technique of diagnostic tool wear when cutting on the fractal dimension of the acoustic signal during cutting. The technique of diagnostic tools and wear resistance of the cutting process on the basis of the fractal analysis of the vibroacoustic signal. The relation of the degree of wear of the tool with the value of the fractal dimension of the acoustic signal during cutting. Fractal dimension determines the degree of self-organization of the dynamical system of cutting. Another characteristic that shows the extent of self-organization is the information entropy -  $S_u$ . Using the wavelet analysis allowed to determine these characteristics in real time, ie, in the evolution of the system.

**Conclusions:** The technique of diagnostic tools and wear resistance of the cutting process.

*Key words:* cutting, tool wear, the diagnosis, the fractal dimension.

УДК 621.09

Ю.Г. Кабалдин<sup>1</sup>, С.В. Серый<sup>2</sup>, О.В. Кретинин<sup>1</sup>, Д.В. Шатагин<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,<sup>1</sup>  
Комсомольский-на Амуре государственный технический университет<sup>2</sup>

Разработана методология целенаправленного формирования наноструктурных нитридных покрытий для режущего инструмента путём квантово-механических расчётов. Заданный состав покрытия моделируется путём построения многокомпонентных фазовых диаграмм с использованием алгоритмов молекулярной динамики, выявления устойчивых нитридных соединений, при заданной температуре осаждения покрытия, с оценкой прочности в них межзатомной связи.

*Ключевые слова:* режущий инструмент, наноструктурные нитридные покрытия, квантово-механические расчёты.

Нанесение покрытий обеспечивает прочность режущей части инструмента, эффективный теплоотвод из зоны резания, низкую адгезию с обрабатываемым материалом, демпфирование и уменьшение вибрационных явлений [1, 2], причём нитридные покрытия показывают большую эффективность, чем карбидные.

В настоящее время ведущие производители режущего инструмента до 90-95 % инструмента из твердого сплава и до 60% из быстрорежущей стали выпускают с многослойными покрытиями. При производстве инструмента всё шире используют композиционные наноструктурированные покрытия. В частности, компания SandvikCoromant, которая одна из первых в мире освоила серийный выпуск сменных режущих пластин с покрытием TiC (серия GC, метод нанесения CVD) и в настоящее время является одним из мировых лидеров производства пластин из твердых сплавов с покрытием, разработала композиционно-многослойное покрытие TiC-TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN, в котором слой TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> состоит из нескольких субслоёв наноразмерной толщины с нанокристаллическими зёрнами. Эти пластины имеют стойкость до 2...2,5 раз выше стойкости пластин со стандартным многослойным покрытием. Ведущие разработчики покрытий для режущего инструмента, получаемых методами физического осаждения (Balzers, Cemicon, Metaplas, Leybold, Platit, Seco и др.), также разработали гамму наноструктурированных покрытий для нанесения на режущие инструменты.

Приведенные в качестве примеров исследования, показывают, что разработка покрытий проводится только эмпирическим путем. Существует также программное обеспечение по расчету распределения напряжений и температур в покрытиях методами конечных элементов. Но эти методы при малых толщинах покрытий - работают недостоверно. Однако наибольшие преимущества при обработке резанием обеспечивают именно наноструктурированные покрытия. Считается, что ультрадисперсные материалы с увеличенной площадью межзеренных границ имеют более сбалансированное соотношение между «твёрдостью», оказывающей определяющее положительное влияние на износостойкость и прочностные характеристики материала, в том числе и в условиях действия циклических термомеханических напряжений. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зёрен свыше  $d > 1$  мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В материалах с размерами зёрен менее  $d < 80...100$  нм проявляется иной механизм разрушения. Для подбо-

ных материалов преобладающей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах. Это сильно трансформирует межзеренное взаимодействие, приводя к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зерен. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за полного торможения на границах зерен, а сами границы начинают выполнять решающую роль в деформировании и разрушении материала, что позволяет создавать уникальные свойства нанокристаллических материалов, а при размерах зерен  $d < 5...10$  нм и прогнозировать формирование субатомных нанокристаллических структур и соответствующее направленное изменение свойств материалов. *Однако как в карбидных, так и в нитридных покрытиях дислокационная структура и её роль в процессах разрушения не изучена.*

С учетом обеспечения высокой прочности адгезии между покрытием и подложкой, а также химической пассивности материала покрытия по отношению к обрабатываемому материалу, важно уметь прогнозировать высокую стойкость режущего инструмента с многослойными наноструктурированными покрытиями при любых механизмах его разрушения и изнашивания (пластическое, хрупкое, абразивное, адгезионно-усталостное, химико-окислительное, диффузионное, и т.д.). Таким образом, для покрытий, предназначенных для нанесения на режущий инструмент, чрезвычайно важен не только состав, структура, кристаллохимические и физико-механические свойства, но и длительность работы покрытий на контактных площадках инструмента до момента их разрушения (долговечность) в процессе эксплуатации инструмента. Интенсивность микро- (изнашивание) и макроразрушения сильно зависит от твердости покрытия, соответствующего соотношения между вязкостью и твердостью, прочности адгезии между слоями, покрытием и субстратом в целом. Следует отметить, что для многослойно-композиционных нанопокровтий межзеренные и межфазные границы являются зоной интенсивной диссипации энергии и отклонения трещин от направления движения, частичного или полного их торможения, что ведет к упрочнению материала. Кроме того, межзеренные границы, вносящие вклад в формирование размеров зерен и текстуру материала, могут эффективно упрочнять покрытие. Поэтому покрытия с наноразмерной структурой и многослойной конструкцией имеют существенно более длительный срок работы до разрушения.

Как отмечалось ранее, разработка и исследование многослойных покрытий усложняется вследствие малого размера зёрен покрытий, их многослойности и реализуется в основном экспериментальным путём. *Новым подходом к решению проблемы является математическое моделирование на основе квантово-механических расчётов такого инструмента с последующим изучением режущих свойств на полученных моделях.* Применение нового подхода позволяет сократить затраты на разработку механообрабатывающего инструмента в десятки раз. Полученные результаты будут использованы для разработки и дальнейшего производства современного наноструктурированного инструмента с осажденными на подложку в несколько слоев покрытиями, структура которого предварительно рассчитана под заданные задачи механообработки.

Основой для их разработки являются квантово-механические расчеты [1, 2], выполняемые на основе теории функционала электронной плотности (ТФП). Это позволило наметить целенаправленный подход к совершенствованию составов покрытий. Квантово-механические расчеты наноструктурных частиц из TiN, TiC показали, что частицы 5, 10, 15 нм обладают более высокими значениями модуля упругости, уровня Ферми и другими характеристиками по сравнению с массивными, что способствует повышению износостойкости наноструктурных покрытий. Разработаны также технологии формирования наноструктурного состояния как в нижних, так и в верхних слоях покрытия.

Нитрид титана TiN был одним из первых видов износостойких покрытий для режущего инструмента. Структура массивного нитрида титана и других тугоплавких соединений хорошо известна. Нами разработаны пространственные (сферические) конфигурации частиц TiN. Рассчитывалось распределение плотности электронных состояний (ПЭС), а также их модуль упругости.

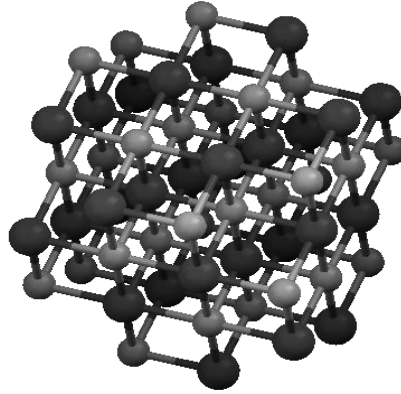


Рис. 1. Пространственная конфигурация наночастицы TiN 5нм

Все построенные плотности электронных состояний выглядят похожими на ПЭС массивного TiN, имеющего уровень Ферми около 2 эВ. Можно предположить, что природа такого сходства лежит в сходстве типа связей атомов Ti и N в наночастицах со сферической формой и с таким же типом связей, как и в объемном TiN.

На рис. 2 показана ПЭС наночастицы TiN размером 5 нм при моделировании. В табл. 1 приведены значения уровня Ферми как наночастиц, так и объемного TiN, а также сложного нитрида Ti<sub>3</sub>AlN. Как видно из табл. 1, уровень Ферми в наночастицах с увеличением числа пар атомов титана и азота вначале возрастает, но затем интенсивность его роста (при размере более 15 нм) снижается, однако оставаясь значительно выше, чем в массивном нитриде титана.

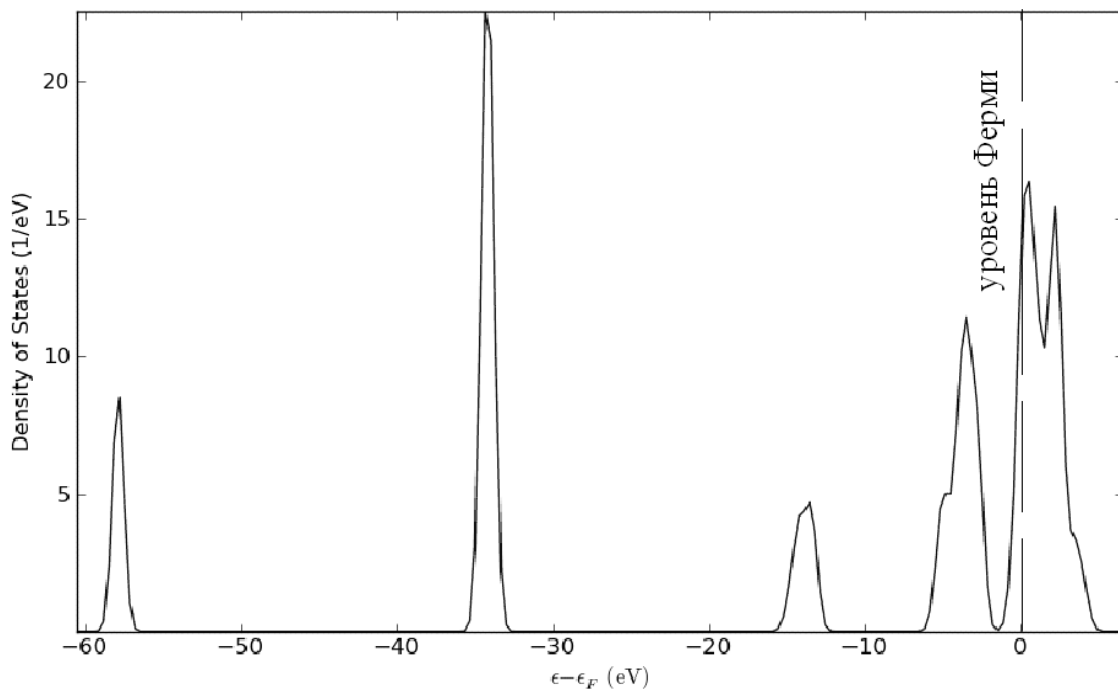


Рис. 2. Плотность электронных состояний наночастицы TiN 5нм

Таблица 1

Уровни Ферми наночастиц и объемного нитрида титана.

Наночастица	Размер частицы 3 нм	Размер частицы 5 нм	Размер частицы 7 нм	Ti3AlN-сложный нитрид	TiN объемный
Уровень Ферми ( $E_0$ ), эВ	4	10	16	21	2

Модуль упругости, рассчитанный для одной из наночастиц TiN-5нм, составил 620 ГПа, что выше, чем у объемного TiN. Таким образом, нами впервые проведены расчёты наночастиц тугоплавких соединений и показано их преимущество по сравнению с объёмным нитридом титана, использующегося в качестве износостойкого покрытия. Проведенные расчеты атомных и механических характеристик показали преимущество наночастиц по сравнению с объемным нитридом титана. В этой связи, важным моментом в дальнейшем явилось исследование механизмов реализации наноструктурного состояния в покрытиях, предназначенных для широкого круга режущего инструмента [1, 2].

Установлено, что методы формирования частиц в плазме открывают возможность получать потоки частиц с размерами менее 5 нм, с узким спектром распределения частиц по размерам. Дисперсность верхнего слоя покрытия, на который осаждается последующий атомный слой, зависит от его толщины. Кроме того, как видно из табл. 1, размер наночастиц влияет на такой квантовый параметр, как сверхпроводимость. Были построены зависимости уровня Ферми тугоплавких соединений от  $T_c$  температуры сверхпроводимости различных видов тугоплавких соединений [3], использующихся в качестве покрытий, в частности, карбидов и нитридов по справочным данным, которые обладают большим разбросом, так как выполнены в разных условиях. Тем не менее выявлено, что карбиды переходных металлов обладают более низкими значениями  $T_c$  температуры сверхпроводимости, чем бинарные нитриды.

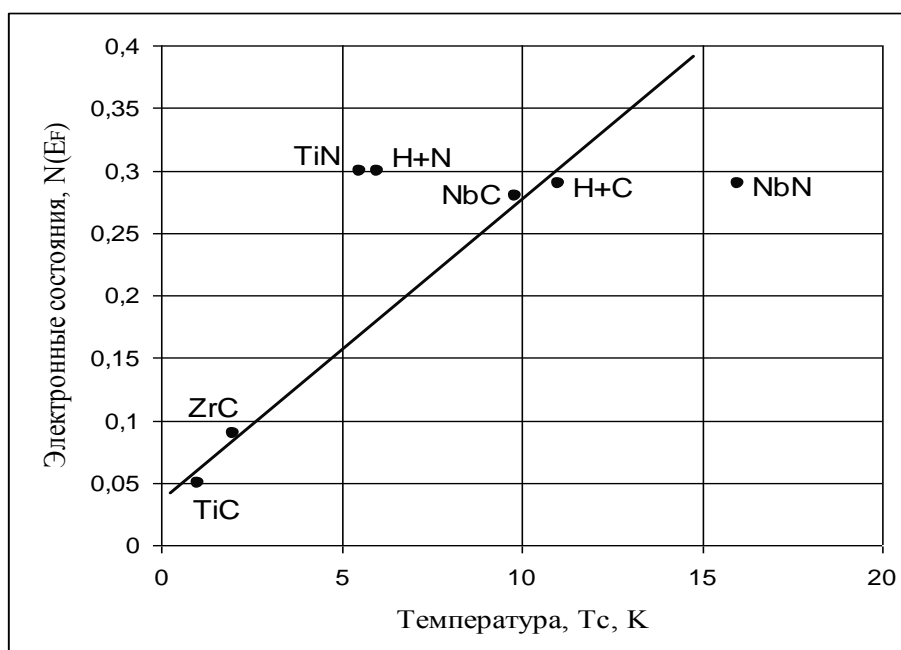


Рис. 3. Зависимость уровня поверхности Ферми тугоплавких соединений от температуры сверхпроводимости –  $T_c$ , К

Наибольшее значение температуры сверхпроводимости имеют нитриды ниобия (рис. 3). По-видимому, температуру сверхпроводимости можно увеличивать за счёт сложных

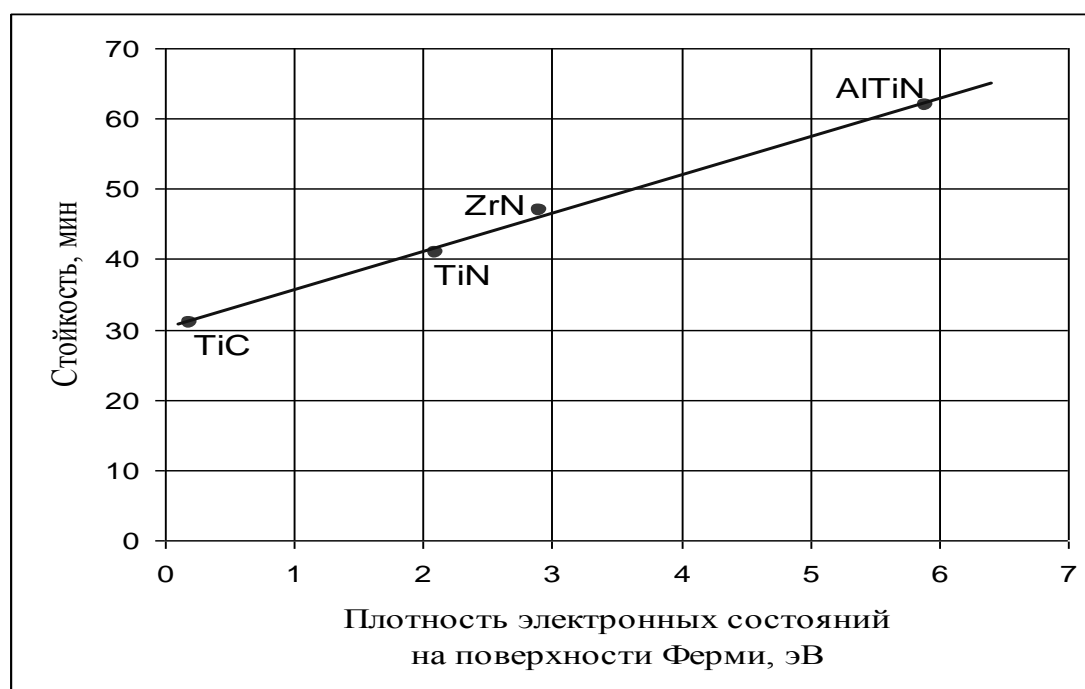
многоэлементных соединений (см., например, табл. 1). При этом, как будет показано далее, растёт и устойчивость соединений, содержащих Mo, Nb, Hf и Ta, за счёт увеличения прочности межатомной связи.

На рис. 4 приведена зависимость стойкости инструмента с покрытием толщиной 5 мкм, осаждённых ионно-плазменным напылением от температуры сверхпроводимости тугоплавких соединений, используемых в качестве покрытий.

Как видно из рис. 4, чем выше температура сверхпроводимости, тем выше стойкость инструмента. В этой связи можно констатировать, что нитридные покрытия более перспективны, чем карбидные. На рис. 5 приведена микрофотография структуры покрытия (AlTi)N, выполненная на атомном силовом микроскопе (АСМ). Анализ результатов расчёта показывает, что размеры зёрен менее 100 нм.

Энергия Ферми  $E_F$  – максимальное значение энергии, которое может иметь электрон при температуре абсолютного нуля. Энергия Ферми совпадает со значениями химического потенциала газа фермионов при  $T = 0$  К, т.е. уровень Ферми для электронов играет роль уровня химического потенциала для незаряженных частиц.

Соответствующий ей потенциал  $\mu = eE_F$  называют *электрохимическим потенциалом*. Таким образом, уровнем Ферми или энергией Ферми в металлах является энергия, которую может видеть электрон при температуре абсолютного нуля. Положение уровня Ферми является одной из основных характеристик состояния электронов (электронного газа) в твердом теле. В квантовой теории вероятность заполнения энергетического состояния электронами определяется функцией Ферми.



**Рис. 4. Зависимость  $T$  стойкости инструмента от плотности электронных состояний на поверхности Ферми**

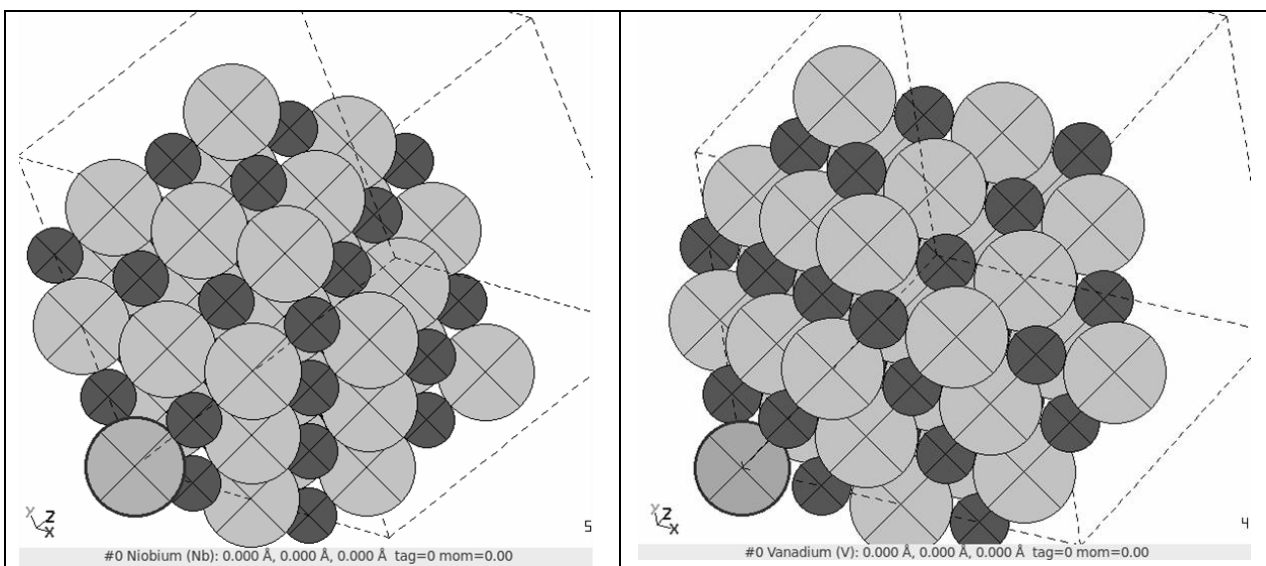
Известно, что кубические нитриды ванадия, ниобия и тантала также являются сверхпроводниками с довольно высоким значением  $T_c$ , что объясняется для них высокой плотностью состояний на уровне Ферми и довольно большим значением константы электрон-фононного взаимодействия и, возможно, размягчением фононных мод вследствие наличия плоскопараллельных участков поверхности Ферми (нестинга).

Увеличение числа валентных электронов, т.е. переход к нитридам  $Me^{VI}N$  ( $Me=Cr, Mo, Nb$ ) приводит, при условии сохранения типа кристаллической структуры, к сдвигу уровня



Ферми в область еще более высоких плотностей состояний, что может повлечь за собой дальнейшее повышение  $T_c$ . Анализ табл. 1 позволяет сделать важный вывод, что наноструктурный размер зёрен также повышает  $T_c$  температуру сверхпроводимости тугоплавких соединений.

Отличительной особенностью кубических карбидов, нитридов и оксидов переходных металлов IV и V групп является образование ими многокомпонентных твердых растворов путем взаимного замещения атомов металлов, или неметаллов, или тех и других сразу. В таких трех- или четырехкомпонентных системах возможны разнообразные фазовые равновесия - неограниченная взаимная растворимость или ограниченная растворимость с эвтектикой, образование тройных соединений, твердофазный распад, упорядочение. Возможно также образование метастабильных фаз. Однако сведения о фазовых равновесиях, как правило, имеются только для высокотемпературной (более 1500-1800 К) области. Информация о низкотемпературных (при  $T < 1300$  К) равновесиях отсутствует, хотя именно при низкой температуре возможны такие явления, как упорядочение, распад, сегрегация.



а)

б)

Рис. 5. Расчётная схема введение атома примеси ниобия (а) и ванадия (б) в суперячейку массива нитрида титана

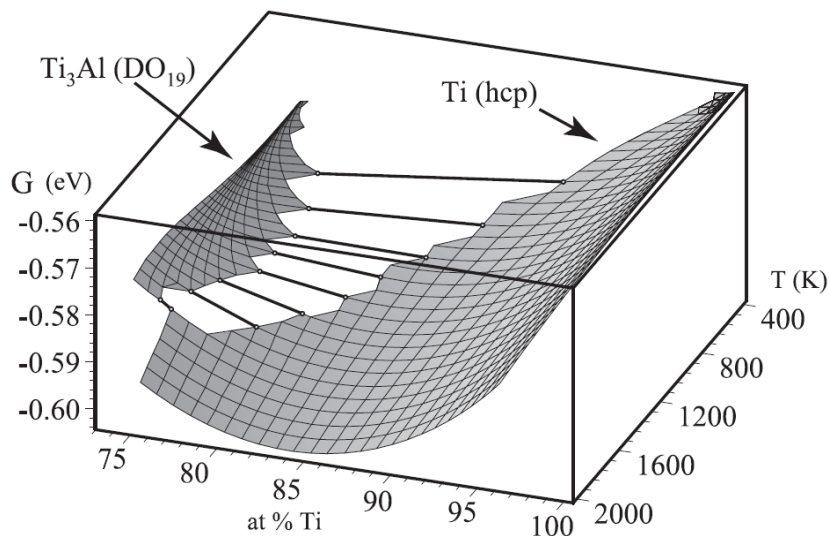


Рис. 6. Фазовая диаграмма для интерметаллидов системы Ti-Al в 3D

При расчетах использовались элементарные супер-ячейки размером 4x4x4 (рис. 5), которые были достаточного размера для оценки влияния переходных металлов (Nb, V, Mo, Mg, Ta, Zr) на свойства TiC и TiN в массиве (примесь составила около 1.5%) на их упругие характеристики (модуль упругости). Расчеты произведены по ПО (программному обеспечению) AbInit, объединенному с ПО пре- и постобработки квантово-механических расчетов AtomicSimulationEnvironment (ASE) как ASE-калькулятор [1]. Упрочнение примесями переходных металлов показало достаточно высокую эффективность, в особенности танталом Ta (прочность возросла на 29% для TiN и на 42% для TiC) и ниобием Nb (прочность возросла на 28% для TiN и на 41% для TiC). В то же время самым энергетически выгодным состоянием обладают составы с примесью хрома при сохранении значительного упрочнения (для нитрида титана+хром  $E_{tot} = -186.68$  при  $V = 772$  GPa, для карбида титана+хром  $E_{tot} = -128.17$  при  $V = 686$  GPa).

Таким образом, одним из перспективных направлений исследования материалов, наиболее приближенным к физической сути процесса структурообразования, является математическое моделирование наночастиц и их взаимодействий. Для многокомпонентных покрытий, состоящих из многих фаз и компонентов, построение фазовых диаграмм является единственным методом, позволяющим установить, сколько фаз и какие конкретно фазы образуют систему при данных значениях параметров состояния. Каждое реально существующее состояние системы на диаграмме состояния изображается так называемой фигуративной точкой; областям существования одной фазы отвечают участки пространства (на трехмерных диаграммах состояния) или плоскости (на двухмерных диаграммах состояния), условиям сосуществования фаз соответствуют поверхности или линии; изменение фазового состояния системы рассматривается как распределение фигуративных точек на диаграмме состояния. На рис. 6 представлена фазовая диаграмма интерметаллидов в системе Ti-Al в 3D формате. Как отмечалось ранее, существующие фазовые диаграммы наиболее изучены в высокотемпературной области. Метод молекулярной динамики позволил изучить её в широком диапазоне температур. Анализ относительного расположения объемных участков, поверхностей, линий и точек, которые образуют диаграмму состояния, позволяет однозначно и наглядно определять условия фазового равновесия, появления в системе новых фаз и химических соединений, образования и распада структур. Получено пространство состояний интерметаллидов семейства Ti-Al, широко применяемых в качестве упрочняющего покрытия при их формировании в камерах ионно-плазменных, магнетронных и т.д. установках, с участием реакционного газа (азота).

Наряду с нитридами TiN, AlN, в системе Al-Ti-N выявлены устойчивые состояния конфигураций интерметаллидов типа Ti<sub>3</sub>AlN, Ti<sub>4</sub>AlN<sub>3</sub> и др. в диапазоне определенных температур и концентраций путем расчета и построения фазовых диаграмм, применения молекулярной динамики и оценке общей энергии. Появляется возможность на основе полученных результатов рекомендовать к производству покрытия, содержащие наиболее устойчивые и оптимальные по энергетическим параметрам нитридные конфигурации. Например, пространственная конфигурация интерметаллида Ti<sub>3</sub>AlN, наноструктурное состояние которого имеет высокое значение уровня Ферми (табл. 1), свидетельствует о высокой температуре сверхпроводимости.

Другим важным моментом при осаждении покрытий является моделирование контактных процессов на границе подложка-покрытие. Дело в том, что до настоящего времени не известна роль как связующей (кобальта), так и карбидной фазы, в частности, карбида вольфрама WC, в прочности соединения покрытия с подложкой.

Таблица 2

Расчетные значения общей энергии в системах

Система	WC-Al	Co-Al	Co - Fe	Co-Ti	Ti <sub>3</sub> AlN
E, а.е.	-	31,09	32,6	33,85	87,37

Наилучшие результаты при расчетах (табл. 2) достигнуты при поиске минимума энергии связи Co с Al, Co с Fe, а также Co с Ti. Здесь обеспечивается наибольшая сходимость расчетов межатомных взаимодействий. При расчете взаимодействий карбида вольфрама с алюминием и титаном при переборе возможных пространственных атомарных конфигураций сходимости не достигнуто. *Таким образом, межатомное взаимодействие элементов покрытия на подложке происходит с атомами кобальтовой фазы. При этом взаимодействие атомов титана с кобальтовой фазой осуществляется с большей интенсивностью. Это объясняет низкую обрабатываемость титановых сплавов.*

При электронно-микроскопических исследованиях тонких фольг на просвет установлено, что зёрна нитридов TiN содержат дислокации, что вызывает их хрупкость (растрескивание). В зёрнах двухкомпонентного нитрида (AlTi)N дислокации в них уже отсутствуют, они меньше и располагаются на границах зёрен. Если однослойное покрытие TiN имеет столбчатую структуру, то двухэлементное покрытие системы Al-Ti-N, содержащее такое соединение, как Ti<sub>3</sub>AlN, уже состоит из икосаэдральных зёрен. *Таким образом, атомные, дислокационные и электронные характеристики тугоплавких соединений могут быть удобным критерием для поиска потенциально перспективных материалов с высокими температурами перехода в сверхпроводящее состояние, а следовательно, и для износостойких наноструктурных покрытий. В этой связи, как показывают исследования, покрытия должны быть многослойными. Верхние слои необходимо формировать многокомпонентными и они должны содержать такие элементы, как Mo, Nb, Hf и т.д., что будет обеспечивать рост температуры сверхпроводимости, который также связан с наноструктурным состоянием зёрен.*

Расчёты различных пространственных структур элементов подложки из WC-Co с другими элементами показали, что в состав нижних слоёв покрытия следует вводить нитриды алюминия, титана и др. Квантово-механические расчёты показывают, что должен быть матричный (основной) элемент, а вводимые другие элементы, в частности, по технологиям PVD, при испарении катодов, должны иметь строго определённый процент для обеспечения высоких функциональных свойств покрытия. Расчёт общей энергии межатомной связи в карбиде WC показал, что она составляет 78,84 а.е. (атомных единиц), а в интерметаллидах Ti<sub>3</sub>AlN и Ti<sub>4</sub>AlN<sub>3</sub> - 87,37 и 92,16 соответственно. Для сравнения энергия связи в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> только порядка 38,55. Из анализа их атомных пространственных структур, различие в прочности межатомного взаимодействия следует связать с формой частиц в покрытии. Это свидетельствует также о том, что, *во-первых*, оксид алюминия (корунд) имеет более низкую энергию диссоциации, хотя его и используют в качестве покрытия, а *во-вторых*, для формирования таких устойчивых сложных соединений, как Ti<sub>3</sub>AlN, необходимы как высокая температура испарения катодов в магнетронных и ионно-плазменных установках, так и определённое соотношение (концентрация) элементов Ti и Al, формирующих покрытие. Формирование более устойчивых сложных нитридов Ti<sub>3</sub>AlN, имеющих и высокий уровень Ферми (табл. 1), указывающий на высокую энергию связи (табл. 2) и T<sub>c</sub> температуру сверхпроводимости, термодинамически не возможно. Интерметаллид Ti<sub>4</sub>AlN<sub>3</sub>, как показывают исследования, формируется ещё при больших температурах осаждения. Их формирование будет, как показывают исследования, обеспечиваться только при ионно-плазменном осаждении покрытий по технологии КИБ, позволяющим осаждать покрытия при температуре выше 500° C. *Таким образом, квантово-механические расчёты дают возможность строить фазовые диаграммы в широком диапазоне температур с использованием алгоритмов молекулярной динамики и на её основе выбрать как состав наноструктурного покрытия, так и рассчитать устойчивость атомных структур, формирующих его зёрна по энергии межатомной связи, а также определить и технологию его осаждения.*

**Библиографический список**

1. **Кабалдин, Ю.Г.** Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 32-36.
2. **Кабалдин, Ю.Г.** Моделирование процесса трения и смазки на основе квантово-механических расчётов / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый, А.А. Уткин // Вестник машиностроения. 2012. №2. С. 35-38.
3. **Самсонов, Г.В.** Тугоплавкие соединения: справочник / Г.В. Самсонов, В.М. Веницкий. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.

**Yu.G. Kabaldin<sup>1</sup>, S.V. Sery<sup>2</sup>, O.V. Kretinin<sup>1</sup>, D.V. Shatagin<sup>1</sup>**

**SIMULATION OF THE STRUCTURE AND NITRIDE COATINGS FOR CUTTING TOOLS BASED ON QUANTUM- MECHANICAL CALCULATIONS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Komsomolsk-on-Amur state technical university<sup>2</sup>

**Objective:** To develop a methodology of choice for the deposition of nitride coatings on cutting tools based on quantum-mechanical calculations

**Research methods:** the method of density functional theory, and electron- microscopic study. The specified structure is modeled by constructing a multiphase diagrams using algorithms for molecular dynamics, identification of stable nitride compounds at given temperature deposition of the coating, with the evaluation of safety in their interatomic bonding.

The results of research is to develop a methodology enables selection of the coating structure without the expensive durability tests for a wide range of processed materials.

**Conclusion:** The developed methodology allows for a focused selection of the optimal composition of the coating based on the modeling of deposition coatings for cutting tools.

*Key words:* cutting tools, nanostructured nitride coating, quantum-mechanical calculations.

---

# ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

УДК 621.039.586

Г.Н. Власичев

## ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АВАРИЙ С ПЛАВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В анализе безопасности реакторов БН принято деление тяжелой запроектной аварии с плавлением активной зоны на четыре стадии: начальную, переходную, послеаварийного перемещения материалов и послеаварийного отвода тепла. В результате перемещения и затвердевания расплава оболочек твэлов на переходной стадии образуются стальные блокировки каналов - твердое основание для бассейна. При проплавлении блокировки расплав будет затекать в каналы между еще твердыми частями твэлов на некоторую длину, затвердевая там и снова образуя слой блокировок. Процесс продвижения тепловыделяющей массы будет иметь прерывистый характер: проплавление слоя блокировки, затекание расплава на некоторую длину и затвердевание, плавление следующего слоя и т.д.

*Ключевые слова:* безопасность реакторов БН, запроектные аварии, перемещение материалов, выкипание натрия, плавление твэлов, тепловыделяющая масса.

В быстром реакторе с натриевым теплоносителем (БН) к запроектным авариям принято относить следующие типы аварий (все без срабатывания аварийной защиты): неконтролируемое увеличение мощности (UTOP), прекращение расхода теплоносителя через реактор (ULOF), прекращение теплоотвода (ULOHS), распространение аварии в отдельных тепловыделяющих сборках (ТВС) на всю активную зону. Предполагается, что в результате множественных отказов не происходит срабатывания аварийной защиты реактора. Возможны другие аварии или их комбинации, но названные включают в себя весь спектр физических явлений процесса развития аварии. Основное различие типов запроектных аварий состоит в инициирующих их событиях и последовательности протекания физических процессов на начальной стадии. В анализе безопасности реакторов типа БН принято деление запроектной аварии в случае неблагоприятного ее развития на четыре стадии: начальную, переходную, послеаварийного перемещения материалов и послеаварийного отвода тепла [1]. Считается, что на двух последних стадиях реактор находится в подкритическом состоянии.

Возможный сценарий развития аварии с прекращением расхода в отдельной ТВС определяется возможностями диагностики аварии на различных этапах ее протекания. При своевременном ее обнаружении и срабатывании аварийной защиты реактора развитие этой аварии ограничится установленным для этой аварии проектным пределом повреждения твэлов. Для быстрых натриевых реакторов этот предел повреждения твэлов состоит в разрушении всех твэлов семи ТВС в локальном объеме активной зоны с непревышением пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов во всем остальном объеме активной зоны [2]. К настоящему времени имеются данные по различным аспектам аварии с полной блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора, сопровождающейся в случае ее возникновения плавлением в активной зоне. Результаты испытаний по программе экспериментальных работ SCARABEE и сопровождающих расчетных исследований позволяют достаточно хорошо представлять сценарий развития такой аварии. В результате значительного снижения

или прекращения расхода в ТВС происходят выкипание натрия, сопровождающееся осцилляциями его расхода, осушение и плавление оболочек твэлов [3, 4] с образованием стальных блокировок каналов для прохода теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства [5, 6]. После стальных оболочек плавятся таблетки топлива [3, 4], образуя расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали [5, 6, 3]. Взаимодействия возвращающегося натрия с расплавом вызывают выбросы расплавленных материалов и образование блокировок в верхней части активной зоны [6]. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу [4, 7] приводят к плавлению и разрушению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры [3] и, по-видимому, в окружающие ТВС. При проплавлении чехла имеет место полная блокировка сталью радиального зазора между ТВС на ранней стадии процесса, которая предотвращает дальнейшее перемещение топлива в зазоре [8, 9]. При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиальное распространение аварии прекращается. Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE [10]. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла и выхода источников запаздывающих нейтронов в межчехловой зазор с потоком натрия, а также при проникновении расплава в окружающие ТВС с номинальным натриевым потоком. Для срабатывания аварийной защиты за счет такого сигнала в конкретном реакторе требуется время от 10 до 30 с [10, 4], необходимое преимущественно для переноса источников запаздывающих нейтронов до детектора. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро [11, 4]. Чтобы избежать распространения аварии за пределы семи ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этих сборках [4]. При облученном топливе, как показал эксперимент ВТИ-Sabri [10], источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов, что обеспечит своевременное детектирование аварии и ограничение ее проектными пределами. Такая авария может распространиться на всю активную зону в случае множественных отказов в системе аварийной защиты реактора.

В начале аварии с прекращением расхода теплоносителя в быстром реакторе активная зона сохраняет свою конфигурацию. На начальной стадии начинается кипение натрия в отдельных тепловыделяющих сборках, в это время может произойти разгерметизация твэлов и деформация их оболочек под действием повышенных температур и давлением от газовых продуктов деления. Анализ изменения нейтронно-физических и теплогидравлических параметров реактора и оценка возможных повреждений твэлов в ТВС требуют применения программ, моделирующих аварийный процесс во всем объеме активной зоны. Если не произойдет достаточного уменьшения мощности за счет отрицательной обратной связи, сохраняющееся несоответствие между энерговыделением и теплоотводом приведет к полному испарению натрия, начнется расплавление активной зоны, а затем - кипение расплавленной смеси топлива и металла оболочек. Этот этап аварии называется *переходным*, поскольку конфигурация активной зоны полностью нарушена, однако выхода стали и топлива за ее пределы пока не произошло [12].

В ранних исследованиях по безопасности быстрых реакторов предполагалось, что в процессе расплавления и уплотнения активной зоны происходит быстрый рост реактивности и под действием увеличивающегося внутреннего давления активная зона разрушается. В дальнейшем стали предполагать выброс части топлива из активной зоны в верхний объем натрия через каналы в верхней торцевой зоне воспроизводства. Это инициировало проведение многочисленных исследований процесса перемещения расплава в узких каналах, обзор части которых имеется в [13]. Выброс части топлива из активной зоны снижает реактивность, прекращая развитие переходной фазы. При этом остается необходимость рассмотрения бассейна из оставшейся части расплавленного топлива с остаточным тепловыделением.

Эксперименты, выполненные в реакторе SCARABEE с целью исследования развития аварии в отдельной ТВС быстрого реактора, дают информацию о поведении расплавленных

и кипящих материалов активной зоны в более широком понимании, которую можно примерять к другим аварийным сценариям. Анализ наиболее вероятного развития переходной фазы при расплавлении всей активной зоны (в реакторе без специальной натриевой полости над активной зоной) в свете результатов экспериментов по программе SCARABEE представлен в [9]. В процессе такой аварии при свежем топливе лишь незначительное количество топлива будет выбрасываться через каналы для прохода теплоносителя в области верхней торцевой зоны воспроизводства и зазоры между чехлами ТВС. В случае с облученным топливом переходная фаза начнется, по-видимому, при высоком давлении в ТВС, обусловленном выходом газовых продуктов деления из твэлов. Если газ будет выходить через верхнюю зону воспроизводства или через межчехловые зазоры, ситуация будет похожей на наблюдаемую в опытах со свежим топливом. Если давление в разрушенных ТВС будет повышенным, то очень вероятно, что остающиеся над расплавом активной зоны остатки твэлов будут выбрасываться и часть топлива будет выпускаться в верхнюю натриевую полость, что может завершить развитие переходной фазы. Изучение такого сценария в рамках программы SCARABEE начинается с эксперимента BE+I [9].

В первоначальной конструкции активной зоны российских реакторов БН положительный натриевый пустотный эффект реактивности также приводил в соответствии с расчетами к разрушению активной зоны в случае наиболее тяжелой запроектной аварии с потерей энергопитания и разрушением всех систем управления реактивностью [14]. Общий вывод из уроков наиболее значимых аварий и инцидентов на АЭС и исследований переходных процессов в условиях быстрого роста реактивности состоит в том, что аварии этого типа необходимо предотвращать с высокой степенью надежности, поскольку в результате быстрого скачка мощности возможно разрушение всех физических барьеров безопасности, предназначенных для предотвращения больших радиоактивных выбросов. В самой реакторной установке аварийный рост реактивности должен пресекаться немедленно множественными и проверяемыми механизмами остановки реактора. Действия активных и пассивных систем безопасности должны подкрепляться исходно безопасными характеристиками активной зоны.

Разработка новой конструкции активной зоны с отрицательным или близким к нулю натриевым пустотным эффектом реактивности исключает быстрый рост реактивности с началом кипения теплоносителя. В результате, при аварии с прекращением расхода теплоносителя через реактор, вызванном потерей энергопитания без срабатывания всех средств воздействия на реактивность, не происходит расплавления активной зоны так как отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия приводят к снижению мощности. Первоначальное вскипание натрия происходит на выходе зоны среднего обогащения топлива [15]. Паронатриевая смесь распространяется в натриевую полость и верхний торцевой экран, вызывая отрицательные эффекты реактивности, падение мощности и прекращение кипения. Мощность при этом опять увеличивается и натрий снова вскипает, теперь уже на выходе зоны среднего обогащения и центральной части зоны малого обогащения. И вновь перемещение пара приводит к отрицательным эффектам реактивности, падению мощности и прекращению кипения. В реакторе устанавливаются автоколебания мощности с периодическими вскипаниями теплоносителя. Температура топлива в центре твэлов падает во всех подзонах с самого начала процесса. Таким образом, плавления стали и топлива в активной зоне не происходит. Топливные элементы теряют герметичность. Теплоотвод от активной зоны осуществляется кипящим натрием. Через некоторое время после снижения мощности остаточного энерговыделения кипение натрия прекратится. Оно может быть прекращено еще раньше за счет управления аварией.

Однако полностью исключить вероятность плавления части активной зоны пока невозможно [1]. В рассмотрении развития аварии на стадии кипения натрия допускается возможность развития аварии, сопровождающегося осушением отдельных участков твэлов от жидкого теплоносителя. Специфической особенностью активных зон быстрых реакторов с натриевым теплоносителем является наличие системы гидравлически связанных параллель-

ных каналов. При этом наблюдается вследствие взаимного гидравлического влияния каналов возникновение неустойчивости течения, изменение условий охлаждения в сборках. Результаты экспериментов показывают, что гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них и к возможному закипанию (или инверсии) расхода теплоносителя в контурах, к росту температуры теплоносителя и оболочек твэлов и к возникновению кризиса теплообмена [16, 17]. На осушенных участках будет расти температура оболочек и топлива с последующим их плавлением. Это делает необходимым рассмотрение последующих стадий аварии. Такое рассмотрение требуется для выработки и обоснования требуемых нормативными документами организационных и технических мер по управлению аварией и, в конечном итоге, локализации фрагментов разрушенной активной зоны при самом неблагоприятном развитии аварии. Для получения исходных данных для рассмотрения последних стадий аварии необходим анализ начальной и переходной стадий при консервативной предпосылке относительно кипения натрия. Важное значение при этом в оценках масштабов повреждений в активной зоне на переходной стадии аварии приобретает корректный учет положительных эффектов реактивности в результате перемещения конструкционного материала (оболочек твэлов) и топлива [18].

Последующее развитие аварии с расплавлением активной зоны связывают с перемещением расплавленной тепловыделяющей массы к днищу реакторного корпуса. В водоохлаждаемых реакторах при запроектной аварии с потерей теплоносителя расплавленная тепловыделяющая масса (кориум) способна изливаться на днище корпуса большой жидкой струей, как это и произошло в аварии на станции ТМ-2 [19, 20, 21]. Проникновение расплава в количестве почти 20 т в нижнюю часть корпуса в данной аварии произошло двумя путями в течение 1-2 мин [22]. В конструкции быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем при вышеопределенных типах запроектных аварий отсутствуют условия для подобного быстрого проникновения тепловыделяющей массы из активной зоны на поддон, поскольку жидкий теплоноситель сохраняется внутри реакторного корпуса. Поэтому в случае попадания расплава в возможный канал (например, в гильзу чехла СУЗ) только ограниченное его количество, в виде твердых фрагментов может проникать через такой канал. Основанием для данного вывода могут служить результаты экспериментов TERMOS на установке FARO [13], в которых 100 кг расплава диоксида урана было вылито со скоростью 10 м/с в 130 кг натрия, содержащегося в трубе диаметром 28 см и длиной 2,5 м. Длина проникновения расплава в натрий в данных экспериментах не превысила 1 м.

Основная масса экспериментальных и теоретических работ по исследованиям перемещения расплава посвящена перемещению в узких каналах внутри ТВС. Образующиеся в результате перемещения и затвердевания расплавленного материала оболочек твэлов первоначальные стальные блокировки каналов для прохода теплоносителя под активной зоной некоторое время препятствуют течению жидкого топлива вниз и образуют твердое основание для тепловыделяющего бассейна. Для перемещения жидкого топлива в узких каналах требуется сначала расплавление материалов в области нижних блокировок. После остановки реактора это возможно в случае недостаточного теплоотвода к окружающим ТВС от вышележащей тепловыделяющей массы. Проплавление нижней блокировки при аварии в отдельной ТВС отмечалось в эксперименте BE+2 [5]. В экспериментах этой серии отмечалось и некоторое движение нижнего стального бассейна вниз [3]. При проплавлении блокировки расплав будет затекать под действием силы тяжести в каналы между еще твердыми частями твэлов на некоторую длину, затвердевая там и снова образуя слой блокировок. В результате, процесс продвижения расплавленной тепловыделяющей массы вниз будет иметь, как представляется, не плавный, а прерывистый характер и будет состоять из ряда повторяющихся этапов: проплавление заблокированного слоя, затекание расплава на некоторую длину и затверде-



вание, проплавление следующего заблокированного слоя и т.д. При этом основное время будет затрачиваться на проплавление материалов конструкций под опускающейся тепловыделяющей массой. Глубина проникновения расплава в каналы составляет не более нескольких десятков сантиметров (см), а временной масштаб процессов течения и затвердевания - менее 1 с [13, 23], что крайне мало по сравнению со временем, требующимся для расплавления очередного заблокированного слоя. Значительно сокращает длину проникновения возможное наличие твердых частиц в расплаве [24, 25].

Поскольку жидкий теплоноситель сохраняется внутри корпуса реактора БН, не исключена возможность остановки топливных масс в области нижней зоны воспроизводства или верхней плиты напорной камеры, что указывает на высокий уровень безопасности данного типа реакторов. В результате расчетных исследований, выполненных с использованием программы БРУТ, получено, что в случае расплавления 6 или 36 ТВС в центре активной зоны, а также всей активной зоны реактора БН разрушения верхней плиты напорной камеры (а, следовательно, и нижележащих конструкций) не произойдет [26]. Для доказательства остановки топливных масс во внутриреакторных конструкциях требуются исследования применительно к конкретной конструкции реактора.

Согласно принятой концепции безопасности быстрых реакторов, теплоотвод от фрагментов разрушенной активной зоны в запроектной аварии должен осуществляться внутри реакторного корпуса. В проекте реактора БН предусмотрен специальный поддон над днищем корпуса для удержания и охлаждения радиоактивных материалов активной зоны в случае неблагоприятного развития аварии на предыдущих стадиях. Для обоснования работоспособности поддона требуются анализ теплоотвода от лежащего на нем тепловыделяющего слоя и рассмотрение перемещения расплавленной массы из активной зоны, в результате которого может быть оценен уровень остаточного тепловыделения в топливе, зависящий от времени его движения до поддона.

В случае тяжелой запроектной аварии с расплавлением активной зоны расплавленные материалы (топливо и сталь), вступая во взаимодействие с жидким теплоносителем, фрагментируются в частицы и скапливаются на отдельных участках внутри корпуса. Размеры образующихся частиц составляют в основном ниже 1000 мкм [12]. Одним из мест отложения тепловыделяющих слоев может явиться поддон над днищем корпуса. Мощность остаточных тепловыделений в топливных частицах зависит от времени, прошедшего после потери критичности активной зоны. Экспериментальные исследования показывают, что основной тепловой поток от насыпного тепловыделяющего слоя направлен вверх к теплоносителю, покрывающему осколки [12, 27]. В тонком тепловыделяющем слое тепло передается за счет теплопроводности и конвекции. Если толщина и/или плотность тепловыделения достаточно велики, температура теплоносителя, находящегося в непосредственном контакте с топливными частицами, достигнет точки кипения в части слоя. При этом пузырьки паров будут выноситься из зоны кипения. При недостаточно эффективном охлаждении топливных фрагментов может наступить осушение части слоя, в которой температура топлива может, в свою очередь, достичь точки плавления. Осушение происходит по причине наступления кризиса теплоотдачи, когда скорость генерации паров теплоносителя становится выше, чем скорость притока жидкости в кипящий слой. В случае расплавления части топлива в тепловыделяющем слое появляется опасность проникновения расплавленного топлива из слоя непосредственно на нижележащую опорную конструкцию. Температурное поле и фазовое состояние компонентов внутри тепловыделяющего слоя представляют интерес в плане оценок степени повышения температуры нижележащей опорной конструкции (поддона) за счет теплового потока к ее поверхности от слоя. Для доказательства обеспечения надежного отвода остаточных тепловыделений от тепловыделяющего слоя внутри реакторного корпуса требуется анализ его состояния на поддоне применительно к конкретной конструкции реактора.

Таким образом, в результате выполненных исследований достигнут достаточно высокий уровень понимания физических процессов, происходящих при запроектных авариях, особенно на начальной стадии. Получен значительный объем данных, необходимых для разработки, совершенствования и проверки расчетных методик, направленных на анализ и обоснование безопасности. Однако остается ряд неопределенностей, относящихся к пониманию некоторых аспектов развития аварий, обуславливающих неопределенности в численном описании протекания аварий. Это делает необходимым принятие консервативных предположений в описании соответствующих звеньев цепочек событий. Наиболее низкий уровень понимания и меньший объем теоретических и экспериментальных данных характерны для последних этапов развития плавления активной зоны, и особенно для стадии послеварийного перемещения материалов. Требуются дополнительные исследования в части образования кориума (затвердевшей композиции) и последующего отвода остаточных тепловыделений от него. Для решения данной задачи необходим анализ конкретной конструкции реактора.

### Библиографический список

1. **Buksha, Yu.** On Approaches Applied Analysis of Melt-down Accident in BN-800 Type Reactor // Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. P. 541-544.
2. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. 1990. Т. 69. Вып. 6. С. 409-422.
3. **Papin, J.** The SCARABEE Total Blockages Test Series: Synthesis of the Interpretation / J. Papin, J. Mac dougall, R. Sesny [et al.] //— Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12-16 August 1990. – ANS, 1990. Vol. 1. P. 367-376.
4. **Kayser, G.** Main SCARABEE Lessons and Most Likely Issue of the Sub-assembly Blockage Accident / G. Kayser, G. Berthoud, K. Schleisiek [et al.] // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3-7, 1994. – Obninsk, 1994. Vol. 2. P. 2/146-2/155.
5. **Jones, G.** The Different APL and BE+ Tests within the SCARABEE Programme: Means Used in Following and Evaluating the Evolution of the Tests – Application to a Test of Each Type / G. Jones, J. Saroul, R. Sesny // Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. – BNES, London, 1987. Vol. 2. P. 389-394.
6. **Moxon, D.** SCARABEE – an Interpretation of the Pump Trip and Inlet Blockage Series / D. Moxon, J. Papin, P. Obry, P. Soussan // Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. – BNES, London, 1987. Vol. 1. P. 263-268.
7. **Seiler, J.M.** Synthesis of Research on Boiling Pool Thermalhydraulics at CEA and KfK / J.M. Seiler, G. Kayser, D. Wilhelm // Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. – O-arai Engineering Center, PNC, 1994. P. 309-330.
8. **Dadillon, J.** The SCARABEE Propagation Test Series PI-A and PV-A / J. Dadillon, J. Jamond, R. Sesny [et al.] // Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12-16 August 1990. – ANS, 1990. Vol. 2. P. 187-196.
9. **Kayser, G.** Potential Lessons from SCARABEE for the Transition Phase / G. Kayser, M. Schwarz // Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. – O-arai Engineering Center, PNC, 1994. P. 397-406.
10. **Charpenel, J.** Release of Delayed Neutron Emitters in SCARABEE Experiments / J. Charpenel, G. Kayser, R. Sesny, J.P. Trapp // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3-7, 1994. – Obninsk, 1994. Vol. 2. P.2 /112-2/121.
11. **Schwarz, M.** The SCARABEE PV-A Test for Melt Propagation of a Boiling Pool into a Neighbour-

- ing Pin Bundle / M. Schwarz, G. Kayser, C. Jamond // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3-7, 1994. – Obninsk, 1994. Vol. 2. P. 2/102-2/111.
12. **Уолтер, А.** Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: [пер. с англ.] / А. Уолтер, А. Рейнольдс. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
  13. **Le Rigoleur, C.** Review of European out-of-pile Tests and Analyses of Molten Material Movement and Relocation and of Molten Material – Sodium Interaction / C. Le Rigoleur, F. Hofmann, R. Stansfield // Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, June 6-9, 1994, O-arai, Japan. – O-arai Engineering Center, 1994. P. 17-43.
  14. **Kuznetsov, I.A.** Objectives and Main Results of Activities on Fast Reactor Safety since April 1986 / I.A. Kuznetsov, Yu.E. Bagdasarov, Yu.K. Buksha [et al.] // Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12-16 August 1990. – ANS, 1990. Vol. 1. P. 11-18.
  15. **Кузнецов, И.А.** Сценарий и последствия аварии LOFWS в реакторе БН-800 Южно-Уральской АЭС / И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский, Ю.Е. Швецов [и др.] // Доклад на семинаре по безопасности реакторов на быстрых нейтронах. СНГ – Европейское Сообщество. г. Обнинск – г. Актау, 24 - 29 февраля 1992 г. – 24 с.
  16. **Ефанов, А.Д.** Теплообмен при кипении жидкого металла в системе каналов в режиме естественной конвекции / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов [и др.] // Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах: материалы Российской межотрасл. конф. "Теплофизика-2005" / Обнинск. ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. Т. 1. С. 34-35.
  17. **Ефанов, А.Д.** База экспериментальных данных по теплогидравлике быстрых реакторов для верификации расчетных кодов / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, А.В. Жуков [и др.] // Атомная энергия. 2009. Т. 107. Вып. 3. С. 128-136.
  18. **Buksha, Yu.K.** Analysis of the Fast Reactor Core Recriticality at Beyond Design Basis Accidents / Yu.K. Buksha, A.V. Danilychev, E.E. Marinenko [et al.] // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, 1994. Vol. 2. P. 2/24-2/35.
  19. **Варли, Дж.** "Три-Майл-Айленд-2": десятилетний опыт ликвидации последствий аварии // Атомная техника за рубежом. 1989. № 8. С. 36-37.
  20. **Eidam, G.R.** TMI-2 Defuelling Conditions and Summary of Research Findings / G.R. Eidam, E.L. Tolman, J.M. Broughton [et al.] // Severe Accidents in Nuclear Power Plants: Proc. of an international Symposium held in Sorrento, 21-25 March 1988. – IAEA, Vienna, 1988. Vol. 1. P. 207-226.
  21. **Wright, R.W.** Current Understanding of in-Vessel Core Melt Progression // Severe Accidents in Nuclear Power Plants: Proc. of an international Symposium held in Sorrento, 21-25 March 1988. – IAEA, Vienna, 1988. Vol. 2. P. 149-164.
  22. **Попов, С.Г.** Анализ физико-химических процессов, протекающих во время аварий в активной зоне реакторов LWR // Атомная техника за рубежом. 1995. № 2. С. 7-16.
  23. **Tattersall, R.B.** Experiments at the UKAEA Winfrith on the Penetration of Molten Fuel into Pin Arrays and Tubes / R.B. Tattersall, R.J. Maddison, K. Miller // Nuclear Energy. 1989. Vol. 28. No. 4. P. 269-280.
  24. **Struwe, D.** Overview on Out-of-Pile Experimental Programmes Performed at the Nuclear Research Center Karlsruhe // Westeuropean-Russian Safety Meeting on Fast Reactors, Obninsk, February 24th - 26th, 1992.
  25. **Maschek, W.** Experimental Investigations of Freezing Phenomena of Liquid/Particle Mixtures in the THEFIS facility and their Theoretical Interpretation / W. Maschek, G. Fieg, M. Flad // Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet., Snowbird, 12-16 August 1990. – ANS, 1990. Vol. 1. P. 519-529.
  26. **Кашеев, М.В.** Моделирование удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора / М.В. Кашеев, И.А. Кузнецов // Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах: материалы Российской межотрасл. конф. "Теплофизика-2005". – Обнинск. ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. Т. 1. С. 40-41.

27. **Kim, H.S.** Convective Cooling of Simulated Core Debris Beds / H.S. Kim, S.I. Abdel-Khalik // Nuclear Technology. 1985. Vol. 69. No. 3. P. 268-278.

*Дата поступления  
в редакцию 15.02.2013*

**G.N. Vlasichev**

**PHENOMENOLOGY OF ACCIDENTS WITH CORE MATERIALS MELTING  
OF BN REACTOR**

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

**Purpose:** The existing concept of safety includes consideration in the project of nuclear power plant beyond design accidents with severe core damage.

**Design/methodology/approach:** The article is devoted to the phenomenology of heavy beyond design accidents in fast reactors with sodium coolant (of BN), accompanied by melting and movement of core materials. The analysis is based on the test results of experimental programs and the accompanying computational modeling of emergency physical processes.

**Findings:** In the safety analysis of BN reactor accepted division of beyond design accident into four stages: initial, transitional, post-accident material relocation and post-accident heat removal. As a result of relocation and solidification of the cladding melt in transition stage steel blockages of channels are formed - solid foundation for the pool. Under melt-through of blockage the melt will be flow into the channels between the yet solid parts of the fuel rods at some length, it hardens there and again forms a layer of blockages. The process of heat-generating mass moving will be the intermittent nature: melt-through of blockages layer, leaking of melt at some length and solidification, the melting of the next layer, etc.

**Originality/value:** Research is required of processes under post-accident material relocation stage and residual heat removal from the heat-generating mass at the last stage of the accident.

*Key words:* BN reactors safety, beyond design accidents, material relocation, sodium boiling over, melting of fuel rods, heat-generating mass.

УДК 621.372.8

Л.В. Когтева<sup>1</sup>, А.Е. Львов<sup>2</sup>, Л.Г. Рудоясова<sup>1</sup>, Г.И. Шишков<sup>1</sup>, В.В. Щербаков<sup>1</sup>

## АТТЕНУАТОРЫ НА ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

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

Описан принцип действия и конструкции широкополосных аттенуаторов на полосковых линиях.

*Ключевые слова:* аттенуаторы, полосковые линии, пластинчатые резисторы.

## Введение

В 60-х годах прошлого столетия широкое применение находит электродинамическая структура в виде отрезка круглого волновода, перегороденного в диаметральной плоскости пластинчатым резистором – тонкой (меньше толщины скин-слоя) резистивной пленкой, нанесенной на плоскую диэлектрическую пластину. На базе такой структуры стало возможно создание широкополосных коаксиальных аттенуаторов, обладающих равномерной амплитудно-частотной характеристикой и высокой степенью согласования и работающих в диапазоне от постоянного тока до частот, близких к критическим для используемой коаксиальной линии [1, 2].

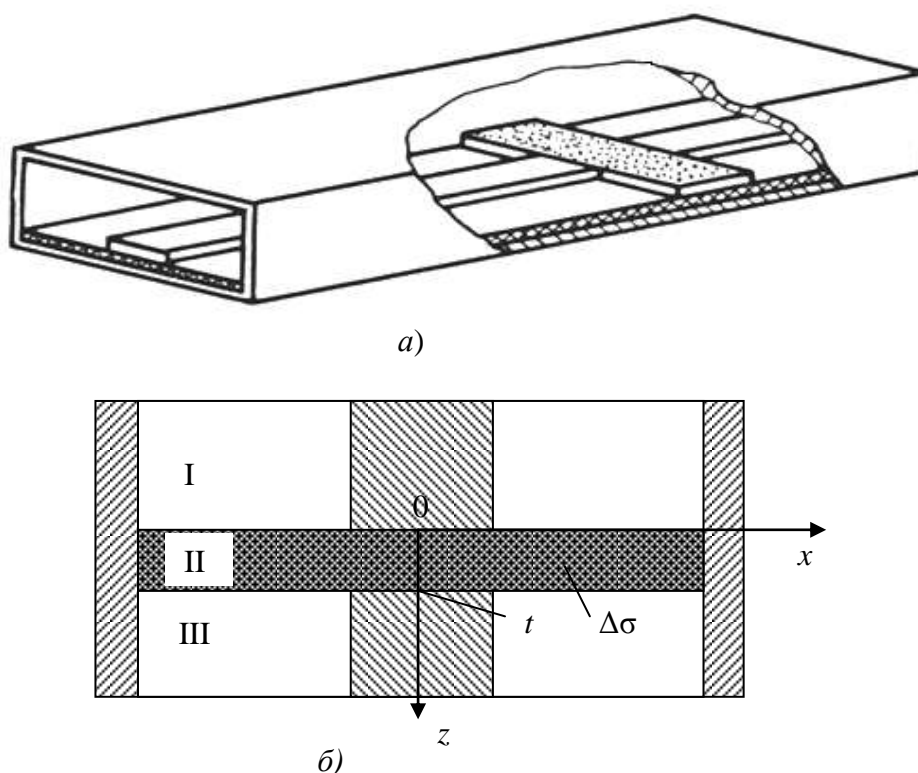


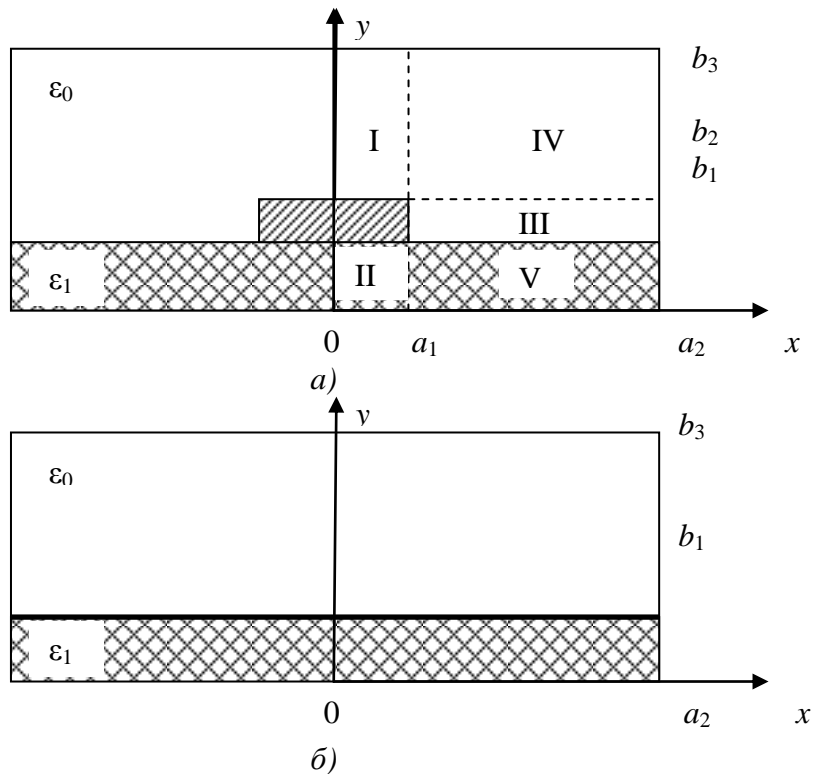
Рис. 1. Схематичное изображение аттенуатора на полосковой линии

На базе отечественных пластинчатых резисторов С2-20 с односторонним резистивным покрытием в ЦНИИ-11, г. Горький (в дальнейшем – Нижегородский НИПИ «Кварц») впервые в мировой практике были разработаны коаксиальные аттенуаторы типа ДО (рабо-

чий диапазон 0–5 ГГц), предназначенные для массового промышленного производства [3].

Резисторы С2-20 положили также начало создания тонкопленочных аттенуаторов на полосковых линиях [4]. Аттенуатор выполнен на основе экранированной полосковой линии, в разрыв внутреннего проводника которой вставлен пластинчатый резистор, имеющий гальванический контакт с центральным проводником линии и с экраном (рис. 1, а, б).

Базовыми структурами для аттенуаторов рассматриваемого типа являются экранированная полосковая линия и двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями (рис. 2, а, б).



**Рис. 2. Поперечные сечения экранированной полосковой линии (а) и двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой (б)**

Поэтому при расчете характеристик аттенуаторов сначала необходимо исследование спектров собственных волн указанных структур. Для решения вопросов классификации волн в двухслойном прямоугольном волноводе с резистивной пленкой между слоями необходимо знание спектра собственных волн обычного двухслойного прямоугольного волновода.

Знание спектров собственных волн полосковой линии и двухслойного волновода позволят сформулировать дифракционную задачу о согласовании полосковой линии с двухслойным волноводом, содержащим резистивную пленку, к которой сводится расчет возбуждающего устройства аттенуатора.

При исследовании спектров собственных волн экранированной полосковой линии и двухслойного волновода без потерь использован метод частичных областей (МЧО) [5]. При рассмотрении прямоугольного волновода с резистивной пленкой на диэлектрической подложке – метод поверхностного тока [6].

Решение задачи об исследовании спектра волн экранированной полосковой линии приведено в [7, 8].

Для постановки дифракционной задачи требуется представление полей собственных волн в согласуемых областях экранированной полосковой линии, поперечное сечение которой изображено на рис. 2, а.

### 1. Спектр волн полосковой линии

Решение уравнения Гельмгольца, описывающее весь спектр собственных волн полосковой линии, для каждой из выделенных областей (рис. 2, а) представляем в виде:

- область I:

$$\Pi_z^e = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{m\nu}^{(1)} \cdot \cos \alpha_{1m\nu} x \cdot \sin m\pi(y - b_2)/d_2 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z}, \quad (1)$$

$$\Pi_z^m = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_{m\nu}^{(1)} \cdot \sin \alpha_{1m\nu} x \cdot \cos m\pi(y - b_2)/d_2 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z};$$

- область II:

$$\Pi_z^e = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{m\nu}^{(2)} \cdot \cos \alpha_{2m\nu} x \cdot \sin m\pi y/b_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z}, \quad (2)$$

$$\Pi_z^m = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_{m\nu}^{(2)} \cdot \sin \alpha_{2m\nu} x \cdot \cos m\pi y/b_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z};$$

- область III:

$$\Pi_z^e = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [A_{n\nu}^{(3)} \cdot \sin \alpha_{3n\nu}(y - b) + B_{n\nu}^{(3)} \cdot \cos \alpha_{3n\nu}(y - b)] \cdot \sin n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z}, \quad (3)$$

$$\Pi_z^m = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [C_{n\nu}^{(3)} \cdot \sin \alpha_{3n\nu}(y - b) + D_{n\nu}^{(3)} \cdot \cos \alpha_{3n\nu}(y - b)] \cdot \cos n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z};$$

- область IV:

$$\begin{aligned} \Pi_z^e = & \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} P_{m\nu}^{(4)} \cdot \sin \alpha_{1m\nu}(x - a_2) \cdot \sin m\pi(y - b_2)/d_2 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z} + \\ & + \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{n\nu}^{(4)} \cdot \sin \alpha_{3n\nu}(y - b_3) \cdot \sin n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pi_z^m = & \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} Q_{m\nu}^{(4)} \cdot \cos \alpha_{1m\nu}(x - a_2) \cdot \cos m\pi(y - b_2)/d_2 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z} + \\ & + \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} Q_{n\nu}^{(4)} \cdot \cos \alpha_{3n\nu}(y - b_3) \cdot \cos n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z}; \end{aligned}$$

- область V:

$$\Pi_z^e = \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} P_{m\nu}^{(5)} \cdot \sin \alpha_{2m\nu}(x - a_2) \cdot \sin m\pi y/b_1 \cdot e^{-i\beta_{\nu}z} +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{nv}^{(5)} \cdot \sin \alpha_{5nv} y \cdot \sin n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_v z}, \\
\Pi_z^m = & \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} Q_{mv}^{(5)} \cdot \cos \alpha_{2mv}(x - a_2) \cdot \cos m\pi y/b_1 \cdot e^{-i\beta_v z} + \\
& + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} Q_{nv}^{(5)} \cdot \cos \alpha_{5nv} y \cdot \cos n\pi(x - a_1)/d_1 \cdot e^{-i\beta_v z}.
\end{aligned} \tag{5}$$

В записи векторов Герца использованы обозначения:

$$d_1 = \alpha_2 - \alpha_1; d_2 = b_3 - b_2; b = (b_1 + b_2)/2;$$

$\alpha_{1mv}, \alpha_{2mv}$  – поперечные волновые числа вдоль оси  $x$  в первой и второй областях;

$\alpha_{3nv}, \alpha_{5nv}$  – поперечные волновые числа вдоль оси  $y$  в третьей и пятой областях;

$\beta_v$  – фазовая постоянная  $v$ -й волны полосковой линии.

Приведенная запись векторов Герца дает возможность составить дисперсионное уравнение, решение которого определяет спектр собственных волн, необходимый для решения в дальнейшем дифракционной задачи.

Выражения для компонент электромагнитного поля определяются через вектора Герца и в силу их громоздкости в настоящей статье не приводятся. Входящие в эти выражения фазовые постоянные  $\beta_v$  и амплитудные коэффициенты вычисляются на основе решения дисперсионного уравнения. Коротко опишем процедуру составления дисперсионного уравнения.

На границах частичных областей для компонент поля должны выполняться граничные условия. Приравнявая тангенциальные компоненты электрических и магнитных полей на границах выделенных областей (I и IV, II и V, III и V, III и IV) (рис. 2, а), получаем систему функциональных уравнений. Используя условие ортогональности собственных функций выделенных областей, после преобразований, приходим к бесконечной системе линейных однородных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно амплитудных коэффициентов компонент поля в области III.

Приравнявая к нулю главный определитель усеченной СЛАУ, получаем дисперсионное уравнение для всех волн, распространяющихся в рассматриваемой линии. При фиксированном значении фазовой постоянной  $\beta$  первый по частоте корень дисперсионного уравнения соответствует основной квази-Т волне, последующие корни – волнам высших типов.

При расчете характеристик волн в качестве входных параметров задаются: размеры полосковой линии  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3$ ; ширина разрыва внутреннего проводника  $t$ , в который вставляется резистивная пленка (рис. 1, б); диэлектрическая проницаемость материала подложки  $\varepsilon$  и частота  $\omega$ . Из блока расчета характеристик собственных волн полосковой линии в алгоритм дифракционной задачи будут поступать в качестве входных параметров фазовые постоянные волн  $\beta_v$ , поперечные волновые числа и амплитудные коэффициенты для полей в каждой из областей, выраженные через амплитудные коэффициенты области III.

## 2. Спектр волн двухслойного прямоугольного волновода

Область разрыва центрального проводника полосковой линии представляет собой двухслойный прямоугольный волновод (рис. 2, б). Для исследования слоистых прямоугольных волноводов обычно используется аппарат  $L$ -волн [9].

Поскольку в полосковой линии волны имеют гибридный характер и классифицируются как  $HE$  и  $EH$ , такую же классификацию целесообразно применять и для волн волноводной



части аттенюатора. Поэтому необходимо установить соответствие  $L$ -волн и гибридных волн в двухслойном прямоугольном волноводе.

В проведенных ранее расчетах в НИИПИ «Кварц» показано соответствие гибридных волн в двухслойном прямоугольном волноводе с резистивной пленкой с  $L$ -волнами в волноводе без пленки. Это соответствие установлено на основе сравнения дисперсионных характеристик указанных волн при  $\Delta\sigma \rightarrow 0$ , где  $\Delta$  и  $\sigma$  – толщина и проводимость резистивной пленки.

### 3. Спектр волн двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями

Рассмотрим прямоугольный волновод с тонкой резистивной пленкой (рис. 2, б), имеющей поверхностную плотность  $\Delta\sigma$ .

Из-за наличия в пленке как продольных, так и поперечных токов поле в волноводе в общем случае является гибридным.

При решении дифракционной задачи поле в волноводе с пленкой представим в виде набора гибридных волн.

Запишем продольные компоненты обоих векторов Герца в выделенных областях:

- в области I:

$$P_{z1}^e = A_1 \cdot \sin k_x(x - a_2) \cdot \sin k_{y1}y \cdot e^{-i\beta z},$$

(6)

$$P_{z1}^m = B_1 \cdot \cos k_x(x - a_2) \cdot \cos k_{y1}y \cdot e^{-i\beta z}$$

- в области II:

$$P_{z2}^e = A_2 \cdot \sin k_x(x - a_2) \cdot \sin k_{y2}(y - b_3) \cdot e^{-i\beta z},$$

(7)

$$P_{z2}^m = B_2 \cdot \cos k_x(x - a_2) \cdot \cos k_{y2}(y - b_3) \cdot e^{-i\beta z},$$

где  $k_x = n\pi/2a_2$ ,  $k_{y1} = \sqrt{\epsilon_1\mu_1\omega^2 - k_x^2 - \beta^2}$ ,  $k_{y2} = \sqrt{\epsilon_0\mu_0\omega^2 - k_x^2 - \beta^2}$ ,  $\beta = \beta_1 + i\beta_2$  – продольное волновое число.

В соответствии с методом поверхностного тока граничные условия в плоскости пленки при  $y=b_1$  записываются в виде:

$$E_{x1}=E_{x2}, \quad E_{z1}=E_{z2}, \quad H_{x2}-H_{x1}=j_{\text{зпов}}, \quad H_{z2}-H_{z1}=-j_{\text{зпов}},$$

(8)

где  $j_{\text{зпов}}=\Delta\sigma E_{z2}$ ,  $j_{\text{хпов}}=\Delta\sigma E_{x2}$ ,  $\sigma$  – удельная проводимость пленки;  $\Delta$  – ее толщина.

Выражая компоненты поля через вектора Герца (6), (7) и подставляя их в граничные условия (8), получаем систему четырех алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов  $A_1, A_2, B_1, B_2$ . Понижая ее порядок, приходим к системе двух линейных алгебраических уравнений относительно  $A_1, A_2$ . Записывая условие нетривиальности решений системы, получаем дисперсионное уравнение двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой между слоями.

Результаты решения дисперсионного уравнения для параметров  $b_1/b_3=0,3$ ,  $a_2/b_3=0,8$  представлены на рис. 3 в виде фазовых характеристик  $\bar{\beta}_1 = \beta_1/k_0$ , где  $k_0=2\pi b_3/\lambda$ , и характеристик затухания  $\beta_2 b_3$  [10].

Рассматриваемая гибридная волна в двухслойном волноводе без пленки соответствует волне  $LE_{11}$ , поэтому и гибридную волну в волноводе с пленкой можно классифицировать как  $LE_{11}$ . В отличие от обычных волноводов с потерями в стенках, дисперсионные характеристики волны в волноводе с резистивной пленкой имеют плавный характер. При переходе через

частоту, соответствующую критической для волновода без резистивной пленки, отсутствует скачок дисперсионных характеристик.

На рис. 3 показаны зависимости фазовых характеристики и характеристик затухания от величины проводимости пленки при диэлектрической проницаемости подложки  $\epsilon = 2$ .

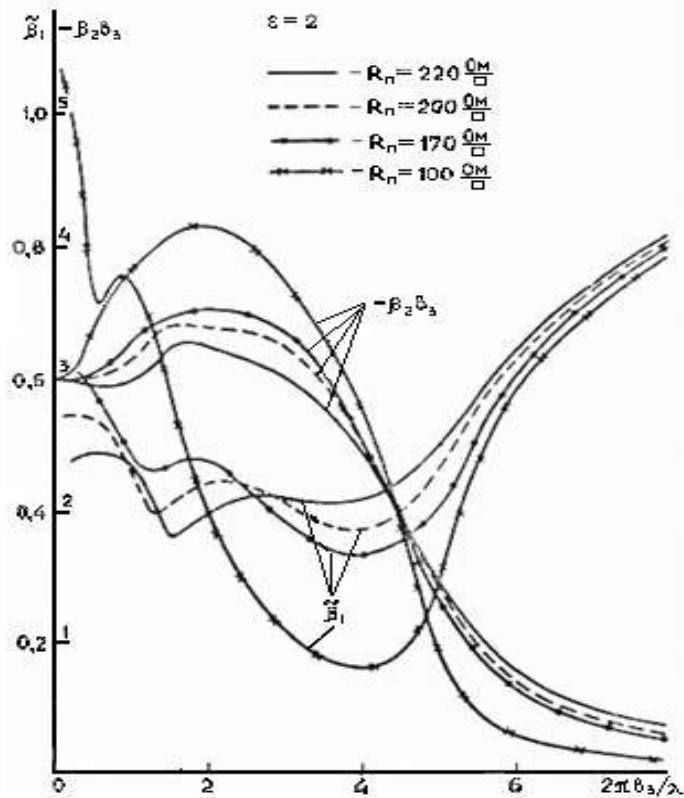


Рис. 3. Зависимость фазовых характеристик и характеристик затухания от величины удельного поверхностного сопротивления пленки

Наибольший интерес при создании аттенюаторов представляет зависимость постоянной затухания от частоты. У волны  $LE_{11}$  она имеет два характерных участка. В пределах значений  $2\pi b_3/\lambda$  от нуля до 3,5 участок кривой относительно пологий, далее начинается резкое уменьшение затухания, связанное с концентрацией поля в диэлектрике. При  $2\pi b_3/\lambda \approx 4$  кривые с разными удельными поверхностными сопротивлениями пленки  $R_n$  ( $R_n = 1/\Delta\sigma$ ) пересекаются. До этой точки большее затухание наблюдается у волн в волноводе с пленкой, имеющей  $R_n = 100 \text{ Ом/кв}$ . На более высоких частотах затухание больше в волноводе с пленкой меньшей проводимости. Это можно объяснить тем, что на высоких частотах у рассматриваемой волны продольные токи начинают преобладать над поперечными, и в эквивалентной электрической схеме направляющей системы резистивную пленку можно рассматривать как последовательно включенное сопротивление.

Из приведенных графиков видно, что можно подобрать такое  $R_n$  пленки, при котором постоянная затухания практически не будет зависеть от частоты в достаточно широкой полосе частот.

Расчеты, проведенные при различных значениях диэлектрической проницаемости подложки (при удельном поверхностном сопротивлении пленки ( $R_n = 200 \text{ Ом/кв}$ ), показали, что величина диэлектрической проницаемости подложки влияет на характеристики затухания лишь на высоких частотах ( $2\pi b_3/\lambda \approx 7$ ).

#### 4. Возбуждающее устройство аттенюатора

Для расчета возбуждающего устройства аттенюатора необходимо решение дифракционной задачи для стыка полосковой линии (рис. 2, *а*) и двухслойного прямоугольного волновода с резистивной пленкой (рис. 2, *б*), которую можно решить методом частичных областей.

Исходя из опыта разработки широкополосных коаксиальных аттенюаторов [1, 2] была выбрана величина удельного поверхностного сопротивления тонкой резистивной пленки в пределах  $R_{\Pi} \in [90 \div 120]$  Ом/□, которая обеспечивала аттенюаторам наименьшую частотную зависимость ослабления.

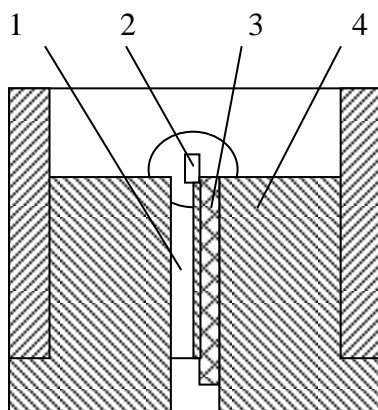
Ширина  $2a_1$  (рис. 2, *а*) центрального проводника полосковой линии выбиралась из условия обеспечения волнового сопротивления 50 Ом с учетом толщины  $b_1$  и величины  $\epsilon_1$  диэлектрической подложки линии.

Относительная толщина  $(b_2 - b_1)/b_3$  (рис. 2, *а*) центрального проводника полосковой линии, который одновременно является возбуждающим устройством аттенюатора, подбиралась экспериментально. Оказалось, что согласование линии с участком волновода с пленкой улучшается с уменьшением толщины центрального проводника экранированной полосковой линии. Высокую степень согласования можно расценивать как наличие оптимального возбуждения поля в поглощающей структуре аттенюатора. Наилучшее согласование достигалось при соотношении  $(b_2 - b_1)/b_3 \approx 0,03$  и при ширине  $2a_1$  возбуждающего электрода (полоска линии)  $2a_1/b_3 \approx 1,0$ .

Величина КСВН стыка экранированной полосковой линии и прямоугольного волновода с резистивной пленкой совместно с коаксиально-полосковым переходом в диапазоне частот до 18 ГГц составляла  $1,5 \div 2,0$ .

Результаты проведенных исследований использованы в НИИПИ «Кварц» при разработке фиксированных полосковых аттенюаторов, а также при расчете ячеек-ослабителей широкополосных ступенчатых аттенюаторов [11].

Разновидностью фиксированного аттенюатора на полосковой линии является аттенюатор, предложенный в [12]. У него более равномерная амплитудно-частотная характеристика. Фиксированный аттенюатор на базе несимметричной полосковой линии в упрощенном виде показан на рис. 4.



**Рис. 4. Аттенюатор на несимметричной полосковой линии с равномерной АЧХ**

В разрыв центрального проводника 2 включен пластинчатый резистор. В основании 4 линии выполнен паз 1 глубиной, равной четверти длины волны верхней частоты. В нем размещен пластинчатый резистор 3, примыкающий диэлектрической подложкой к одной из боковых поверхностей паза и имеющий гальванический контакт с основанием линии.

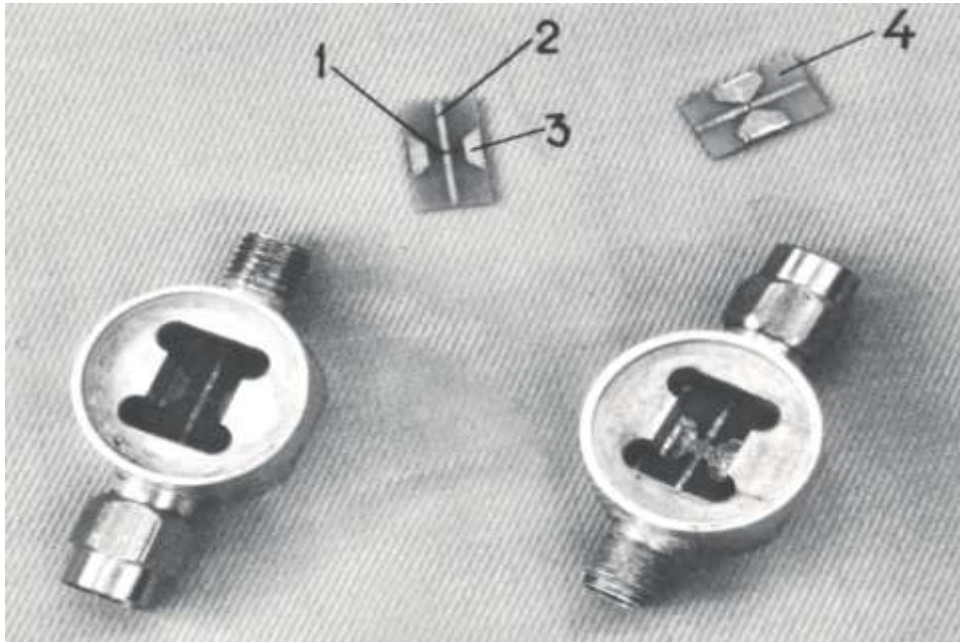
Благодаря такому размещению достигается максимальная связь поглощающего слоя резистора с распространяющейся по линии квази-Т волной на верхнем участке рабочего диапазона. Вследствие этого уменьшается частотная зависимость ослабления.

### 5. Атенюаторы на микрополосковой линии передачи

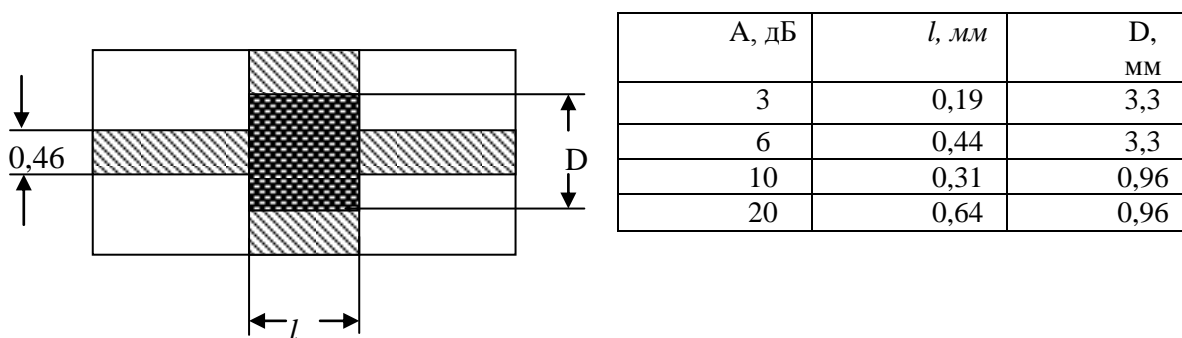
Дальнейшее развитие полосковых аттенюаторов нашло в разработке фиксированных аттенюаторов на микрополосковых линиях передачи СВЧ и КВЧ диапазонов [13].

Внешний вид одного из первых микрополосковых аттенюаторов, разработанных в НИИПИ «Кварц», со снятой верхней стенкой прямоугольного экранирующего корпуса показан на рис. 5, а. Величины ослаблений аттенюатора составляют 3, 6, 10 и 20 дБ.

Необходимые для подсоединения к внешней коаксиальной линии высокочастотные разъемы аттенюатора имеют сечение 3,5/1,52 мм. Для получения заданного волнового сопротивления 50 Ом геометрические размеры линии рассчитаны по формулам [14]. Расчет допусков размеров резистивного слоя проведен в соответствии с [15].



а)



б)

Рис. 5. Внешний вид микрополоскового аттенюатора (а) и основные размеры пластинчатых резисторов (б)

На рис. 5, б показаны основные размеры пластинчатого резистора. Величина удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя – около 100 Ом/□. Резистор 1 и проводники 2, 3 нанесены методом тонкопленочной технологии на плату 4 из поликора ( $\epsilon=9,6$ ) толщиной 0,5 мм. Особую сложность при разработке и сборке подобных аттенуаторов составляют коаксиально-полосковые переходы [16].

В диапазоне от постоянного тока до 12 ГГц аттенуаторы имеют незначительную (порядка  $\pm 0,5$  дБ) частотную зависимость ослабления при КСВН не более 1,4; в диапазоне до 26 ГГц частотная зависимость увеличивается при КСВН  $\leq 1,8$ . Для аттенуаторов с ослаблением 20 дБ эта зависимость составляет до 2–4 дБ.

Размещение пластинчатого резистора на плоском основании полосковой линии увеличивает рассеиваемую мощность сигнала не менее чем в 2–3 раза по сравнению с коаксиальными аттенуаторами.

Аттенуаторы на полосковых и микрополосковых линиях нашли широкое применение в составе СВЧ и КВЧ гибридных интегральных схем для развязки и согласования различных полосковых устройств (усилителей, генераторных головок, смесителей, разветвителей мощности и т.д.), а также в виде отдельных фиксированных и ступенчатых аттенуаторов в широкополосных системах для измерения частотных и импульсных характеристик радиотехнических устройств.

#### Библиографический список

1. **Шишков, Г.И.** Широкополосные фиксированные аттенуаторы // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. №1(86). С. 11 – 21.
2. **Рудоясова, Л.Г.** Тонкие резистивные пленки в устройствах СВЧ и КВЧ/ Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков, В.В. Щербаков // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева.- Нижний Новгород, 2012. №4(97). С. 21 – 32.
3. **Бунтилов, В.М.** Улучшение параметров аттенуаторов с пластинчатым резистором / В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков // Обмен опытом в радиопромышленности. 1970. Вып. 3. С. 88 – 90.
4. А.С. 240789 СССР. Фиксированный аттенуатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
5. **Никольский, В.В.** Класс математических моделей электродинамических систем с частично экранированными границами диэлектрических областей // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. №4. С. 657–669.
6. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1974. Т.17. № 11. С. 1703 – 1706.
7. **Аржанов, С.Н.** Алгоритм для расчета экранированных полосковых линий / С.Н. Аржанов, С.А. Маркова, С.Б. Раевский, В.Я. Сморгонский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1979. Т. 22. № 9. С. 23 – 28.
8. **Аржанов, С.Н.** Алгоритм для расчета экранированных полосковой, щелевой и копланарной линий / С.Н. Аржанов, С.А. Маркова, С.Б. Раевский, Е.П. Тимофеев // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1981. Т.24. № 9. С. 37 – 42.
9. **Егоров, Ю.В.** Частично заполненные прямоугольные волноводы / Ю.В. Егоров. – М.: Сов. радио. 1967. – 216 с.
10. **Рудоясова, Л.Г.** Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой / Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 1. С. 43 – 46.
11. **Шишков, Г.И.** Широкополосные ступенчатые аттенуаторы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. №2(87). С. 11 – 19.
12. А.С. 866617 СССР. Фиксированный аттенуатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Б.И. 1981. № 35.
13. **Шишков, Г.И.** Исследование аттенуаторов на полосковых линиях, используемых в автоматизированных измерительных приборах / Г.И. Шишков, О.И. Раевская, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 4. С. 72 – 74.
14. **Ганстон, М.А.Р.** Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / М.А.Р. Ганстон. – М.: Связь. 1976. – 150 с.

15. **Горячев, Ю.А.** Анализ тонкопленочных резистивных элементов / Ю.А. Горячев, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 6. С. 52 – 57.
16. **Майстренко, В.К.** Расчет волноводно-полосковых и коаксиально-полосковых переходов / В.К. Майстренко, А.А. Радионов, В.В. Щербаков // Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ. Сер.: Высокие технологии в радиоэлектронике. 1997. Вып.1(3). С. 60–65.

*Дата поступления  
в редакцию 07.02.2013*

**L.V. Kogteva<sup>1</sup>, A.E. Livov<sup>2</sup>, L.G. Rudoyasova<sup>1</sup>, G.I. Shishkov<sup>1</sup>, V.V. Sherbakov<sup>1</sup>**

### **ATTENUATORS ON STRIP LINE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,  
Nizhny Novgorod Research Institute for the Instrument "Quartz" n.a. A.P. Gorshkov

**Purpose:** It is described physical bases of the work and are given technical features broadband attenuator on strip line.

**Design/methodology/approach:** The Basic researches round, strip and microstrip linewidth resistive films, were conducted on base of the method of the partial areas with use the method of the surface current.

**Findings:** The Attenuators on strip and microstrip line has found broad using in composition SVCH and KVCH hybrid integral schemes for uncoupling and co-ordinations different strip device (the amplifiers, source of the heads, mixers, divisors to powers and etc), as well as in the manner of separate fixed and discrete attenuator in broadband system for measurement frequency and pulsed features radiotechnology device.

**Research limitations/implications :** At calculation waveguidesfeatures of the considered structure was expected that fine consuming layer evenly portioned on surfaces of the substrate. However practically this far from is always executed. On degree of the uniformities of the sharing the film affects the technological process of the fixing layer and his tailorings, quality to surfaces of the substrate and other factors.

**Originality/value:** Within the range of from direct current before 12 GGC attenuators have small (the order 0,5дБ) frequency dependency weakenings under KSVN not more than 1,4; within the range of before 26 GGC frequency dependency it increases under KSVN not more than 1,8. For attenuator with weakening 20 db this dependency forms before 2-4 db aside weakenings.

*Key words:* the attenuators, strip lines, lamellar resistors.

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

Л.Н. Орлов, П.С. Рогов, А.В. Тумасов

### ВЫБОР БЕЗОПАСНОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ КУЗОВА НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОБУСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся алгоритм и программа расчета силовых сечений кузова по разрушающим нагрузкам в условиях опрокидывания автобуса. Дано обоснование применения стержневых конечно элементных моделей на ранних этапах оценки пассивной безопасности автобусов. На примере секций типового кузова автобуса выполнена сравнительная оценка значений энергоемкостей при динамическом и эквивалентном квазистатическом нагружении.

*Ключевые слова:* пассивная безопасность, конечно-элементный анализ, опрокидывание, квазистатическая нагрузка, проектирование автобуса.

Повышению безопасности дорожного движения и уменьшению тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) всегда уделяется большое внимание. Из возможных типов дорожных происшествий с участием автобусов, последствия их опрокидывания оказываются самыми тяжелыми. Это подтверждают и проведенные ранее исследования [1-2]. Поэтому оценка пассивной безопасности автобусов при опрокидывании с уступа высотой 0,8 м, в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №66, является основным регламентирующим требованием на данный момент (рис. 1, а). При этом в Правилах ЕЭК ООН №66 предусмотрена возможность проведения оценки посредством квазистатического нагружения кузова (рис. 1, б), а также по результатам расчетов и компьютерного моделирования.

В данной работе рассматривается процесс оценки несущей способности каркасов кузовов автобусов на ранней стадии проектирования с применением инженерного метода расчета по предельному состоянию [3], и метода конечных элементов в динамической и квазистатической нелинейных постановках.



Рис. 1. Экспериментальные методы оценки пассивной безопасности автобусов:  
а – опрокидывание с уступа; б – квазистатическое нагружение

С помощью инженерного метода можно воспроизвести условия квазистатического нагружения сосредоточенной силой секции или силового сечения кузова. В качестве уравнения равновесия этот метод использует принцип равенства работ внешних и внутренних усилий на возможных вариациях перемещений, который в случае действия одной аварийной нагрузки может быть представлен в следующем виде

$$F_p \delta S = \sum_{i=1}^{n+1} M_{пл,i} \delta \theta_i, \quad (1)$$

где  $S$  - перемещение (деформация) конструкции по направлению действия внешней силы  $F_p$ ;  $M_{пл}$  - предельный пластический изгибающий момент;  $\theta_i$  - угол относительного поворота силовых элементов в  $i$ -м пластическом шарнире;  $n$  - степень статической неопределимости схемы (рис. 2).

Всю конструкцию каркаса автобуса можно разбить на отдельные силовые сечения, на каждое из которых будет действовать сосредоточенная сила. Суммарная разрушающая нагрузка на кузов в этом случае складывается из разрушающих нагрузок, полученных для отдельных плоских схем силовых сечений.

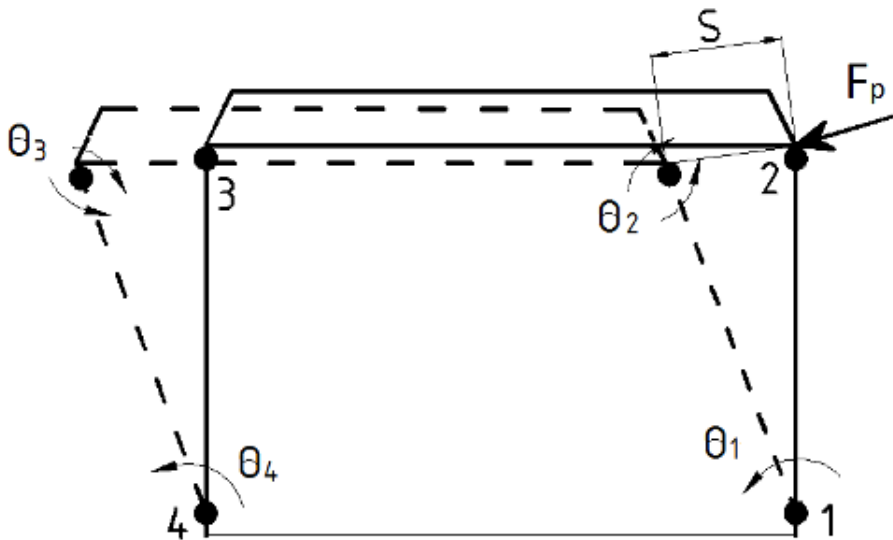


Рис. 2. Пример расчетной схемы силового сечения кузова и ее механизма разрушения; 1...4 - характерные узлы; ● - обозначение пластических шарниров

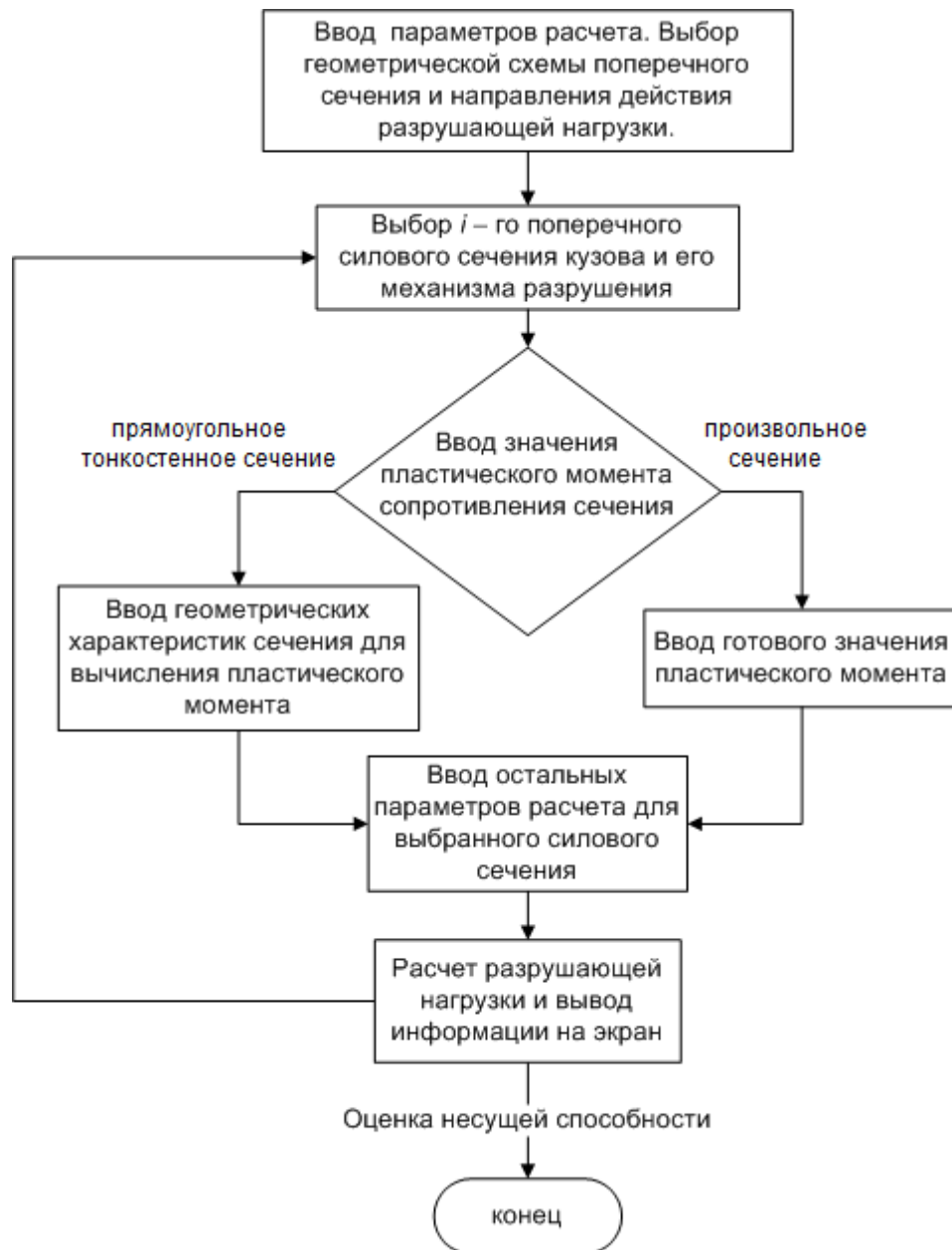
С целью автоматизации расчета несущей способности по разрушающим нагрузкам силовых сечений кузова автобуса, разработана программа на языке программирования VBA, блок схема которой приведена на рис. 3. С помощью этой программы автоматизируется определение выражений углов поворота в пластических шарнирах  $\theta_i$  и подстановка их в основное уравнение (1), а также определение значений разрушающих нагрузок путем подстановки в это уравнение числовых данных параметров конструкции для каждого силового сечения. В первом диалоговом окне происходит задание предела текучести ( $\sigma_T$ ) и угла наклона вектора силы ( $\alpha$ ) (рис. 4, а). Далее нужно выбрать направление приложения силы (горизонтальное под углом или вертикальное) и тип геометрической схемы силового сечения автобуса (рис. 4, б). Затем выбирается механизм разрушения. На рис. 4, в приведено диалоговое окно, в котором осуществляется выбор механизма разрушения. На примере двух рассматриваемых геометрических схем, которые являются наиболее характерными, рассмотрены все возможные варианты механизмов разрушения для средней, передней и задней секций кузова. Они учитывают также восприятие нагрузки раскосами боковин. Рассмотрен вариант конструкции передней секции с наличием вертикальной стойки в проеме лобового окна.

Далее для выбранного механизма необходимо ввести основные параметры расчета



(рис. 4, з). В этом диалоговом окне приведено итоговое выражение предельной разрушающей нагрузки, отображающее её зависимость от вводимых параметров конструкции. Более наглядно зависимость для схемы показана в следующем выражении:

$$F_p l_{1-2} \theta \cos \alpha = \sigma_T [W_I + W_{II} (1 + \frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) + W_{III} (\frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) (1 + \frac{l_{3-c}}{l_{3-4}}) + W_{IV} (\frac{l_{1-2}}{l_{c-2}}) (\frac{l_{3-c}}{l_{3-4}})]. \quad (2)$$



**Рис. 3. Блок - схема программы расчета несущей способности силовых сечений кузова автобуса по разрушающим нагрузкам**

Подобные зависимости получены для всех возможных схем поперечных сечений кузовов автобусов и механизмов их разрушения. Они являются основой алгоритма расчета разрушающих нагрузок и выбора безопасных силовых схем кузовов, заложенного в разработанную программу. При выборе безопасной силовой схемы кузова необходимо ориентироваться на поиск такого механизма его разрушения, при соответствующем распределении размеров сечений элементов, который обеспечивал бы разрушающую нагрузку, превышающую регламентированное значение. В том случае, если выполняется

оценка пассивной безопасности уже спроектированной конструкции, следует определить действительный механизм ее разрушения по минимальному значению разрушающей нагрузки из всех полученных  $A_i$  для возможных механизмов разрушения:

$$F_p = \min F_{pi} \{A_1 \dots A_n\} \quad (3)$$

Если это значение меньше регламентированного, то можно с уверенностью говорить, что данная конструкция не отвечает требованиям пассивной безопасности. А если больше, то окончательную оценку можно сделать только после уточненного расчета с использованием подробной конечно-элементной модели кузова. Инженерный метод целесообразно применять на начальном этапе проектирования, когда выбирается безопасная силовая схема кузова. После этого, по мере разработки его каркаса и панелей, формируется геометрическая модель кузова, на основе которой создаются комбинированная и подробная конечно-элементные модели [4].

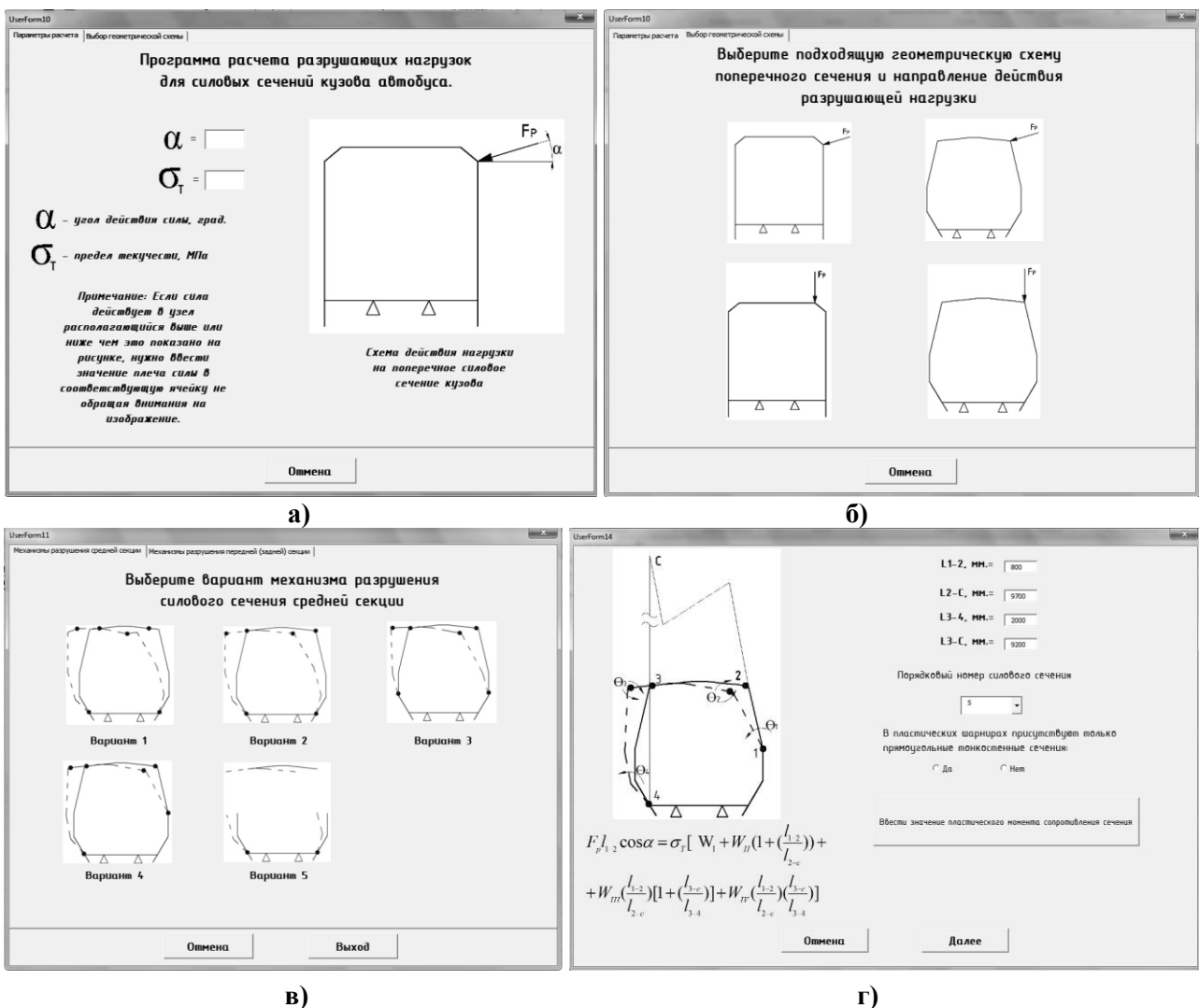
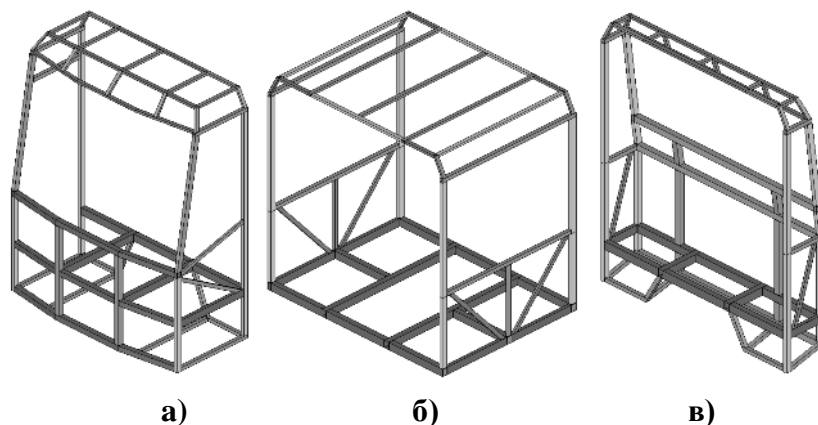


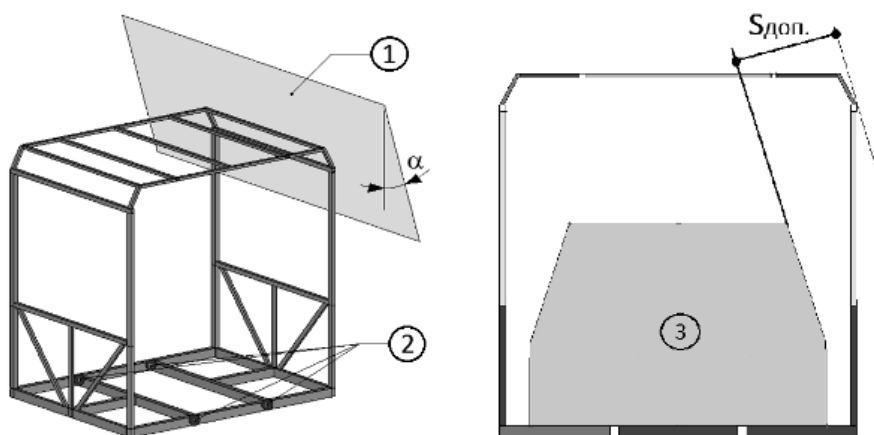
Рис. 4. Диалоговые окна программы расчета

С целью обоснования применения стержневых конечно-элементных моделей, а также оценки влияния скорости нарастания внешней нагрузки на энергоемкость конструкции были проведены специальные расчетные исследования. В качестве объектов исследований взяты передняя, средняя и задняя секции кузова автобуса (рис. 5). Для них разработаны два варианта конечно-элементных моделей: *стержневые* и *подробные*.

Условия нагружения для рассматриваемых моделей выбраны идентичными. Они нагружались движущейся поступательно жёсткой плитой с заданным перемещением на величину допускаемой деформации  $S_{\text{доп.}}$ . Каждая модель закреплялась по основанию в нескольких зонах. Угол  $\alpha$  между жёсткой плитой и секцией выбирается в соответствии с кинематикой опрокидывания автобуса с уступа высотой 0,8 м. Движение жёсткой плиты ограничивалось зоной остаточного пространства (рис. 6).



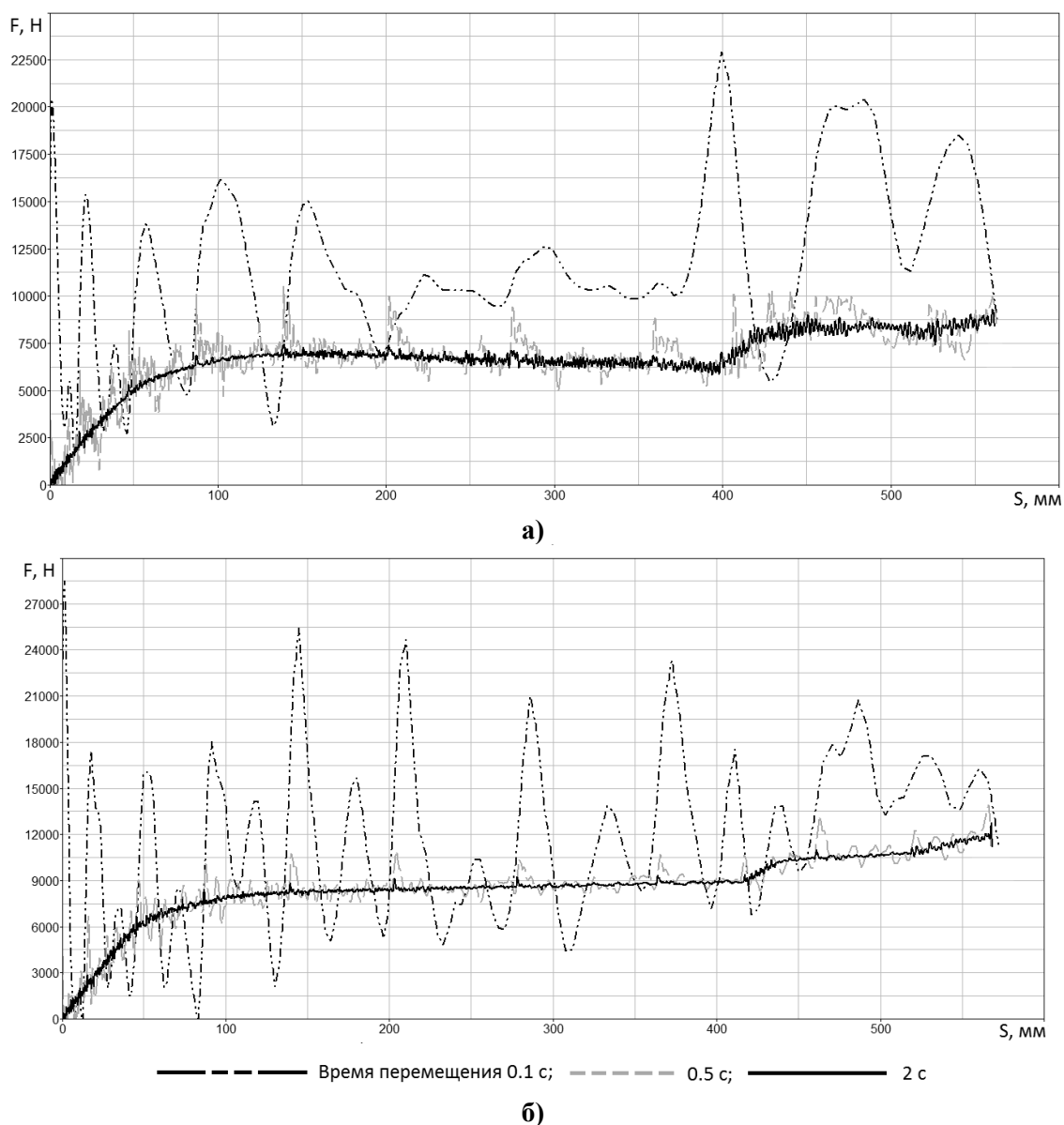
**Рис. 5. Секции каркаса кузова автобуса:**  
а – передняя; б – средняя; в – задняя



**Рис. 6. Схема нагружения расчетной модели:**  
1 - жесткая плита; 2 - расположение внешних опор; 3 - зона остаточного пространства безопасности;  
 $S_{\text{доп.}}$  - допускаемая деформация

Рассмотрено три варианта перемещения жесткой стенки на заданное расстояние, соответственно за время 0,1, 0,5, и 2 с. Возможное различие энергоемкостей моделей при квазистатическом и динамическом нагружениях заметно из сравнения уравнений равновесия для этих постановок. При статическом расчете внешняя нагрузка вызывает только перемещение узлов системы. При динамическом анализе кроме усилий обусловленных перемещениями, в уравнении присутствуют усилия, вызванные демпфированием конструкции и действием инерционных сил. Очевидно, что при ударе конструкции жесткой плитой, различие в энергоемкостях зависят от скорости ее движения, массы конструкции, и параметров вязкости материала. Для того, чтобы оценить порядок различия значений энергоемкости при динамическом и квазистатическом нагружении, имитирующих условия опрокидывания автобуса, был проведен сравнительный анализ. Сравнение выполнено посредством сопоставления графиков изменения разрушающей нагрузки в зоне контакта ударной плиты с конструкцией

(рис. 7). В табл. 1 приведены значения энергоемкостей секций, полученные при различных скоростях перемещения жесткой плиты. Заметно, что скорость нарастания нагрузки влияет также и на расхождение результатов между различными типами моделей - с увеличением времени перемещения расхождение становится более существенным.



**Рис. 7. Графики изменения усилия в зоне контакта в зависимости от перемещения жёсткой плиты, полученные для передней секции:**  
*a* - подробная модель; *б* - стержневая модель

Анализируя количественное значение полученных отклонений, можно сделать вывод, что разница энергоемкостей на 40% между результатами для времени 0,1 и 2 с перемещений плиты подтверждается зависимостью поглощаемой конструкцией энергии от скорости нарастания нагрузки. При опрокидывании автобуса скорость ударного нагружения близка по значению к скорости перемещения плиты на заданное расстояние за время 0,5 с. Энергия, полученная при квазистатическом нагружении, отличается от величины, полученной для времени перемещения 0,5 с в среднем на 3%. Этот результат требует дальнейшего уточнения, так как в рассматриваемых моделях не задавались характеристики демпфирования, и масса секций существенно отличалась от их массы в составе полнокомплектного автобуса.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что при сни-

жении скорости нарастания внешней нагрузки расчетная энергоемкость конструкции снижается. Поэтому использование квазистатических расчетов при проектировании может привести к получению завышенных значений энергоемкости.

С применением программы расчета несущей способности отдельных секций, временные затраты на получение и расчет уравнений разрушающей нагрузки значительно сокращаются. Это делает программу полезной на этапе выбора безопасной силовой схемы кузова, когда за короткие сроки нужно проанализировать несколько вариантов конструкции.

Таблица 1

## Значения энергоемкости стержневых и подробных моделей секций

Время перемещения жесткой стенки, с.	Энергоемкость, Дж								
	Передняя секция			Средняя секция			Задняя секция		
	Подробная	Стержневая	Расхождение, %	Подробная	Стержневая	Расхождение, %	Подробная	Стержневая	Расхождение, %
0,1	3877	4079	5,2	5660	6049	7	3072	3574	16
0,5	2392	2960	23,7	3199	3474	8,58	2381	2976	25
2	2306	2907	26	3081	3366	9,25	2327	2965	27,4

Отклонение результатов, полученных для различных типов моделей, не превышает 28%, что позволяет использовать стержневые модели каркаса кузова автобуса на ранних стадиях проектирования. Сравнительная оценка результатов расчетов разрушающих нагрузок инженерным методом с использованием стержневых моделей с данными испытаний [5], а также с результатами нелинейного конечно-элементного анализа показывает, что они имеют завышенное, примерно на 30%, значение. Это необходимо учитывать при выборе безопасных силовых схем проектируемых конструкций. На этапе доводки кузова отдельные части конструкции могут моделироваться с помощью стержневых элементов, при условии, что потеря формы сечений в этих силовых элементах незначительна и не будет влиять на характер механизма разрушения. На окончательном этапе проектирования целесообразно использовать подробную модель кузова, состоящую из оболочек.

## Библиографический список

1. **Sándor, Vincze-Pap.** Solutions and problems to be solved in bus/coach safety, *10th EAEC European Automotive Congress*. – Paper EAEC05YU-PS02 - Page 11.
2. **Kadir, Elitok.** Guler and Bertan Byram / Elitok Kadir, A. Mehmet //An Investigation on the Rollover Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight, *9<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference*, June, Dearborn, Michigan, USA, 2006.
3. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин автотранспортных средств. Методы расчета и оценки: учеб. пособие / Л.Н. Орлов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.
4. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.] / под ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 153 с.

5. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2005. – 130 с.

*Дата поступления  
в редакцию 17.01.2013*

**L.N. Orlov, P.S. Rogov, A.V. Tumasov**

**CHOICE OF A SAFE BODY STRUCTURE ON THE EARLY STAGES  
OF BUSES DESIGNING**

Nizhny Novgorod state technical university named after R.Y. Alexeev

**Purpose:** Comparative evaluation of dynamic and quasi-static loading, that simulate a rollover condition.

**Design/methodology/approach:** Investigation is based on finite element method with using different element types, and analytical method that includes some simplification and assumption.

**Findings:** During the study, the program for calculation of bearing capacity based on above-mentioned analytical method, was received.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research of bus bearing capacity on different stages of it designing.

**Originality/value:** As result of this research, the deviation between the results of dynamic and equivalent by energy quasi-static loading that was applied to the bus body sections, was obtained.

*Key words* :passive safety, finite element simulation, rollover accident, quasi-static loading, bus designing.

УДК 623113

Н.А. Кузьмин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина

**ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ STRUCTURAL INTENSITY ANALYSIS ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ АВТОМОБИЛЯ**

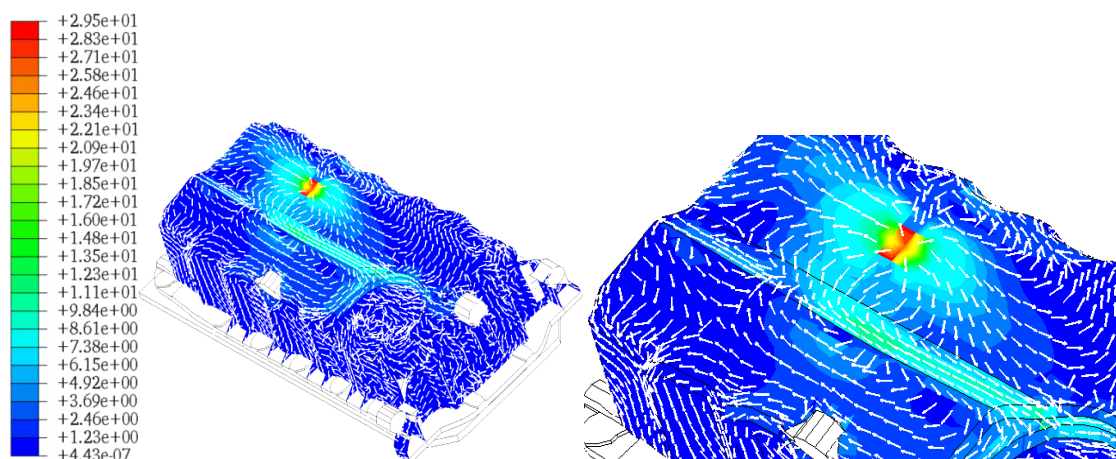
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В данной статье представлена система численного моделирования и визуализации Structural Intensity Analysis, базирующаяся на методе конечно элементных моделей (FEM-models). Приведена математическая формулировка структурной интенсивности, система численного моделирования осуществлена в программном пакете ANSYS, техника визуализации векторных полей потока энергии осуществлена в программном пакете HyperView. Рассчитаны и показаны в структуре shell-элементов: векторы интенсивности, карта потоков и распределение механической энергии колебаний. Рассмотрены случаи использования различных возбудителей гармонических колебаний (точечной силы и давления на несколько элементов) и применения различных коэффициентов поглощения колебаний структурой. Используя разработанную систему, был осуществлен Structural Intensity Analysis рулевой колонки автомобиля Volkswagen, визуализированы поля структурной интенсивности на глобальной поверхности и исследованы доминантные пути потока энергии. Structural Intensity Analysis, вместе с техникой его визуализации, представляет собой мощный инструмент для контроля над вибрацией и шумом.

*Ключевые слова:* Structural Intensity Analysis, рулевая колонка автомобиля, виброакустическое поведение, FEM-моделирование, шум и вибрация, надежность систем автомобиля.

**Введение**

В связи с все более ужесточающимися требованиями к качеству автомобилей и возрастающими ожиданиями клиентов в отношении комфорта, исследование и контроль вибрации и акустического поведения продуктов автомобильной промышленности стало важным критерием в процессе их разработки. Для дальнейшего усовершенствования в конструкции транспортного средства и его составляющих, с учетом акустических характеристик, а также повышения надежности автомобиля при воздействии вибрационных нагрузок, необходимо использовать инновационные технологии на этапе его расчета и FEM-анализ модели [1].

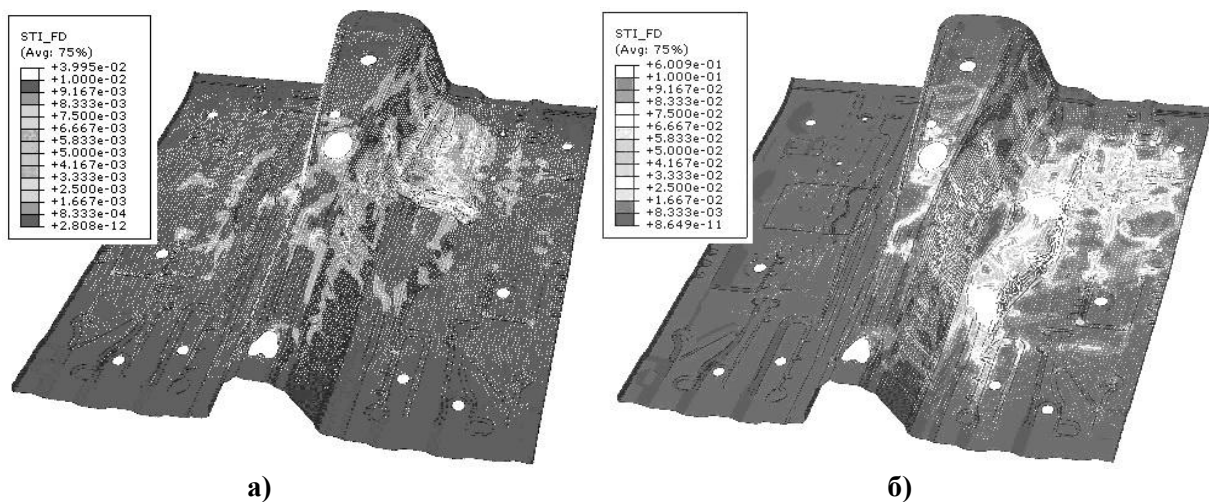


**Рис. 1. Активная Структурная Интенсивность при второй резонансной частоте. Масленный поддон двигателя, Дармштадский технический университет, 2012**

Для ограничения использования дорогостоящих и трудоемких тестовых образцов до минимума, виртуальные прототипы приобрели важное значение в последние годы.

Так как виброакустическое поведение продукта в основном определяется поведением вовлеченных механических структур, мы должны сосредоточиться на численном прогнозировании этого поведения. Реализация разработок в вибрационном поведении автомобиля и его частей требует детального знания динамических процессов возбуждения и излучения звука в структуре. Существует целый ряд численных методов, используемых для структурно-динамического анализа (Structural Dynamic Analysis) автомобильных структур экспериментально или в технике FEM-моделирования. Но ни один из них не может снабдить нас достаточно точной информацией о волновом потоке в структуре, который производит шум и вибрацию.

Structural Intensity Analysis (Анализ Структурной Интенсивности) – это новый шаг в анализе виброакустического поведения моделей, наиболее эффективная методика определения и контроля вибрации. Данный уникальный метод позволяет детально рассмотреть поток от точки возбуждения вибрации в структуре до точки ее поглощения. Анализ Структурной Интенсивности позволяет рассчитать поток колебательной энергии в пределах структуры, основываясь на методе конечных элементов, и визуализировать его в векторном виде. Составляющие потока энергии могут быть разбиты на отдельные компоненты вибрации, такие как поперечные и продольные волны [2].



**Рис. 2. Активная Структурная Интенсивность на модели с закреплением некоторых элементов (а) и свободной (б). Пол автомобиля, BMW-групп и Дармштадский технический университет, ААС конференция 2011**

Знаний, полученные при использовании Structural Intensity Analysis, могут быть использованы для снижения или перенаправления потока энергии в целевых районах с высокой интенсивностью для обеспечения оптимального вибрационного поведения продукции.

### **Теоретические основы Структурной Интенсивности**

Термин Структурная Интенсивность и ее математическое определение были введены впервые Нойзеуксом [3] и Павиком [4] в 70-х годах прошлого столетия с целью расширения описания вибрационных явлений в структуре с применением векторных полей.

Структурная Интенсивность (Structure Intensity) – это усредненный во времени поток чистой механической энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока. Интерес к исследованию Структурной Интенсивности имеет под собой практическое основание - поля интенсивности показывают величину и направление потока колебательной



энергии в любой точке структуры. Техника вибрационной интенсивности не зависит от граничных условий структуры и дает возможность исследовать краевой эффект от передачи вибрационной мощности по структуре [5, 6]. Поля Структурной Интенсивности могут быть визуализированы с помощью векторной карты и предоставляют точную информацию о потоке энергии, доминирующих путях его передачи, положении источников и поглотителей механической энергии. Применение данной техники снабжает нас преимуществом при изучении влияния от добавления диссипативных элементов, изменения механического состава или при активном контроле вибрации.

Структурная Интенсивность выражается как произведение напряжения на поверхностную скорость, и во временной доминанте будет иметь вид:

$$I_i = \langle I_i(t) \rangle = \langle -\sigma_{ij}(t)v_j(t) \rangle, \quad (1)$$

$$I(t) = - \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overline{\sigma_{xx}v_x + \tau_{xy}v_y + \tau_{xz}v_z} \\ \overline{\tau_{yx}v_x + \sigma_{yy}v_y + \tau_{yz}v_z} \\ \overline{\tau_{zx}v_x + \tau_{zy}v_y + \sigma_{zz}v_z} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $I_i$ - это интенсивность в направлении  $i$ ;  $v_i$  - скорость частиц в направлении  $i$ ;  $\sigma_{ij}(t)$  - компонент нормального напряжения.

Колебательная энергия в структурах передается при помощи поперечных сил ( $Q_x$  и  $Q_y$ ), сил в плоскости ( $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_{xy}$ ), крутящих моментов ( $M_{xy}$  и  $M_{yx}$ ). Таким образом, компонент вибрационной интенсивности  $I_x$  в направлении  $x$  записывается в виде:

$$I_x = Q_x \frac{\partial \zeta}{\partial t} - M_x \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t} + M_{xy} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y \partial t} + N_x \frac{\partial \xi}{\partial t} + N_{xy} \frac{\partial \eta}{\partial t}. \quad (3)$$

Эти силы и моменты связаны с поперечным смещением следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_x &= -D \left( \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \zeta}{\partial x \partial y^2} \right); & M_x &= -D \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right); & M_{xy} &= -D(1-\mu) \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y}; \\ N_x &= \frac{Eh}{1-\mu^2} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \mu \frac{\partial \eta}{\partial y} \right); & N_{xy} &= \frac{Eh}{2(1+\mu)} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right); & D &= \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \end{aligned}$$

### Формулировка Структурной Интенсивности для пластины

Из теории тонких пластин предполагается, что смещение, перпендикулярное к средней плоскости пластины, не зависит от соответствующей координаты.

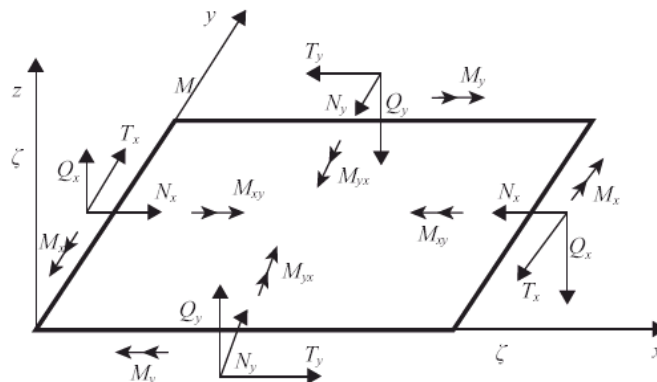


Рис. 3. Элемент пластины с определенными силами и перемещениями

Так же из данной теории следует, что все структурные точки нормали к средней плоскости остаются на прямой после деформации.  $I_x$  в (2) может быть выражена в глобальной системе координат следующим образом:

$$I_x = -\left(\frac{E}{1-\mu^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial \xi_M}{\partial x} + y \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \mu \frac{\partial \xi_M}{\partial z} + \mu \cdot y \frac{\partial \varphi_z}{\partial z}\right) \cdot v_x + G \cdot \left(\varphi_x + \frac{\partial \eta}{\partial x}\right) \cdot v_y + G \cdot \left(\frac{\partial \xi_M}{\partial z} + y \frac{\partial \varphi_x}{\partial z} + \frac{\partial \xi_M}{\partial x} + y \frac{\partial \varphi_z}{\partial x}\right) \cdot v_z, \quad (4)$$

где  $E$  - модуль упругости Юнга;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $G = E / (1 - 2\mu)$  - модуль сдвига;  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  - вращательные перемещения в направлениях  $x$  и  $y$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$  - скорости в  $x$ ,  $y$ ,  $z$  направлениях. На рис. 1 показана положительная ориентация внутренних сил и перемещений.

Гаврич и Павик [6] разработали эквивалентные алгоритмы структурной интенсивности вибрации, которые могут быть реализованы во временной и частотной доменах. Формулировки структурной интенсивности по  $x$  и  $y$  для плоской пластины в частотной домене могут быть выражены следующим образом:

$$I_x = -(\omega/2) \operatorname{Im}[\tilde{N}_x \tilde{u}^* + \tilde{N}_{xy} \tilde{v}^* + \tilde{Q}_x \tilde{w}^* + \tilde{M}_x \tilde{\theta}_y^* + \tilde{M}_{xy} \tilde{\theta}_x^*], \quad (5)$$

$$I_y = -(\omega/2) \operatorname{Im}[\tilde{N}_y \tilde{u}^* + \tilde{N}_{yx} \tilde{v}^* + \tilde{Q}_y \tilde{w}^* + \tilde{M}_y \tilde{\theta}_y^* + \tilde{M}_{yx} \tilde{\theta}_x^*], \quad (6)$$

где  $\tilde{N}_x$ ,  $\tilde{N}_y$  и  $\tilde{N}_{xy} = \tilde{N}_{yx}$  - комплексные мембранные силы на единицу ширины пластины;  $\tilde{M}_x$ ,  $\tilde{M}_y$  и  $\tilde{M}_{xy} = \tilde{M}_{yx}$  - комплексные изгибающие и крутящие моменты на единицу ширины пластины;  $\tilde{Q}_x$  и  $\tilde{Q}_y$  - комплексные поперечные силы сдвига на единицу ширины пластины;  $\tilde{u}^*$ ,  $\tilde{v}^*$  и  $\tilde{w}^*$  комплексно сопряженные поступательные перемещения в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;  $\tilde{\theta}_x^*$  и  $\tilde{\theta}_y^*$  комплексно сопряженные вращательные перемещения в направлениях  $x$  и  $y$ .

### Система моделирования Structural Intensity Analysis

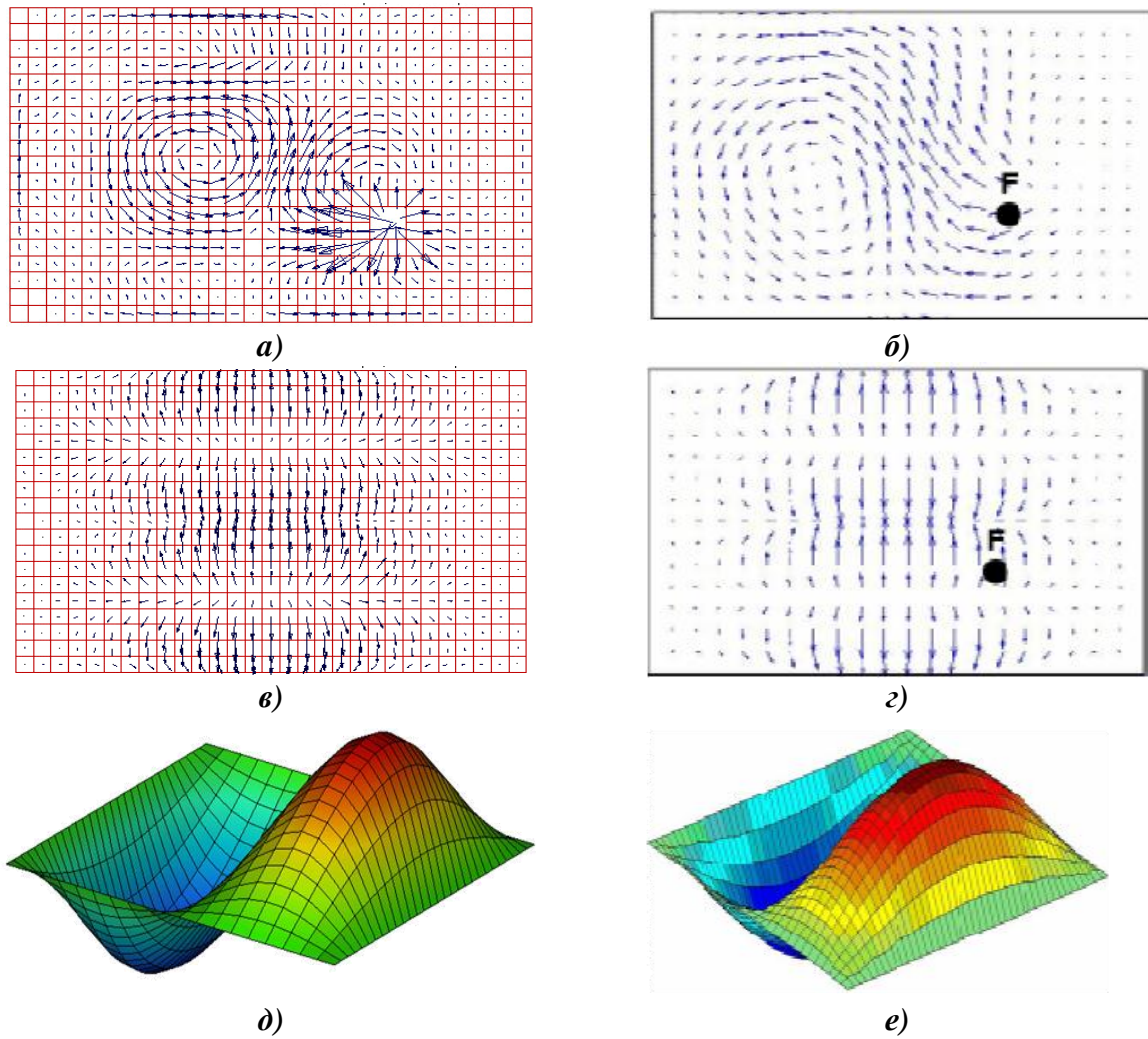
Для эффективного анализа полей структурной интенсивности и их визуализации была разработана система численного моделирования. Система состоит из программы ANSYS для FEM-моделирования и процедуры анализа, и программы HyperView для визуализации полей структурной интенсивности на модели.

С использованием данной системы был произведен Анализ Структурной Интенсивности простой пластины, для верификации процедуры. Затем был произведен анализ рулевой колонки автомобиля, испытывающей вибрационные нагрузки, передающиеся на нее от подвески автомобиля.

### Результаты и визуализация Structural Intensity Analysis для конечно-элементной модели пластины

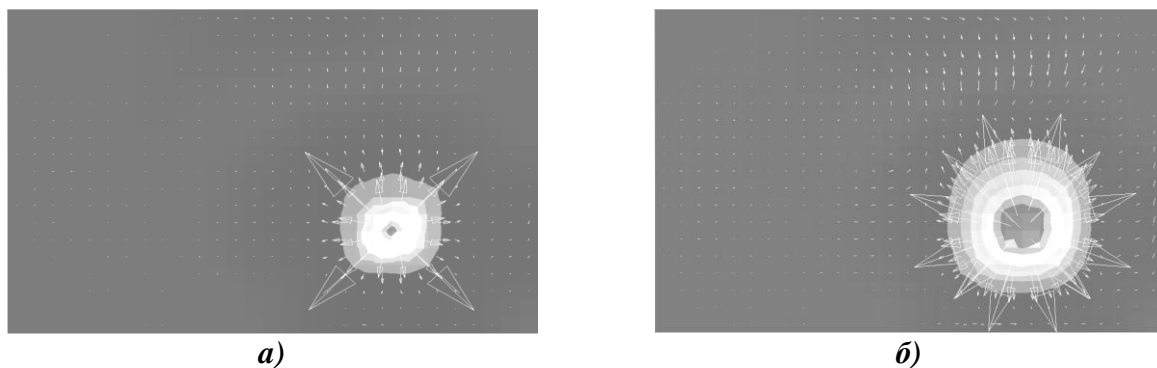
Для пластины были взяты геометрические размеры, граничные условия, частоты возбуждения, свойства материала и условия нагружения, соответствующие параметрам в работе S. Kuhl «Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik», Дармштадский технический университет [7], затем была осуществлена симуляция по разработанной методе. Сравнение Анализа Структурной Интенсивности с предыдущими результатами подтвердило правильность использованного алгоритма.

Пластина смоделирована с помощью стандартных shell-элементов. Затухание представлено как коэффициент демпфирования. Пластина закреплена по краям. Пластина находится под гармоническим возбуждением. Результаты моделирования потока интенсивности в векторной форме показаны на рис. 4.



**Рис. 4.** Сравнение результатов данного исследования (*a, v, d*) с результатам из работы S. Kuhl “Gezielte Leitung von Körperschall unter Zuhilfenahme der Strukturintensitätsrechnung” (*b, z, e*). Векторные поля активной (*a, b*) и реактивной (*v, z*) Структурной Интенсивности, форма изгиба (*d, e*) пластины при третьей натуральной частоте

Точка приложения возбуждающей силы выступает в качестве источника энергии, точка затухания колебаний – в качестве поглотителя энергии, и основной поток энергии проходит путь от точки приложения силы до точки демпфирования.



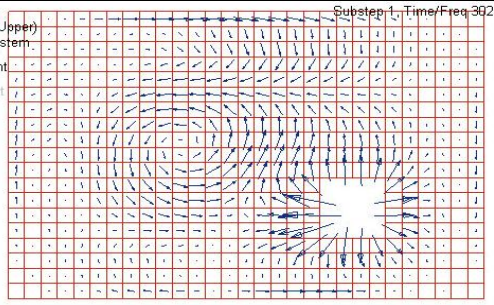
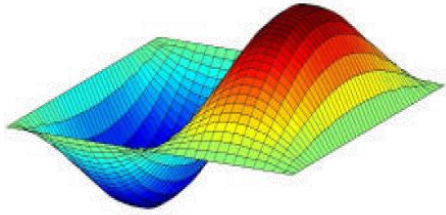
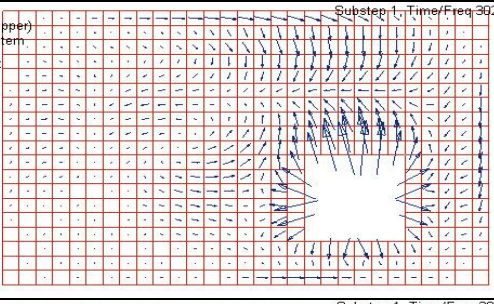
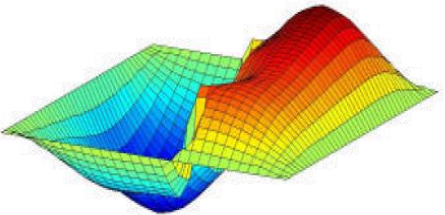
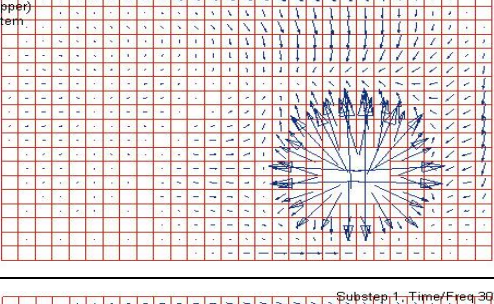
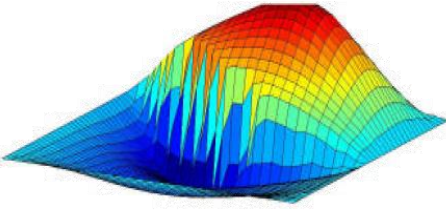
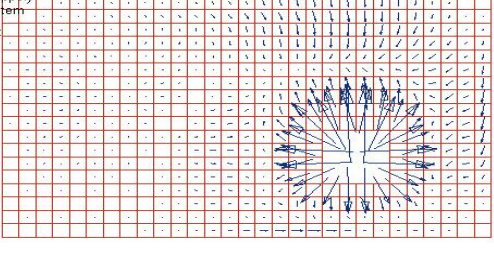
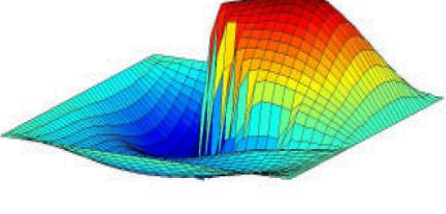
**Рис. 5.** Распределение структурной интенсивности при возбуждении колебаний в пластине при помощи точечной силы (*a*) и давления (*b*). Коэффициент демпфирования 0,6

Из представленных результатов видно, что поток энергии от точки возбуждения (источника энергии) к точке демпфирования (концентратора энергии) может быть четко идентифицирован векторами Структурной Интенсивности.

Было произведено сравнение картин распределения Интенсивностей, вызванных воздействием точечной силы и давлением на несколько элементов пластины, как это представлено на рис. 5. В результате было установлено, что форма векторной картины Структурной Интенсивности не зависит от вида возбуждающей силы, при одинаковом расположении точки различие возбуждения выражается только в величине векторов.

Изучены случаи применения различных демпфирующих коэффициентов. Визуализация результирующих векторных потоков интенсивности энергии приведена в табл. 1. При использовании более высокого коэффициента затухания наблюдается потеря определенных точек демпфирования и поглощение волн всей структурой равномерно.

Таблица 1

Сравнение картин векторных полей Структурной Интенсивности в пластине при различных коэффициентах демпфирования		
		0,1
		0,3
		0,5
		0,6



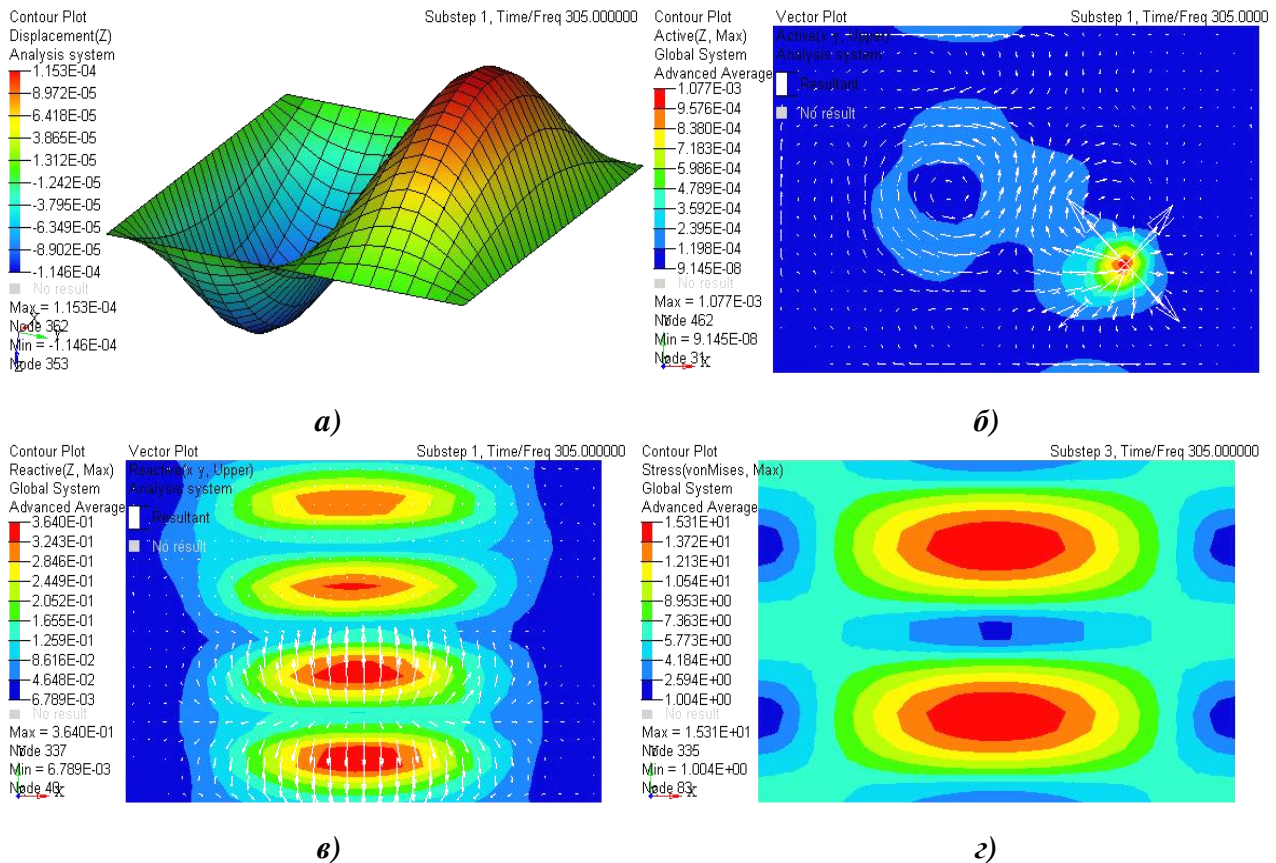


Рис. 6. Структурная интенсивность (а) на пластине; активная (б); реактивная (в); напряжения по фон Мизу (г)

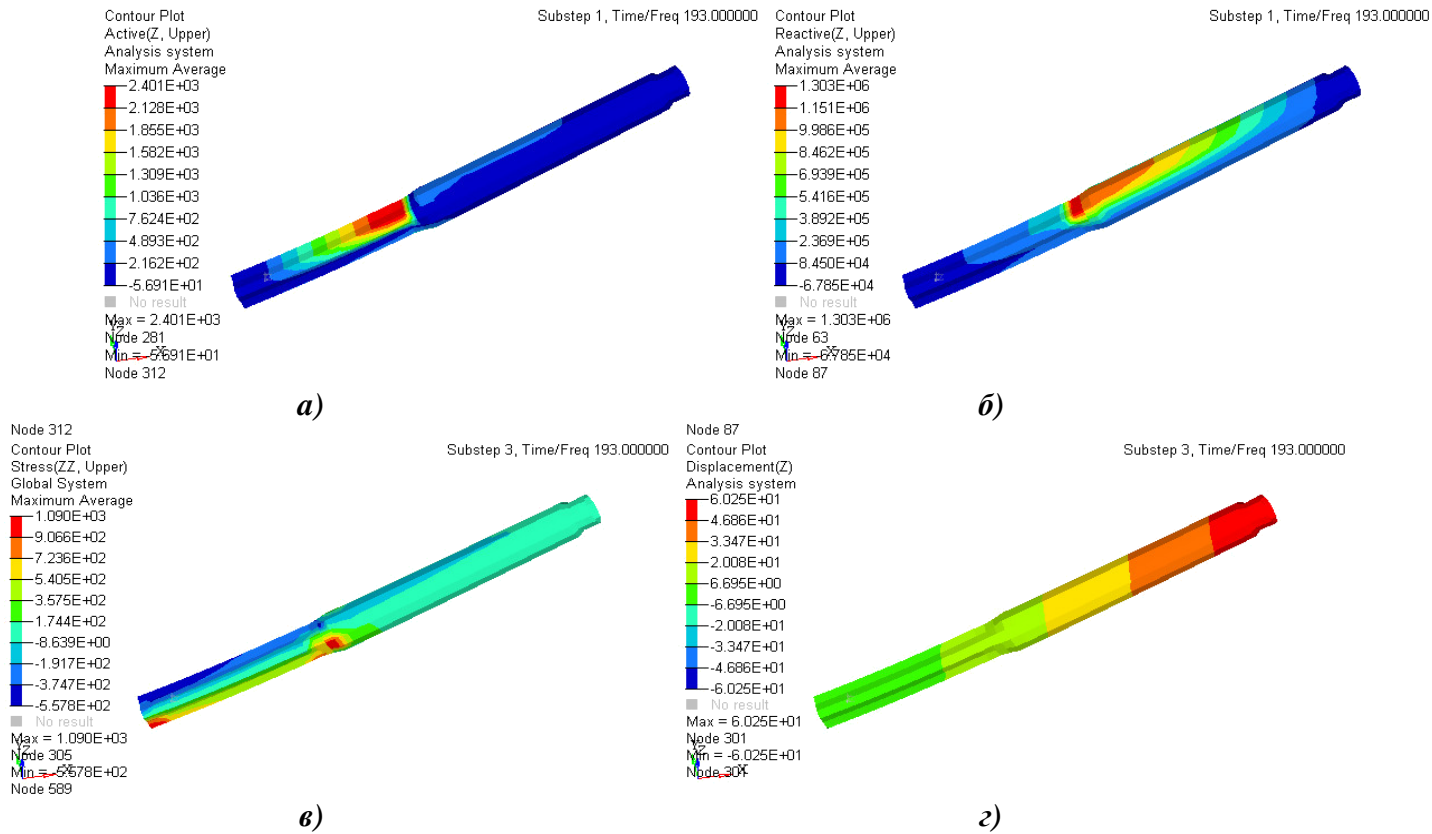
### Structural Intensity Analysis для рулевой колонки автомобиля

Техника Структурной Интенсивности успешно реализована в области вибрации элементарной пластины для определения основных путей передачи энергии. Однако на данный момент существует очень мало исследований с использованием подхода структурной интенсивности для оценки вибрации реальных структур.

В данной работе проведено численное моделирование системы для анализа и визуализации структурной интенсивности сложных структур, таких как структура частей автомобиля. Анализ Структурной Интенсивности для рулевой колонки и ее части был проведен *в их разработанных проектных состояниях*. Целью являлось исследование характеристик передачи энергии колебаний для определения доминирующего пути потока энергии.

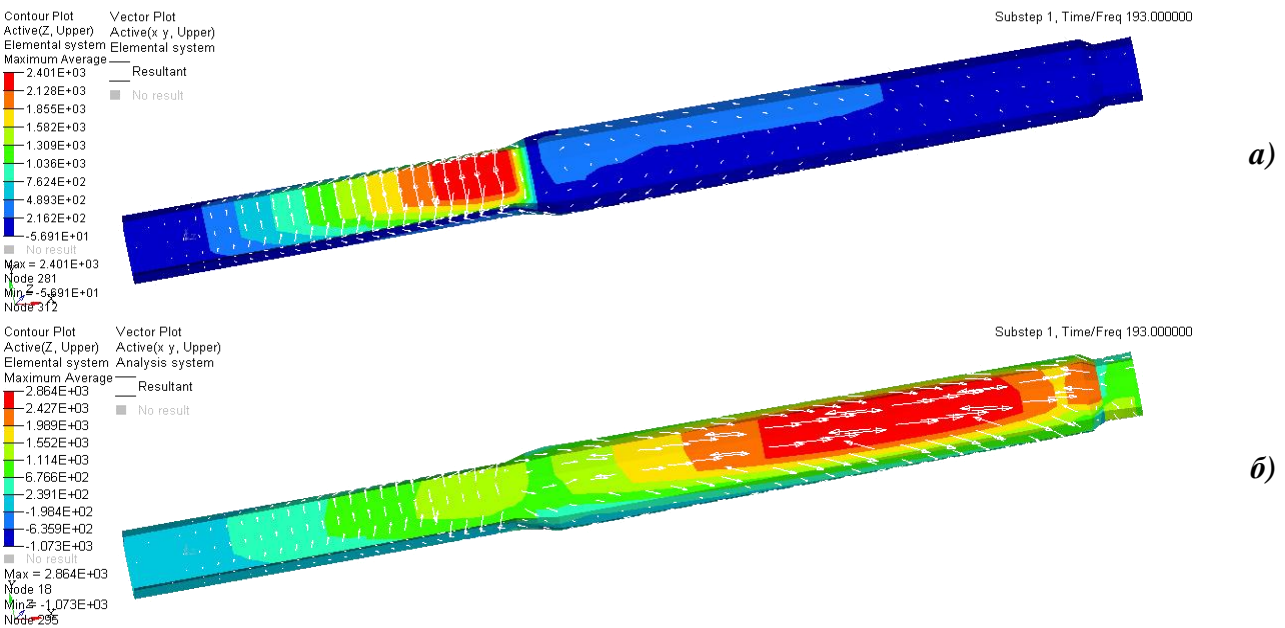
Приведена визуализации результатов воздействия силы и момента возбуждения на основную структурную деталь рулевой колонки – шпиндель, данная деталь является основным передатчиком вибрации на рулевую колонку. По результатам анализа, оценены доминирующие пути потока вибрационной энергии от источника возбуждения к деталям рулевой колонки.

Деталь шпиндель закреплена с одного конца и к другому концу приложена возбуждающая гармоническая сила. Результаты картины структурной интенсивности наблюдались при второй натуральной частоте. Из рис. 7 видно, что поля распространения вибрационной энергии, визуализированные при помощи техники структурной интенсивности, не возможно наблюдать при других видах анализа – сравнение с нижними картинками напряжений и деформации детали.



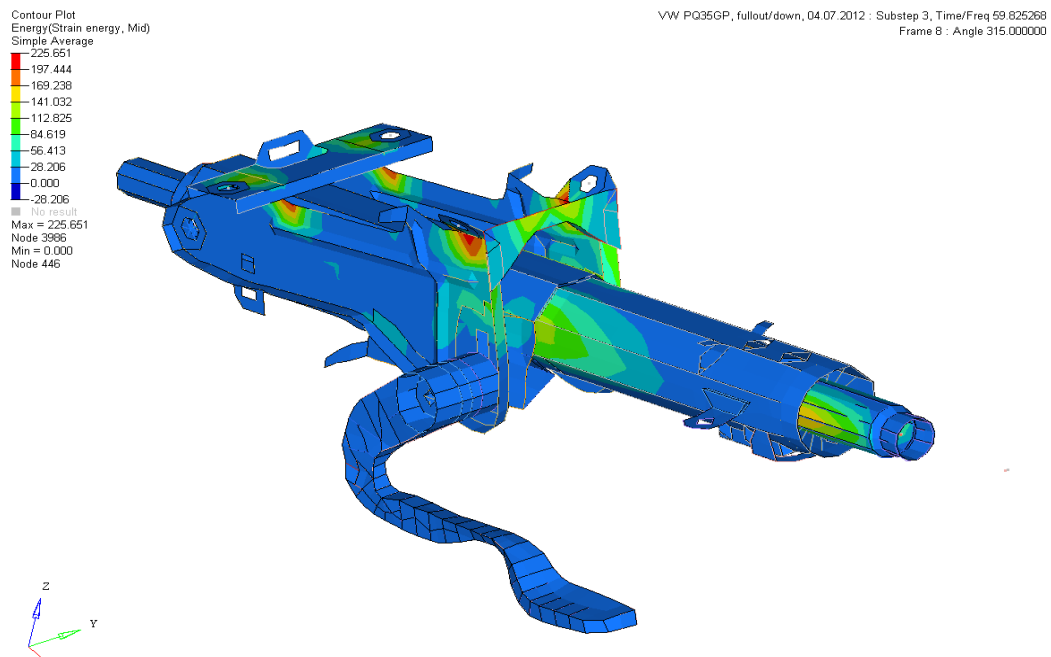
**Рис. 7. Шпиндель рулевой колонки. Активная Структурная Интенсивность (а), Реактивная Структурная Интенсивность (б), напряжение в направлении оси z (в), перемещения (г). Коэффициент затухание 0,0001,  $f=193$  Гц**

Процедура анализа проведена для различных значений поглощения колебаний структурой. На рис. 8 можно наблюдать различие в картинах распространения Активной Структурной Интенсивности (меры переносимой энергии) при различных коэффициентах затухания.

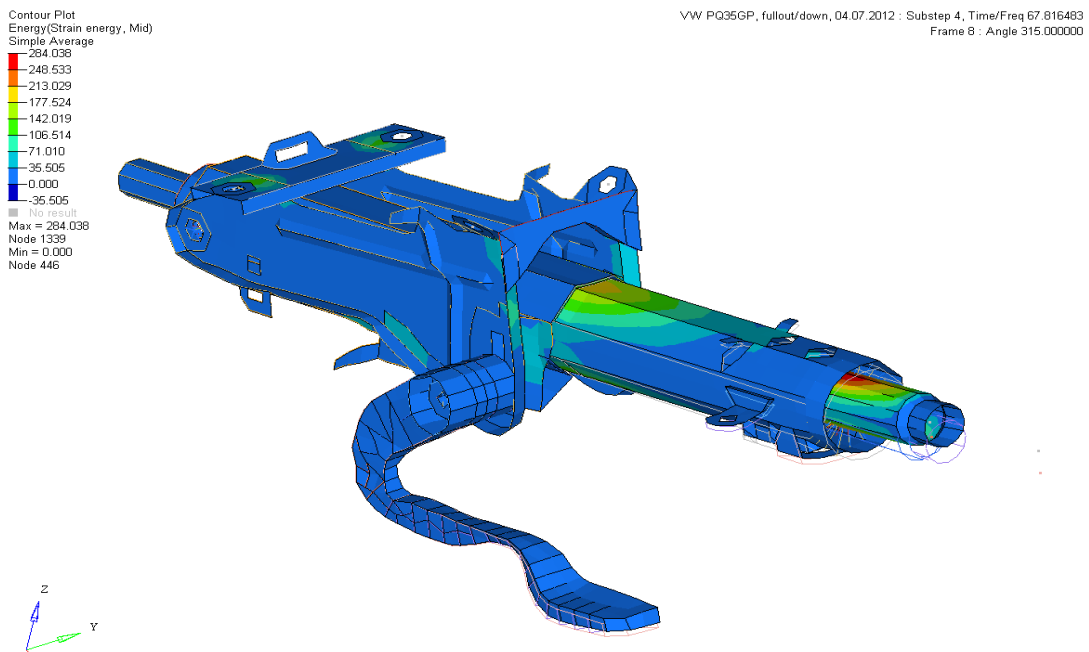


**Рис. 8. Поля Активной Структурной Интенсивности на шпинделе рулевой колонки при различных коэффициентах затухания 0.0001 (а) и 0.1 (б) колебаний в материале,  $f=193$  Гц**

В работе проведен Structural Intensity Analysis рулевой колонки автомобиля Volkswagen. Смоделированы условия закрепления модели и произведено возбуждение колебаний при помощи гармонической силы. На рис. 9 и рис. 10 показаны картины распространения полей Активной Структурной Интенсивности при первой и второй натуральных частотах. Как известно, возбуждающие колебания, совпадающие с собственными колебаниями структуры, являются наиболее опасными с точки зрения ее разрушения, поэтому исследование распространения вибрационной энергии в данных случаях является наиболее важным.



**Рис. 9. Распространение вибрационной энергии и Активная Структурная Интенсивность при первой натуральной частоте. Рулевая колонка Volkswagen**



**Рис. 10. Распространение вибрационной энергии и Активная Структурная Интенсивность**

### при второй натуральной частоте. Рулевая колонка Volkswagen Заключение

В данном исследовании разработана система численного моделирования для Structural Intensity Analysis и его визуализации, приведены его теоретические основы и осуществлено моделирование на реальных компонентах. Из Structural Intensity Analysis рулевой колонки Volkswagen удостоверено, что система моделирования может эффективно применяться для структурного анализа интенсивности и визуализации результатов на глобальной структуре автомобиля или его составных частей. Более того, установлено, что доминирующим путем передачи вибрационной энергии от источников возбуждения является шпиндель рулевой колонки, он же является деталью, воспринимающей наибольшие вибрационные нагрузки. Получена детальная информация о путях передачи вибрационной энергии по структуре рулевой колонки и установлены наиболее уязвимые с акустической точки зрения места. Данная информация не может быть получена через стандартные методы анализ структуры под нагрузкой.

Structural Intensity Analysis может быть эффективно применен для принятия надлежащих контрмер против проблемной вибрации и шума в конструкции рулевой колонки. Этот метод позволяет проводить детальное исследование в районах высокой концентрации вибрационного потока энергии, которые, следовательно, подвергаются риску повреждения или распространяют звуковые волны в окружающую среду. Он может также рассматриваться как идентификатор регионов для применения дополнительного затухания в целях снижения уровня вибрации и шума. Было показано, что Structural Intensity Analysis может выступать в качестве нового критерия надежности конструкции.

### Библиографический список

1. **Stoewer, T.** Efficiency improvements in the acoustical design of vehicle structures by means of energy flow calculation / T. Stoewer, H. Schneeweiß [BMW Group], T. Hering, Dr.-Ing. // Bös, Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka [TU Darmstadt]: AAC conference, 2011.
2. **Hering, T.** Strukturintensitätsanalyse als Werkzeug der Maschinenakustik / T. Hering. - TU Darmstadt, 2012.
3. **Noiseux, D.U.** Measurement of power flow in uniform beams and plates // Acoustical Society of America. 1970. 47. P. 238-247.
4. **Pavic, G.** Measurement of structure borne wave intensity – Part I: formulation of the methods // Journal of Sound and Vibration. 1976. 49(2). P. 221-230.
5. **Gavric, L.** A finite element method for computation of vibration intensity by the normal mode approach / L. Gavric, G. Pavic // Journal of Sound and Vibration. Vol. 164. No. 1. P. 29-43 (1993).
6. **Hambric, S. A.** Comparison of experimental and finite element structure-borne flexural wave power measurements for straight beam / S. Hambric, A. P. D. Taylor // Journal of Sound and Vibration. 1994. Vol. 175. No. 5. P. 595-605.
7. **Kuhl, S.** Gezielte Leitung von Körperschall unter Zuhilfenahme der Strukturintensitätsrechnung / S. Kuhl. – TU Darmstadt, 2010.
8. **Кузьмин, Н.А.** Процессы и причины изменения работоспособности автомобилей: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 160 с.
9. **Шапкина, Ю.В.** Влияние конструктивных параметров большегрузных автомобилей на характеристики управляемости / Ю.В. Шапкина, В.Б. Платонов // Проблемы транспортных и технологических комплексов: сб. научн. ст. III Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры «Строительные и дорожные машины»; НГТУ. – Н. Новгород, 2012. С. 129-131.

Дата поступления  
в редакцию 05.02.2013



N. A. Kuzmin, J. V. Shapkina, V.A. Shapkin

**THE STRUCTURAL INTENSITY ANALYSIS FOR PREDICTION OF VIBRATION ENERGY FLOW AND IMPROVEMENTS IN THE ACOUSTICAL DESIGN OF STEERING COLUMN PART**

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

**Purpose:** to develop the new system for Structural Intensity Analysis and visualization to apply for shell-element automobiles structures based on the FEM- method.

**Design/methodology/approach:** The mathematical formulation of the Structural Intensity has introduced, the numerical simulation system has implemented in ANSYS program software, the visualization technique of the vector fields of energy flow has realized in HyperView software.

**Findings:** The intensity vectors, streamline map and energy distribution in shell-elements plate under excitation force are calculated and visualized to predict mechanical energy transmission. The energy sources, sinks and transmission paths are clearly shown with visualization technique. Using the system, the Structural Intensity Analysis for the part of Steering Column was carried out to visualize structural intensity fields on the global shell-elements structure.

**Research limitations/implications:** The present study provides the new powerful tool for vibration and noise control. The application of the Structural Intensity technique together with visualization methods has improved the quality of structure-borne noise diagnostics. This method enables the investigation in the regions of high concentration of vibration energy flow which consequently is exposed to the risk of damage or is propagating the sound waves to the environment. It can be also considered as the identification of the regions for application of additional damping in purpose of lowering of vibration level and resulting noise radiation. It has been shown that the Structural Intensity Analysis can act as new criteria of reliability for structural design.

**Originality/value:** For the present moment it is quite innovative study because the structural intensity approach had been implemented for noise and vibration of real automobile structures.

*Key words:* Structural Intensity Analysis, Steering Column, vibro-acoustic behavior, FEM-modeling, noise and vibration.

УДК 629.113

В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, К.О. Гончаров, А.В. Федоренко, В.В. Беляков

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН  
НА ОСНОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается определение подвижности транспортно-технологических машин в зимний период. Рассматривается частная задача подвижности – проходимость машины в зимний период, а также понятие эффективности движения колесных машин. Представлена методика и подходы для определения статистических характеристик снежного покрова. Приводятся статистические данные по глубинам залегания и изменению плотности снежного покрова на территории Нижегородской области на примере станции метеонаблюдения «Ветлуга». Приводится пример определения проходимости и эффективности для машин одной весовой категории, но оснащенных колесами различных размеров. Делаются выводы о том, что выбор транспортных средств необходимо производить, основываясь именно на их эффективности движения, рассчитанной с учетом статистических характеристик снежного покрова.

*Ключевые слова:* подвижность, эффективность движения, колесные машины, статистические характеристики, снег.

Одним из важнейших свойств характеризующих транспортные средства, является подвижность. *Подвижность* – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее способность ТТМ выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самой машины. Можно выделить потерю подвижности по живучести и мобильности. *Живучесть* (подвижность по живучести) – это отказная надежность транспортного средства ТС. *Мобильность* (подвижность по мобильности) – эксплуатационная надежность ТС. При этом *проходимость* – это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью, которая относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности [1, 2, 5, 7-9, 18].

При разработке транспортных машин для заснеженной местности проектировщик задается вопросом обеспечения необходимого уровня проходимости машины. Другим важным моментом при проектировании колесных машин (КМ) является расчет эффективности их движения по снегу. Под эффективностью следует понимать обобщающий показатель, характеризующий отношение результатов деятельности к затратам на их получение.

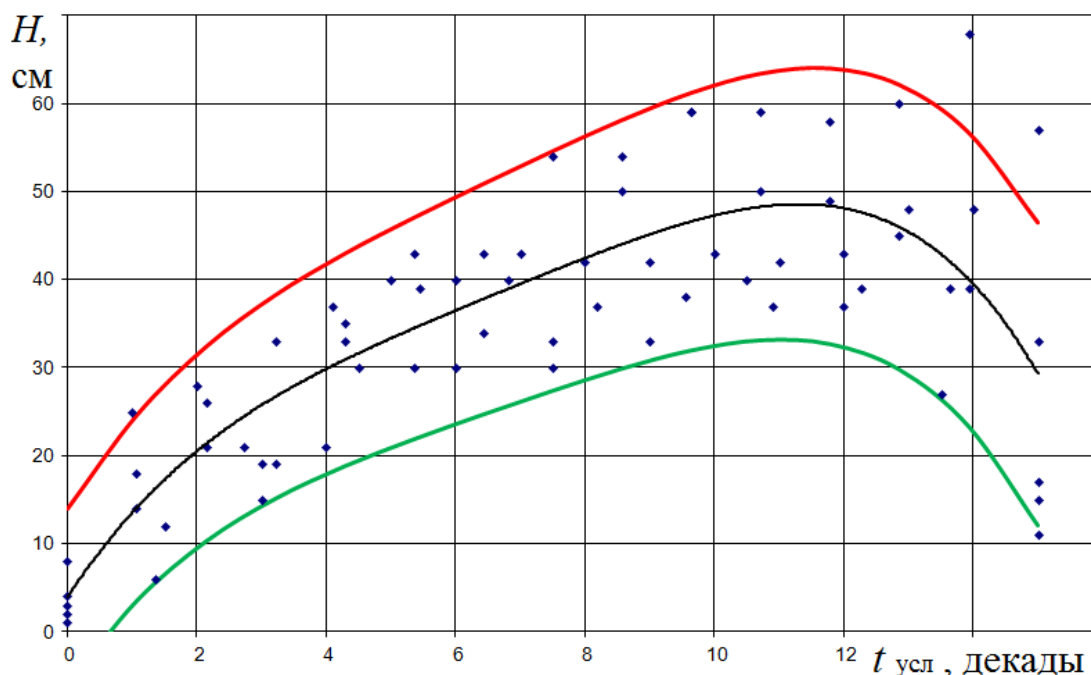
Повышение эффективности колесных машин при движении по снегу (автозимникам, снежным пустыням, подъездам к местам добычи полезных ископаемых) может быть достигнуто за счет усовершенствования конструкции как самой машины, так и её двигателя.

Также при оценке эффективности движения КМ необходимо учитывать степень ее соответствия условиям эксплуатации. Проходимость и эффективность должны быть сопоставлены с меняющимися в течение года погодными условиями.

Проанализируем, как меняется глубина снежного покрова и его плотность в течение года на рассматриваемой территории [19].

На основании наблюдений 2005–2012 гг. за территорией Нижегородской области найдем зависимости изменения глубины и плотности снежного покрова в течение зимнего периода. Рассмотрим искомые показатели на примере станции метеонаблюдения «Ветлуга».

Изменение глубины установившегося снежного покрова в течение зимнего периода будет выглядеть следующим образом (рис. 1).



**Рис. 1. Глубина залегания снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода по станции метеонаблюдения «Ветлуга» Нижегородской области (представлены результаты многолетних наблюдений)**

Протяженность периода залегания снега принимаем  $T_{\text{усл}} = 16$  условных декад. По исходным данным строим полином (как показали исследования, наиболее подходящим является полином четвертой степени), являющийся математическим ожиданием глубины снежного покрова.

В общем виде средние значения глубины снежного покрова можно определить по зависимости:

$$H = \sum_{i=0}^4 a_i t_{\text{усл}}^i,$$

где  $a_i$  – эмпирические коэффициенты ( $a_0 = 3,92$ ,  $a_1 = 11,15$ ,  $a_2 = -1,75$ ,  $a_3 = 0,17$ ,  $a_4 = -0,01$ );  $t_{\text{усл}}^i$  – текущая условная продолжительность зимнего сезона с установившимся снежным покровом.

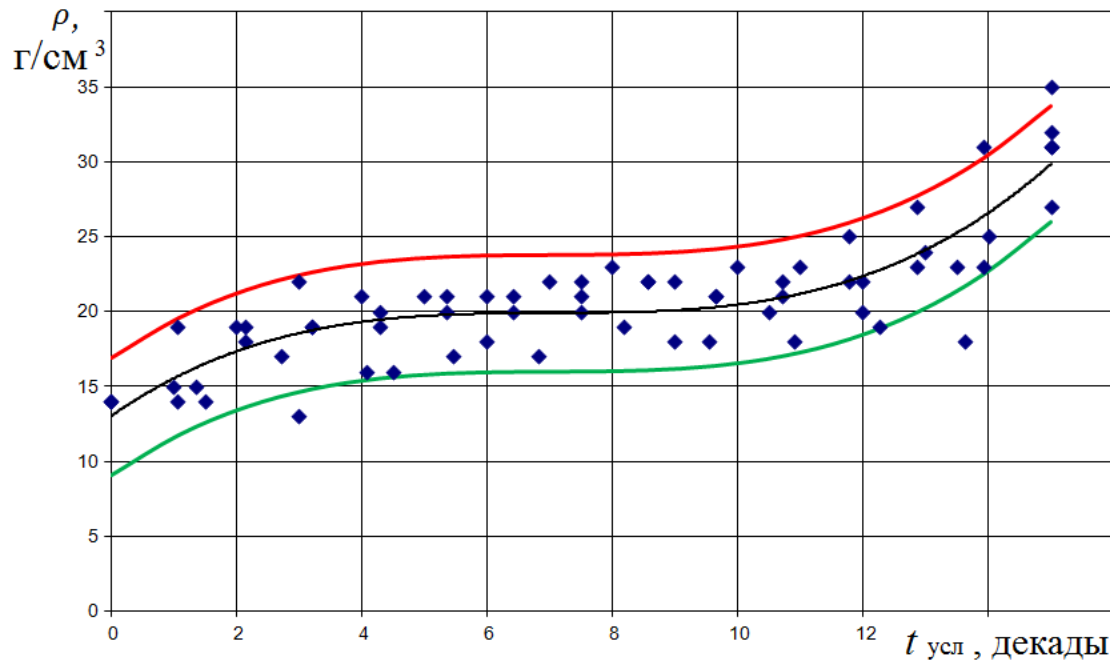
Как показали исследования [19], распределение отклонений глубин снега подчиняется нормальному закону.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей глубин снежного покрова будут вычисляться следующим образом:

$$H_{5(95)} = H \mp e^{0,5} \cdot \zeta \cdot \sigma,$$

где  $\zeta = 0,0625(e - 2)t_{\text{усл}}$  – эмпирический коэффициент;  $\sigma = 6,2$  – среднеквадратичное отклонение для станции метеонаблюдения «Ветлуга».

В результате анализа данных по плотностям снега за определенный период имеем следующие зависимости (рис. 2).



**Рис. 2.** Плотность снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода по станции Ветлуга Нижегородской области (приводятся результаты многолетних наблюдений)

По исходным данным строим полином (как показали исследования, наиболее подходящим является полином четвертой степени), являющийся математическим ожиданием плотности снежного покрова.

В общем виде средние значения плотности снежного покрова можно определить по зависимости:

$$\rho = \sum_{i=0}^4 b_i t_{\text{усл}}^i,$$

где  $b_i$  — эмпирические коэффициенты ( $b_0 = 13$ ,  $b_1 = 2,9$ ,  $b_2 = -0,41$ ,  $b_3 = -0,02$ ,  $b_4 = 0$ ).

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей плотностей снежного покрова будут определяться по равенству:

$$\rho_{5(95)} = \rho \mp e^{0,5} \cdot \sigma,$$

где  $\sigma = 2,6$  — среднее квадратичное отклонение для станции метеонаблюдения «Ветлуга».

Как показали исследования [19], распределение отклонений плотности снега подчиняется нормальному закону. Сроки залегания установившегося снежного покрова можно принять  $14 \pm 2$  декады. Хотя бывали зимы и с большими, и с меньшими значениями, но большинство значений укладываются именно в этот интервал.

Для связи реальных сроков залегания установившегося снежного покрова и условных предложена зависимость:  $t_{\text{усл}} = \frac{T_{\text{усл}}(t-1)}{T-1} + 1$ , где  $t$  — текущая декада и  $T$  — число декад, продолжительности залегания снежного покрова.

Также необходимо знать сроки начала установившегося снежного покрова. На основе анализа данных получаем, что датой начала установившегося снежного покрова считается третья декада ноября с отклонением в месяц.

Зная статистические характеристики снега: плотность и глубину залегания в течение года, а также продолжительность и сроки начала сезона в разных районах рассматриваемой территории, можно все остальные параметры получить исходя из плотности  $\rho_c$ , например,

жесткость  $K_c$ , связность  $c_c$  и угол внутреннего трения  $\varphi_c$ , необходимые для оценки проходимости машин [3, 10, 12-14, 17].

Аналогичные данные можно получить для всей территории Нижегородской области. На рис. 3 показаны средние максимальные значения глубин залегания снежного покрова, примеры графиков зависимостей изменения глубины и плотности в течение зимнего периода, а также зависимости для определения прочих необходимых параметров снега, которые могут быть использованы при оценке проходимости и эффективности КМ.

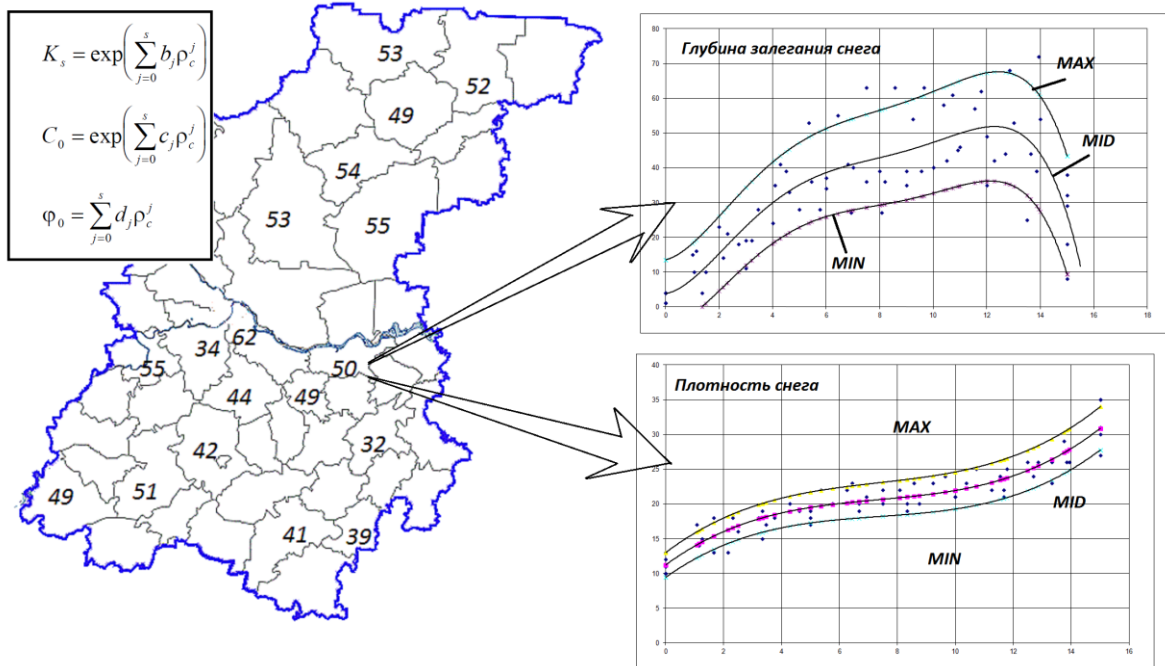


Рис. 3. Средние значения максимальных глубин снега на территории Нижегородской области

Зная характеристики снежного покрова, можно определить проходимость и эффективность колесных машин. [4, 6, 11, 15, 16]. Рассмотрим как определить данные показатели на примере конкретных колесных машин.

Расчётная схема автомобиля представлена на рис. 4. Дифференциальное уравнение движения корпуса машины имеет вид:

$$m_a \frac{dV}{dt} = \sum R_{x\varphi_i} - \sum F_{f_i} - F_{дн} - F_{кр},$$

где  $\sum R_{x\varphi_i}$  – сумма продольных реакций на ведущих колесах машины;  $\sum F_{f_i}$  – сумма сил сопротивления качению колес по снегу;  $F_{дн}$  – сила сопротивления, обусловленная взаимодействием со снежным покровом днища корпуса и элементов шасси;  $F_{кр}$  – сила тяги на крюке автомобиля;  $m_a$  – полная масса машины;  $V$  – скорость движения автомобиля.

Уравнение динамического равновесия ведущего колеса имеет следующий вид:

$$I_K \frac{dw_K}{dt} = T_K - R_{x\varphi} r_d - T_f,$$

где  $T_K$  – момент, передаваемый колесу от двигателя через трансмиссию;  $w_K$  – угловая скорость вращения колеса;  $I_K$  – момент инерции колеса;  $T_f$  – суммарный момент сопротивления качению колеса;  $r_d$  – динамический радиус колеса.

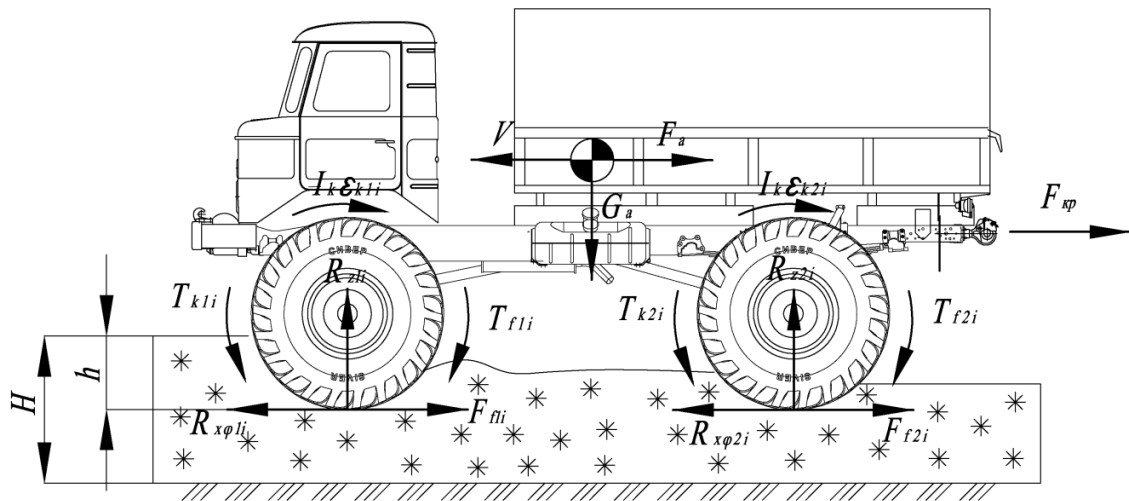


Рис. 4. Расчетная схема движения полноприводной колесной машины

Уравнения, описывающие трансмиссию, устанавливают связь между моментом двигателя, моментами, подводимыми к колесам, угловой скоростью вращения вала двигателя и угловыми ускорениями вращения колес. Более подробно данные уравнения рассмотрены в работе [15].

Сила сопротивления качению колеса складывается из  $F_{fш}$  – сопротивления качению колеса, обусловленного гистерезисными потерями в шине; силы сопротивления  $F_{fc}$ , обусловленной деформацией снежного полотна пути колесом машины;  $F_{fэб}$  – силы сопротивления от экскавационно-бульдозерных эффектов;  $F_{fфр}$  – силы сопротивления движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек:

$$F_f = F_{fш} + F_{fc} + F_{fэб} + F_{fфр}.$$

Центральное место в теории взаимодействия движителя с деформируемой опорной поверхностью занимает вопрос о распределении напряжений в зоне контакта.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены трехмерные эпюры распределений нормальных давлений в зоне контакта колес исследуемых транспортных средств с опорной поверхностью при различных внутренних давлениях воздуха в шинах (рис. 5, 6).

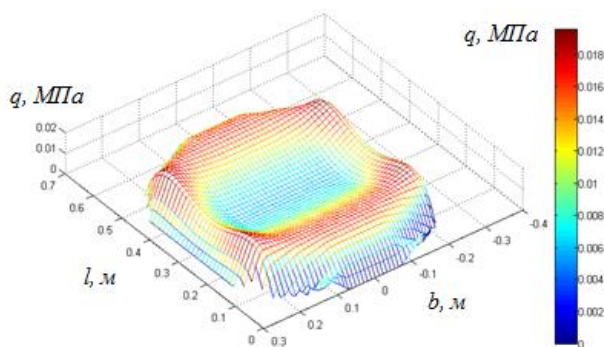


Рис. 5. Эпюра нормальных давлений в контакте шины 1300x600-533 модели «ТРЭКОЛ» с опорной поверхностью ( $p_0 = 0,01$  МПа)

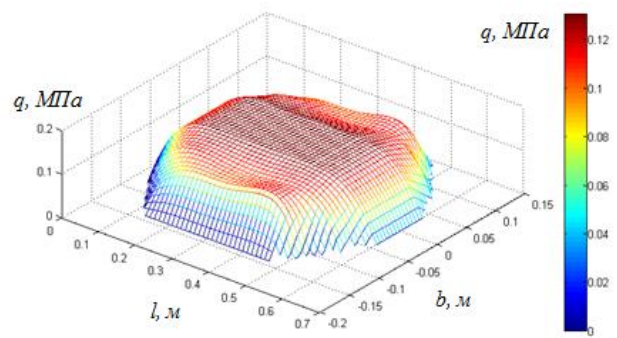


Рис. 6. Эпюра нормальных давлений в контакте шины KI-115AM 12.00 R18 с опорной поверхностью ( $p_0 = 0,09$  МПа)

Необходимо стремиться к наиболее высокой точности определения силы сопротивления, обусловленного деформацией снежного полотна пути, так как она является причиной

наибольших энергозатрат на передвижение машины. Сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути колесом машины, вычисляется по зависимости:

$$F_{fc} = b\gamma h_{\max}^2 \left( -\ln \left( \frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right) - \frac{kq_{cp}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right), \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения давлений в зоне контакта шин с опорной поверхностью (определяется в соответствии с [15]),  $b$  – ширина колеса;  $\gamma$  – коэффициент начальной жесткости снега;  $h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению,  $q_{cp}$  – среднее давление колес на опорную поверхность.

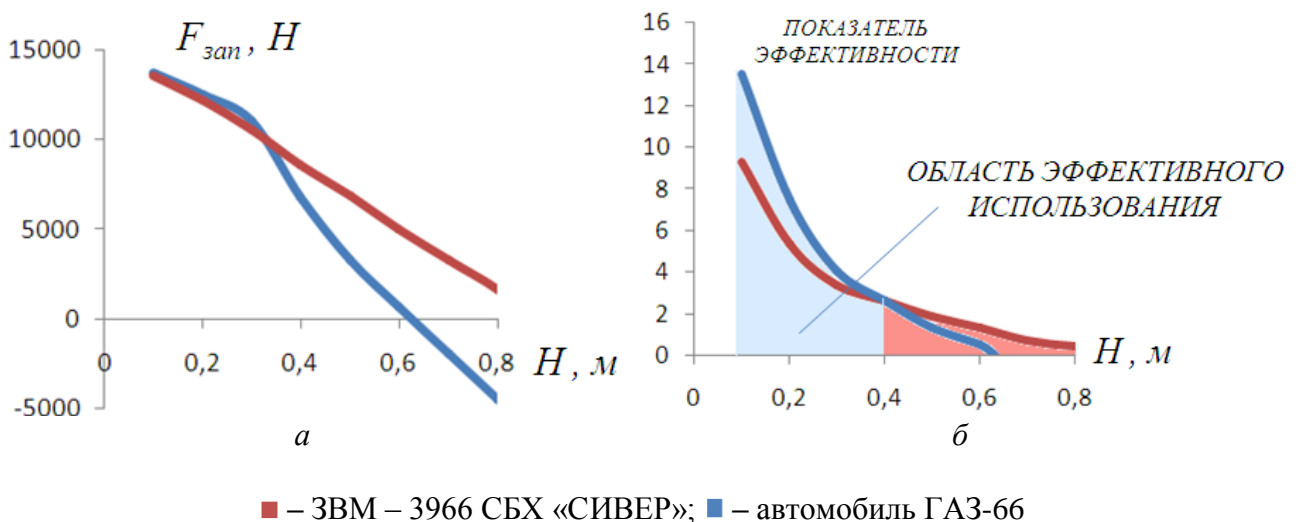
Наиболее рациональным критерием оценки эффективности колесных машин при движении по снегу является показатель, определяемый как отношение транспортной производительности к соответствующей входной мощности системы (потребной мощности двигателя):

$$\eta_{эфф} = \frac{(m_{\Gamma} g) \cdot V}{P_e}, \quad (5)$$

где  $m_{\Gamma}$  – масса перевозимого груза;  $V$  – скорость транспортного средства;  $P_e$  – потребная мощность двигателя машины.

Данный показатель является наиболее удобным для оценки эффективности колесных машин, так как в нем отсутствуют трудноопределимые показатели расхода топлива.

На рис. 7 приведен пример результатов расчетных исследований для автомобилей ГАЗ 66 на шинах КИ-115А 12.00 R18 (рис. 7, а) и ЗВМ – 3966 СБХ «СИВЕР» на шинах ИЯВ-79 (21,3-24) 1400x540 (рис. 7, б). Полные массы автомобилей близки и находятся в пределах 5800 – 6150 кг. Представленные графики демонстрируют следующее: при выборе конфигурации движителя необходимо учитывать, что при обладании колесными машинами проходимость в заданных условиях их эффективность может быть различной.



**Рис. 7. Зависимости:**

а – запасов силы тяги сравниваемых машин от высоты снега;

б – показателей эффективности сравниваемых машин от высоты снега

Данные графики иллюстрируют то, что при глубинах снега менее 0,4 м эффективнее для выполнения транспортно-технологических операций использовать стандартный автомобиль, а для больших глубин – модифицированную КМ.

Таким образом, при разработке рекомендаций по выбору параметров машины и дви-



жителя для работы на конкретных территориях необходимо опираться на данные гидрометеорологических станций. Зная статистические характеристики снега: плотность и глубину залегания в течение года, а также продолжительность и сроки начала сезона в разных районах рассматриваемой территории, можно получить все необходимые параметры, необходимые для оценки эффективности функционирования колесных машин.

#### Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №3. С. 162-170.
2. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментальные исследования поворота многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №4. С. 175-181.
3. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... док. техн. наук: 05.05.03 / Беляков В.В. Нижний Новгород, 1999. – 485 с.
4. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. № 2 (95). С. 156-166.
5. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №1. С. 143-151.
6. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности работы транспортной системы / В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Ю.И. Молев // Приволжский научный журнал. 2010. № 4. С. 214-219.
7. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №7. С. 24-26.
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; URL: [www.science-education.ru/103-6376](http://www.science-education.ru/103-6376) (дата обращения: 05.06.2012).
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. 82-87.
10. Вездеходные транспортно-технологические машины / под редакцией В. В. Белякова, А. П. Куляшова. – Н. Новгород.: ТАЛАН, 2004. – 960 с.
11. **Галкин, Д.А.** Влияние параметров шин на подвижность многоосных колесных машин / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6; URL: [www.science-education.ru/106-7882](http://www.science-education.ru/106-7882) (дата обращения: 24.12.2012).
12. **Гончаров, К.О.** Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов, возникающих при криволинейном движении колеса на сопротивление качению / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2010. Вып. 6. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/145884.html> , свободный.
13. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2010. Вып. 12. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/164456.html> , свободный.
14. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов, на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Гончаров, К.О. – Н. Новгород, 2011. – 263 с.
15. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зезюлин Д.В. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
16. **Зезюлин Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5; URL: [www.science-education.ru/105-6927](http://www.science-education.ru/105-6927) (дата обращения: 17.09.2012).
17. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. –161 с.



18. **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. <http://www.science-education.ru/105-7111> (дата обращения: 05.10.2012).
19. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013).

*Дата поступления  
в редакцию 12.02.2013*

**V.S. Makarov, D.V. Zezyulin, K.O. Goncharov, A.V. Fedorenko, V.V. Belyakov**

### **ASSESSMENT OF MOVEMENT WHEELED MACHINES BASED ON STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SNOW COVER**

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

**Subject/topic/purpose:** Experimental and theoretical studies of movability, and efficiency of cross-wheeled vehicles.

**Methodology of work:** Assessing the impact of the snow cover and the different options of tires for continuity and efficiency of the movement of wheeled vehicles.

**Results/application:** Results are important for the activities of research laboratories and automotive companies involved in the development of wheeled vehicles. Experimental and theoretical studies can be used to select the rational design of the vehicle, and the selection of the most effective vehicles for use in the snow.

**Findings:** Recommendations on the choice of rational parameters of tire wheeled vehicles in terms of ensuring the greatest efficiency when driving on snow

*Key words:* movability, efficiency of movement, wheeled vehicles, statistical characteristics, snow.

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

---

---

УДК 629.5 01

Май Ван Куан, Нгуен Дык Тхинь

### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СУДОСТРОЕНИЯ ВЬЕТНАМА

Социалистическая республика Вьетнам

Анализируется состояние судостроительной промышленности Вьетнама, в том числе такие аспекты, как состояние крупных судоверфей, их мощности и объемы производства за последние годы; основные типы построенных судов; основные заказчики и т.д. Также рассмотрены перспективы развития судостроения как одной из главных отраслей промышленности Вьетнама.

*Ключевые слова:* вьетнамское судостроение, вьетнамские судоверфи, объем производства, экономика Вьетнама.

#### **Основные сведения о географических и экономических условиях Вьетнама. Роль морских перевозок в общей экономической системе страны**

Вьетнам – страна в Юго-Восточной Азии, расположенная на полуострове Индокитай. На западе граничит с Лаосом и Камбоджой, на севере – с Китаем, с востока и юга омывается Южно-Китайским морем. Протяженность прибрежной зоны и наличие большого количества островов обусловили особую важность водного транспорта для страны.

Общая длина береговой линии равна 3260 км. Вьетнам располагается на пересечении морских путей из Индийского океана в Тихий, и отличается развитой и постоянно совершенствующейся инфраструктурой морского транспорта, состоящей из системы морских портов, внутренних и международных аэропортов, сетей государственных и трансазиатских транспортных путей.

Благодаря благоприятным геополитическим условиям, богатым природным и трудовым ресурсам и политике реформ Вьетнам превратился в государство, обладающее экспортным преимуществом по тропическим и морским продуктам.

Годовой прирост ВВП Вьетнама достиг около 8% в период с 1990 по 1997 гг. и около 7% с 2000 по 2005 гг. что делает Вьетнам одной из самых быстрорастущих экономик мира. Прирост оставался высоким даже в условиях мирового финансового кризиса, сократившись в 2010 г. до 6,8%.

С 7 января 2007 г. Вьетнам является официальным членом ВТО. В 2007 г. прирост ВВП Вьетнама составил 8,44%, сделав Вьетнам третьим по этому показателю в Азии после Китая и Индии.

Целью экономики Вьетнама является достижение к 2020 году статуса промышленной страны. Потребности в импорте современных машин и основных строительных материалов будут увеличиваться. Сложными задачами являются сдерживание и снижение торгового дефицита в ближайшие годы.

В связи с экономическим ростом, увеличивается количество грузов, перевозимых через вьетнамские порты. В 2008 г. оно составило 143,6 млн т. На рис. 1 – 6 приведено количество судов, проходящих через вьетнамские порты, а также количество перевозимых через вьетнамские порты грузов. Данные графики показывают, что водный транспорт является

главным транспортом для Вьетнама. Однако по состоянию на 2009 г. транспортный флот Вьетнама составляет около 1600 судов различных типов с суммарным дедвейтом 6,2 млн DWT, обслуживает только 20% спроса на морские перевозки во Вьетнаме. Поэтому судостроительная отрасль играет значительную роль для вьетнамской экономики.



Рис. 1. Количество судов, проходящих через порты Вьетнама за год



Рис. 2. Грузооборот импорта, проходящий через порты Вьетнама за год



Рис. 3. Внутриконтинентальный грузооборот, проходящий через порты Вьетнама за год



Рис. 4. Количество контейнеров TEU, проходящих через порты Вьетнама за год



Рис. 5. Грузооборот экспорта, проходящий через порты Вьетнама за год



Рис. 6. Общий грузооборот, проходящий через порты Вьетнама за год

В 2006 г. правительством Вьетнама был принят ряд ключевых политических документов, включая План социально-экономического развития на 2006–2010 гг., направленных на реформирование национальной экономики и открытие её для иностранных инвестиций. Судостроение, согласно провозглашенной стратегии, является одной из главных отраслей промышленности, которая активно развивается, и ей оказывается значительная государственная поддержка. В результате Вьетнам в 2008 г. вышел на шестое место в мире по объему заказного тоннажа (более 270 судов компенсированным регистровым тоннажем 2,8 млн крт).

### **История развития и состояние судостроительной промышленности во Вьетнаме**

Судостроение появилось во Вьетнаме в период с 1955 по 1960 годы. В это время в стране только закончилась война, и транспортных средств было очень мало. В состав водных средств входили только каноэ и старые баржи. Миссия судостроительной промышленности в тот период заключалась лишь в сборке барж, буксиров, земснарядов из частей, привозимых из СССР, Китая и Восточной Германии. Существовало всего четыре цеха (как судостроительных, так и механических) в городе Хайфон (в настоящее время верфь Бакх Данг). В тот период судостроительная техника поступала во Вьетнам в основном из СССР и Китая.

В 60-е гг. прошлого столетия основной задачей судостроительной отрасли Вьетнама являлся ремонт и переоборудование старых судов. Через некоторое время в судостроительной промышленности Вьетнама произошли существенные преобразования, в том числе налажено производство баржи 200 т и различных барж и буксиров. Кроме этого, в тот период на судостроительную промышленность Вьетнама была возложена ответственность за строительство боевых морских средств. При этом количество судостроительных предприятий увеличилось с созданием новых верфей: Тамбак, Шонгкам, Шонгло.

В начале 70-х гг. XX века судостроительная промышленность Вьетнама сосредоточилась на строительстве боевых кораблей, а с 1975 г., когда война закончилась – на строительстве транспортных средств для обеспечения пассажирских и грузовых перевозок. На поток было поставлено производство сухогрузов прибрежного плавания грузоподъемностью 70–400 т, речных паромов, буксиров, кантовщиков и барж. Вьетнам отправлял за рубеж инженеров и рабочих для повышения квалификации. Из зарубежных стран особую помощь в тот период оказали Польша, которая помогла построить верфь «Халонг» с возможностью сооружения судов дедвейтом до 3000 т и Финляндия, которая оказывала помощь в строительстве судоремонтного завода «Фарынг».

По причине экономического кризиса, период 80-х гг. прошлого века стал самым сложным этапом развития судостроения во Вьетнаме. Тем не менее, судостроительная промышленность в тот период сумела отметить такими достижениями, как строительство пассажирских судов на двести двадцать сидячих мест, сухогрузов грузоподъемностью 1000–3850 т, танкеров и буксиров, буксирокантовщиков и барж.

С 90-х годов прошлого столетия судостроение Вьетнама продолжило дальнейшее развитие. В 1996 г. была создана Вьетнамская судостроительная корпорация (Vinashin), в структуре которой было только десять небольших верфей, расположенных на берегах рек в северной части страны и ориентированных на строительство судов дедвейтом до 6500 т.

Интенсивный рост производственной деятельности холдинга начался с 2000 гг. В это время реализовывались задачи по формированию к 2010 г. десяти крупных современных судостроительных комплексов, в том числе в Анхонге (“An Hong Shipbuilding Industrial Zone”, Кайлане (“Cai Lan Shipbuilding Industrial Zone”) и Хайзыонге (“Hai Duong Shipbuilding Industrial Zone”). Кроме того, с начала XXI века произошло резкое увеличение мощностей, в частности, открытие новых верфей судостроительной компанией «Hyundai Vinashin» - совместного предприятия с южнокорейской «Hyundai Mipo Dockyard». Вьетнамская судостроительная отрасль впервые заявила о себе на международном рынке в 2004 г., когда «Vinashin» заключила соглашение с «Graí Group» (Великобритания) на строительство 15 навалочников по 53 тыс. т. дедвейта со стоимостью контракта 320 млн долл.

В настоящее время судостроительную отрасль Вьетнама курируют следующие ведомства: министерство транспорта, морской департамент министерства транспорта, государственный регистр Вьетнама, Вьетнамская судостроительная промышленная корпорация (VINASHIN), Национальная судоходная корпорация Вьетнама, министерство промышленности и торговли.

По состоянию на 2010 г. во Вьетнаме имеется около 150 верфей, из которых только 44 верфи имеют экспортную способность (см. табл. 1). Вьетнамская судостроительная промышленная корпорация (VINASHIN) является крупнейшим судостроителем во Вьетнаме. VINASHIN имеет около 160 дочерних предприятий, в том числе 39 верфи и составляет 70-80% от общего объема производства судостроения Вьетнама.

Во Вьетнаме судостроительные предприятия могут быть разделены на три группы: Южную, Центральную и Северную.

Предприятия на севере, расположенные около города Хайфона и в дельте Красной реки, находятся в северной экономической зоне, обладают богатыми человеческими ресурсами и большим внутренним рынком. Здесь развита механическая промышленность и расположены большие порты. Северные предприятия нацелены на строительство контейнеровозов и танкеров дедвейтом около 70000 – 100000 DWT. Недостатками таких предприятий являются препятствия и трудности, связанные с получением иностранных инвестиций.

Большинство предприятий в центральном регионе страны расположены около экономических зон: Зунгкуат (провинция Куангнам) и Нячанг (провинция Ханьхоа). Преимуществами данного региона являются низкая затратная часть (аренда земли, труд рабочих) и относительно невысокая конкуренция. Недостатки: плохая инфраструктура; небольшое финансирование, низкий уровень владения английским разговорным языком. Центральные предприятия предназначены для строительства судов около 300 000 DWT.

Южные предприятия располагаются вокруг города Бария-Вунгтау и в дельте реки Меконг, нацелены на постройку новых судов дедвейтом до 50 000 DWT. Их преимущества: хорошая инфраструктура (порты, дороги, телекоммуникации), основная концентрация существующих прямых иностранных инвестиций; большой спрос на новые суда высокой стоимости. А недостатки: высокая конкуренция со стороны местных и иностранных компаний.

В судостроении и морской отрасли Вьетнама имеются также предприятия с 100%-ным иностранным капиталом, в том числе верфи, заводы по производству оборудования и механические заводы. В настоящее время во Вьетнаме существует пять верфей, принадлежащих иностранным владельцам, и некоторые судовые предприятия, основанные на сотрудничестве между вьетнамской и иностранной сторонами.

В период с 2006 по 2008 гг. объем заказов на вьетнамских верфях интенсивно рос, составлял 73 судна в 2006 г., 108 судов в 2007 г. и 202 судна в 2008 г.

Таблица 1

## Перечень вьетнамских верфей, имеющих экспортную способность

№	Наименование	Настоящая возможность (DWT)		Потенциальная способность к 2015 г. (DWT)	
		Строительство новых судов	Судоремонт	Строительство новых судов	Судоремонт
1	2	3	4	5	6
I. Северная группа					
Владение Vinashin					
1	Ha Long верфь	50 000	10 000	75 000	50 000
2	Pha Rung верфь	34 000	16 000	100 000	100 000

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
3	Nam Trieu верфь	150 000	10 000		1000
4	Ben Kien верфь	15 000	20 000		
5	Bach Dang верфь	50 000	10 000		
6	Song Cam верфь	4 000	1 000		
7	Tam Bac верфь	1 000	600		
8	Thanh Long верфь	4 000	1.500		
9	Hai Duong верфь	1 000	600		
10	Song Lo верфь	600	600		
11	Song Hong shipyard	5 000			
12	Diem Dien shipyard	1 000	6.500		
13	Thai Binh shipyard	1 000			
14	Nam Ha верфь	3 500	2 000		
15	Song Dao верфь	3 500	1 500		
16	Truong Xuan верфь	3 500			
17	Hoang Anh верфь	4 000	2 000		
18	Thinh Long верфь	20			
19	Ben Thuy верфь	4 000	10 000		
Вне Vinashin					
20	189 верфь (Naval)	Алюминиевые скоростные пассажирские суда			
21	Lisemco верфь	10 000	10 000	10 000	
22	Lisemco 5 верфь	10 000	10 000	10 000	
23	Vinashin-Damen верфь	3 000	3 000		
II. Центральная группа.					
Владение Vinashin					
24	Quang Binh верфь	600			
25	Da Nang верфь	1 500			
26	Dung Quat верфь	400 000	400 000		
27	Nha Trang верфь	3 500			
28	Cam Ranh верфь	30 000	100 000	100 000	
29	Hyundai- Vinashin верфь	80 000	80 000		
Вне Vinashin					
30	Song Thu верфь (naval)	Военные и специальные суда			
III. Южная группа					
Владение Vinashin					

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
31	Saigon shipbuilding industry company	6 500	22 500	22 500	
32	Saigonshipmarin	6.500	30 000	12 500	30 00
33	76 верфь	1 000	1 000	6 500	3 000
34	Can Tho верфь	6 500	1 500		
35	Nhan Trach верфь	15 000	45 000		
Вне Vinashin					
36	Ba son верфь (Naval)	17 000	17 000		
37	PTSC верфь (under PV)	Суда, обслуживающие нефтегазовую отрасль			
38	PV new-building верфь	Суда, обслуживающие нефтегазовую отрасль			
39	Saigon верфь	Специальные суда			
40	South East Asia Верфь	Алюминиевые специальные суда			
41	Kien Giang верфь	Композитные специальные суда			
42	STX верфь	Морское основание			

Объем производства вьетнамских верфей и их доля в объеме мирового судостроения приведена в табл. 2. По этим данным Вьетнам занимает шестое место в области судостроения. В 2007 г. Вьетнам достигал 2,19 % от объема мирового судостроения. Это число невелико, но три ведущие страны в области судостроения (Южная Корея, Япония и Китай) составляют около 90% производства всего мира.

Таблица 2

## Объем производства вьетнамских верфей

Год	2002	2004	2006	2007
Объем производства, млн брт	0,02	0,04	0,08	0,76
Мировая доля, %	0,10	0,16	0,26	2,19

Вьетнамские верфи имеют преимущества в строительстве судов небольшого тоннажа, в том числе в строительстве танкеров, сухогрузов и многоцелевых судов. В настоящее время около 70% заказов корпорации Vinashin составляют навалочники. На рис. 7 приведена продукция корпорации Vinashin по типам судов.

По данным табл. 1 некоторые верфи еще могут ремонтировать суда, но их производительность низка по сравнению с верфями более развитых стран. Возможность судоремонта оценивается как хорошая.

Основными продуктами вьетнамской судостроительной отрасли сегодня являются:

- Навалочники (Handysize или Handymax);
- Нефтеналивные танкеры (Афрахмакс / VLCC);
- Контейнерные суда (до 1016 TEU);
- Суда для перевозки генеральных грузов (до 12 500 DWT);
- Газовозы LPG (до 7200 куб. м / 6500 DWT);
- Химические и нефтепродуктовые танкеры (до 15000 DWT);
- Универсальные контейнеровозы (до 15000 DWT);

- Автомобилевозы (до 6900 единиц / 27 000 DWT);
- Плавающее нефтеналивное хранилище (до 150 000 DWT);
- Завозчик якорей / буксиры / суда снабжения (до 4000 DWT);
- Другие: земснаряды (до 1500 м3); пассажирские суда (до 100 мест); рыболовный бот ; скоростной катер (не более 30 миль / ч); буксиры, баржи, яхты и спасательные суда.

40% объема судостроительной отрасли Вьетнама отвечает внутреннему спросу, а 60% - идет на экспорт (см. рис. 8). По состоянию на 31 декабря 2009 года Ray Shipping Ltd (Израиль) является крупнейшим иностранным клиентом, а второе место занимают норвежские судовладельцы.

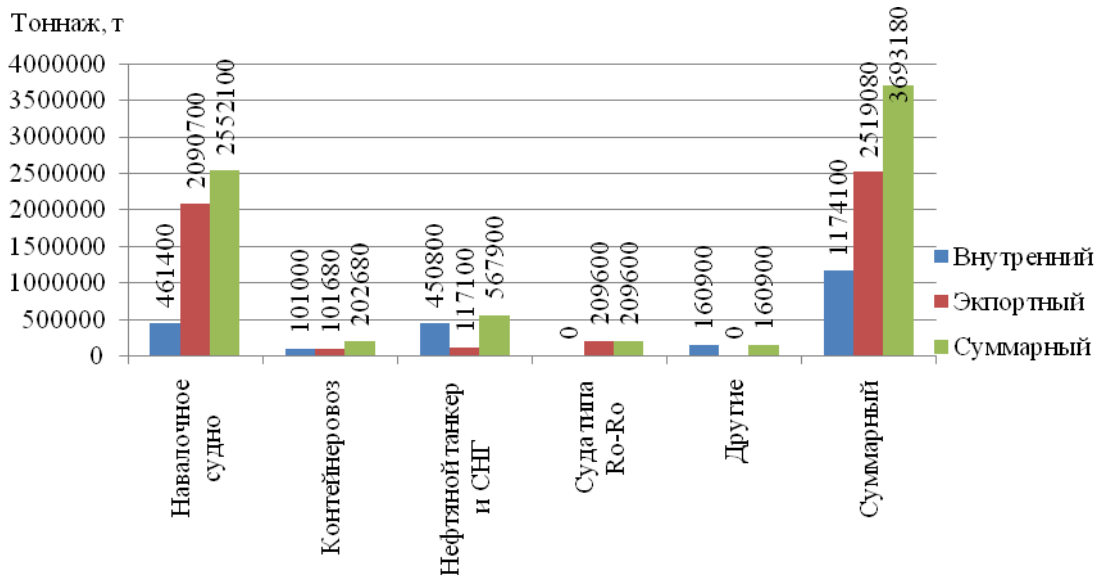


Рис. 7. Продукция корпорации Vinashin по типу судов (по презентации Ле Лок на выставке VietShip 2010)

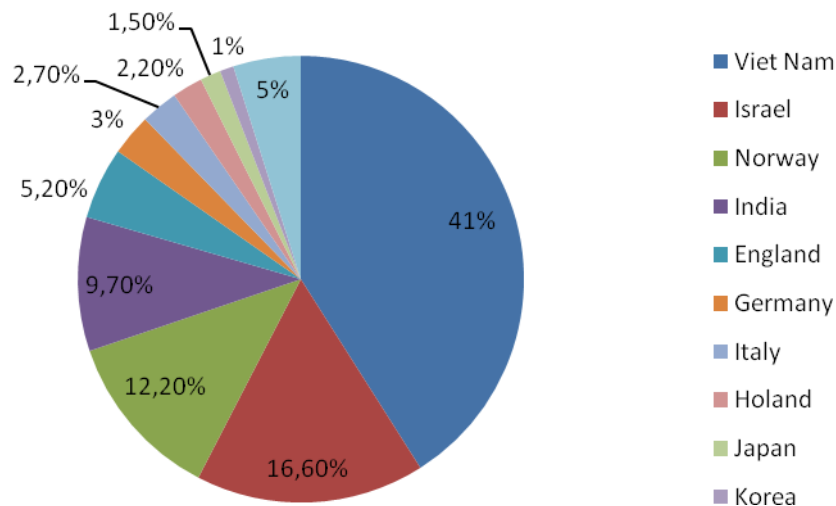


Рис. 8. Основные заказчики судостроения Вьетнама

Глобальный экономический кризис 2008 года оказал значительное влияние на мировую судостроительную промышленность, в том числе и на вьетнамское судостроение. Количе-



ство новых заказов снизилось, а выполняемые заказы были задержаны по финансированию. В связи с этим, вьетнамское судостроение было реорганизовано для преодоления трудностей.

В 2010 году Vinashin завершила строительство 64 судов, в том числе 28 судов для иностранных заказчиков, которые включают в себя высокотехнологичные суда: автомотовоз 4900, судно для перевозки сжиженного этилена 4 500 м<sup>3</sup>, сухогруз 56 000 DWT и 34 000 DWT, 2 грузовых судна 11 000 т DWT и специальные суда: спасательные суда, морские патрульные суда, буксиры и т.д.

В 2011 году Vinashin завершила строительство 71 судна, начала строительство 16 судов и заключила 19 новых контрактов. Кроме этого, корпорация способствовала развитию судоремонта, в результате чего доля судоремонта составила 20% строительства новых судов и развила вспомогательное производство.

В настоящее время во Вьетнаме функционируют пять университетов, которые обучают морскому строительству и связанными с ним курсами. К ним относятся:

- Ханойский технологический университет,
- Вьетнамский морской университет,
- Хошиминский университет транспорта,
- Хошиминский технологический университет,
- Нячангский университет.

Кроме того, Ханойский университет транспорта обеспечивает подготовку в области морского транспорта. Другие высшие учебные заведения, которые проводят курсы по техническим областям, связанным с судостроением, также расположены недалеко от основных центров промышленной деятельности. Речь идет о следующих учреждениях:

- Морской колледж номер 1,
- Хайфонский политехнический колледж,
- Морской профессиональный колледж номер 2.

По некоторым данным курсы по морским дисциплинам слушают около 100 000 студентов по всей стране.

### **Перспективы развития вьетнамского судостроения в будущем**

У судостроительной промышленности Вьетнама еще много возможностей для развития. В дополнение к производству судов для иностранных заказчиков, судостроительная промышленность Вьетнама должны быть сосредоточена на строительстве следующих типов судов:

- суда для перевозки генеральных грузов, навалочники и контейнеровозы приближенного плавания для обеспечения перевозок грузов между районами страны;
- небольшие танкеры, ПБУ и суда снабжения для обслуживания нефтяной промышленности во Вьетнаме;
- пассажирские скоростные суда;
- рыболовные боты для развития рыболовства;
- спасательные суда, спасательные буксиры для обеспечения безопасности морского транспорта во Вьетнаме;
- скоростные пассажирские суда для обеспечения перевозки пассажиров между пунктами населения.

Судостроительная промышленность Вьетнама установила для себя конкретные задачи в ближайшие годы. В области судостроения: синхронизация и содействие судостроительным предприятиям, формирование ряда центров строительства транспортных судов и центров строительства специальных судов в трех зонах, чтобы строить новые суда до 300000 DWT и суда с высокими техническими требованиями и экономической эффективностью (суда для перевозки автомобилей, пассажирские суда, поисково-спасательные суда, морские научно-

исследовательские суда, скоростные патрульные катера...), соответствующие международным стандартам для удовлетворения внутренней и экспортной потребности. Суммарный объем производства должен составить 2,5 до 3,5 млн т. DWT в год, в том числе 1,7 до 2,7 млн т DWT в год на экспорт. В области судоремонта: формирование крупных судоремонтных центров, связанных с системой портов и международными морскими путями, судоремонт должен быть высокотехнологичен и экологически чистым, отличаться высоким качеством и быть конкурентоспособным. К 2020 году Вьетнамские верфи ответят всему внутреннему судоремонтному спросу, а также начнут работать на рынок ремонта иностранных судов, обслуживающих Южно-Китайское море.

После кризиса мировая экономика восстанавливается. Мировое судостроение продолжает развиваться. И это открывает большие возможности и перспективы судостроительной промышленности Вьетнама.

#### Библиографический список

1. **Gille, J.** Study of the Vietnamese shipbuilding / J. Gille, G. Bruce / Maritime Sector. Final Report. Norwegian Agency for Development Cooperation. Rotterdam, 30 June. 2010.
2. **Логачев, С.И.** Мировое судостроение / С.И. Логачев, В.В. Чугунов, Е.А. Горин. – СПб.: Мор Вест, 2009.
3. **Нгуен Зуй Бак.** Обоснование проектных характеристик бортовых буксиров для СРВ / Нгуен Зуй Бак. – Нижний Новгород, 2010.
4. Вьетнам // Материал из Википедии – Свободной энциклопедии. Электронный ресурс <http://ru.wikipedia.org/wiki/Вьетнам>
5. Основные сведения о развитии судостроительной промышленной отрасли Вьетнама в периоде 1955-1990// Электронный ресурс : <http://vietmarine.net/forum/showthread.php?t=1488>
6. **Нго Дык Тханг.** Актуальные типы судов для Социалистической Республики Вьетнам / Нго Дык Тханг, Ле Чунг Киен, Нгуен Дык Тхинь. – Курск: Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2009.

*Дата поступления  
в редакцию 21.01.2013*

**Mai Van Quan, Nguyen Duc Think**

#### SITUATION AND PROSPECTS OF VIETNAM SHIPBUILDING

The length of the coastal zone and the presence of a large number of islands has led to the special importance of water transport in Vietnam. Due to its favorable geopolitical conditions, abundant natural and human resources and political reforms, Vietnam has become the country with the export advantage in the supply of tropical and marine products. The article discusses the state of the shipbuilding industry: issues such as the status of major shipyards, their capacity and performance in recent years, the main types of vessels built, main clients, etc. The prospects for the development of shipbuilding as a major industry in Vietnam: synchronization and promote shipbuilding companies, the formation of a number of centers and the construction of cargo ships, building centers of special courts in the shipbuilding industry, the formation of large ship-repair centers in the field of ship repair.

*Key words:* the Vietnamese shipbuilding industry, prospects, Vietnam yards, production volume, the economy.

УДК 629.12.011

А.Г. Ларин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОГРУЖЕНИЯ И ВСПЛЫТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описана экспериментальная установка для исследования возможности погружения и всплытия энергетического модуля в ледовых условиях. Изложен метод моделирования в естественном льду. Приведены формулы пересчета модельных испытаний на натуру.

Представлен порядок проведения опытов по моделированию всплытия погружного энергомодуля.

В результате опытов были получены графики зависимости разрушающего усилия от прогиба ледяного покрова для разных толщин льда и разных моделей. Приведен характерный вид такой зависимости.

Получены зависимости разрушающего усилия в зависимости от длины и ширины нагрузки, площади ватерлинии и толщины льда. Эти формулы в дальнейшем использовались для пересчета на натурное судно.

*Ключевые слова:* энергомодуль, ледовый опытовый бассейн, модель естественного льда, Арктика, диаграмма разрушения ледяного покрова.

Арктика является важным регионом, богатым природными ресурсами. В последнее время началось активное освоение данной территории всеми приарктическими странами. Принимаются стратегии развития и освоения данных территорий и месторождений, находящихся на них. В настоящее время разработаны и приняты на государственном уровне программы по развитию Арктического региона в четырех странах: России (принята в 2008 г.), Норвегии (2008 г.), США (январь 2009 г.) и Канаде (2009 г.). Кроме того, интерес к Арктике проявляет Дания. В нашей стране разрабатываются проекты подводной добычи углеводородов. Обеспечение электроэнергией установок для добычи углеводородов предусматривается с плавучих энергомодулей. В момент наступления сложной ледовой обстановки энергомодуль погружается под воду, и снабжение электроэнергией продолжается в погруженном положении.

Данный вид морской техники только разрабатывается. Разработки ведутся в нескольких странах. Однако использование данных судов в условиях крайнего севера рассматривается только в нашей стране.

Нет данных по эксплуатации данных типов судов и не существует практических методов расчета возможности погружения и всплытия данных объектов. Все это не позволяет дать даже приближенную оценку по возможности использования данных судов в различных ледовых условиях. С целью получения методики расчета и составления рекомендаций по безопасному всплытию и погружению были проведены модельные испытания моделей данных судов.

Целью данного исследования является определение возможности всплытия и погружения энергомодуля для подводной добычи углеводородов в Арктике в ледовых условиях, а именно определение предельной толщины льда, при которой возможно безопасное всплытие и погружение.

Испытания проводились в ледовом опытовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева в январе-марте 2012 г сотрудниками кафедры «Кораблестроение и авиационная техника». Общий вид ледового бассейна показан на рис. 1.

Для проведения эксперимента использовался естественный пресный лёд. Он обладает повышенной прочностью – большей, чем требует строгая теория моделирования, поэтому, очевидно, и получило распространённое мнение о невозможности его использования. Допу-

стимость применения натурального льда в данном случае обусловлена тем, что повышенная прочность компенсируется меньшей толщиной ледяного покрова. Такой подход называется «методом Зуева-Грамузова» [1, 2]. При моделировании должно обеспечиваться равенство безразмерных прогибов. В таком случае картина разрушения льда в плане будет подобна, следовательно, одинаковыми будут число и расположение точек контакта объекта со льдом



Рис. 1. Круглый ледовый опытный бассейн НГТУ им.Р.Е. Алексеева

Пересчет на натуру осуществляется по следующим зависимостям [1]:

$$h_{\text{н}} = \lambda^{4/3} \cdot \lambda_E^{-1/3} \cdot h_{\text{м}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{н}} = \lambda^3 \cdot P_{\text{м}}, \quad (2)$$

$$v_{\text{н}} = \sqrt{\lambda} \cdot v_{\text{м}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_E = \frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{м}}}$  – масштаб модулей упругости;

$\lambda = \frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}}$  – геометрический масштаб;

$v_{\text{н}}, v_{\text{м}}$  – скорости деформирования натурального и модельного ледяного покрова;

$P_{\text{н}}, P_{\text{м}}$  – проломная нагрузка для модельного и натурального льда.

Описанный метод моделирования позволяет расширить объемы модельных исследований, используя для них открытые бассейны и естественные водоемы, а также производить испытания крупномасштабных и полунатурных моделей. В опытный ледовый бассейн наливалась пресная вода.

Лед намораживался естественным способом при отрицательных температурах наружного воздуха. После образования ледяного покрова на поверхности воды перед началом эксперимента во льду сверлилось отверстие с целью предварительной оценки толщины намороженного льда. Толщина льда определялась с помощью мерной линейки. Полученные данные заносились в протоколы.

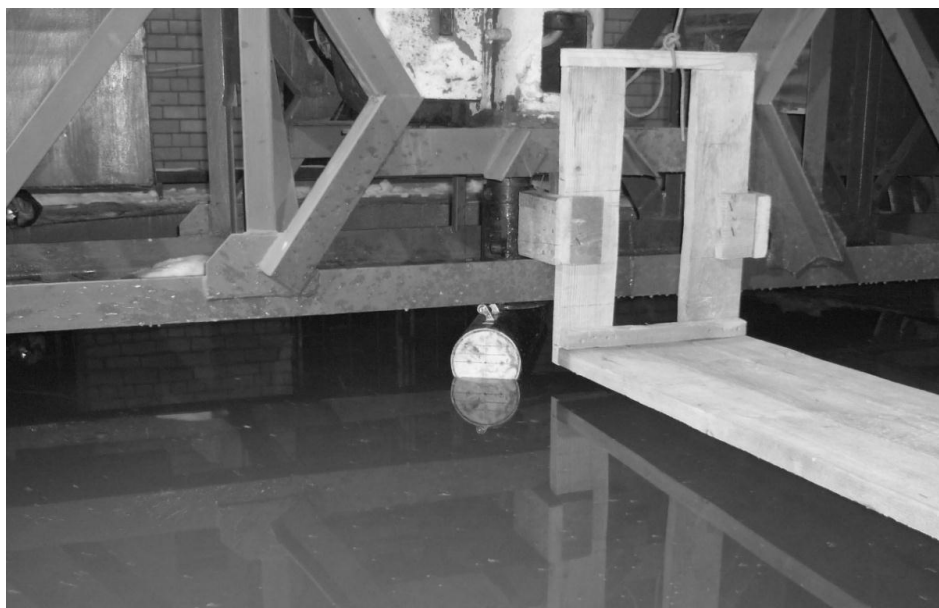


Рис. 2. Модель энерго модуля

Для моделирования погружения ядерного энерго модуля были выполнены модели судна диаметром  $\varnothing 168$  мм и длинами 500, 750, 1000 и 1500 мм. Модели выполнены из стальной трубы с толщиной стенки 10 мм. С торцов трубы заглушены и на заглушках нанесены отметки ватерлиний, соответствующие осадкам 84, 104 и 125 мм.

Эксперименты выполнялись для моделей для следующих случаев:

- модель  $L = 500$  мм для осадки  $T = 84$  мм;
- модель  $L = 750$  мм для осадок  $T = 84, 104, 125$  мм;
- модель  $L = 1000$  мм для осадки  $T = 84$  мм;
- модель  $L = 1500$  мм для осадок  $T = 104, 125$  мм.

Изображение одной из моделей энерго модуля, установленной в ледовом опытовом бассейне, показано на рис. 2.

Опыты проводились для льда различной толщины. В ходе проведения опытов производилась запись усилия, развиваемого на динамометре, и величина прогиба ледяного покрова с помощью датчиков и аналогово-цифровой платы на компьютер и обрабатывалась с помощью программного обеспечения.

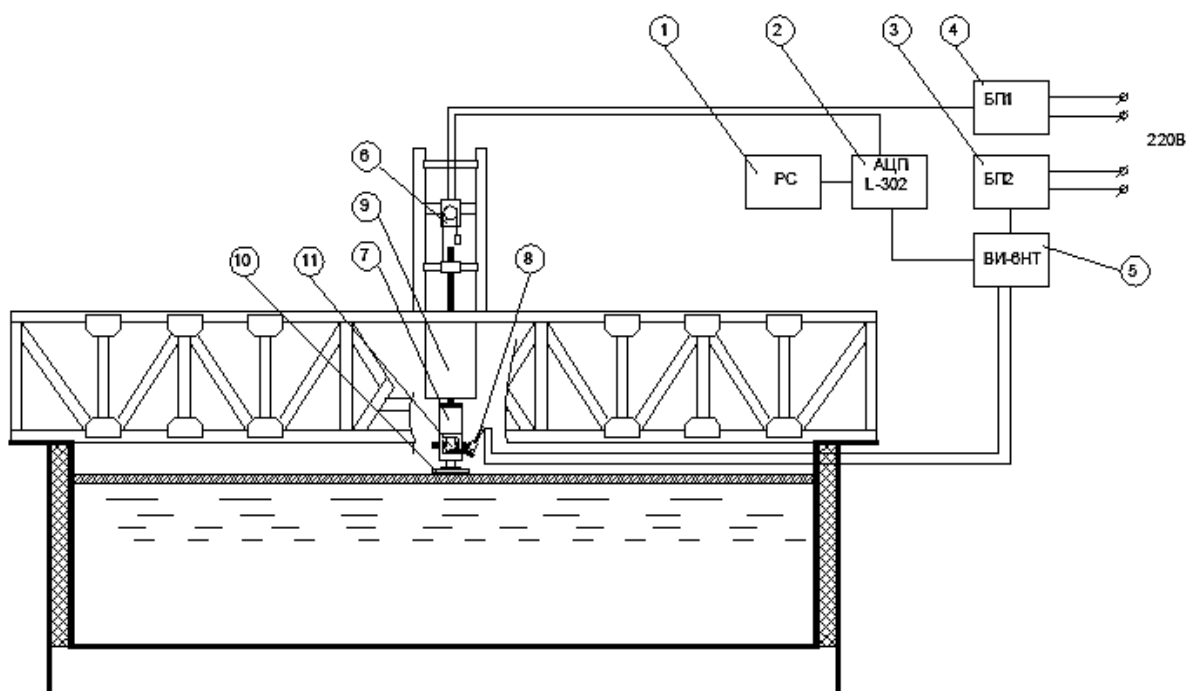
Перед началом проведения всех опытов была произведена градуировка всех измерительных приборов.

Схема испытательной установки представлена на рис. 3.

Опытовый круглый ледовый бассейн имеет диаметр 4,4 м и глубину 0,7 м. На planшире бассейна смонтирована ферма, внутри которой установлен механический пресс (поз. 9) для нагружения ледяного покрова. В качестве прессы используется универсальная испытательная машина УММ-5 с предельной нагрузкой 49 кН. Машина имеет пять скоростей нагружения: 2, 4, 10, 20, 50 мм/мин. Испытательная машина жестко закреплена на ферме. Пролом осуществляется нижней консолью. Для привода прессы используется двухскоростной реверсивный асинхронный электродвигатель типа А032 мощностью 0,75 кВт при 1420 об/мин и 1,00 кВт при 2850 об/мин. Управление прессом осуществляется непосредственно с пульта на испытательной машине или с выносного пульта.

На шток прессы навинчивается силоизмеритель 7, в который монтируется динамометр сжатия системы Н.Г. Токаря типа ДООУ-1 II для пролома в направлениях вниз и вверх. В динамометр на место индикатора часового типа устанавливается датчик линейного перемещения ДП-2СМ 8, для измерения усилия, развиваемого на динамометре. Датчик питается от виброизмерительного прибора ВИ6-6ТН. С помощью ВИ6-6ТН сигнал от датчика передается

на плату аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) 2 и далее с помощью программного обеспечения, поставляемого вместе с АЦП, записывается на компьютер 1. Для питания виброизмерительного прибора ВИ6-6ТН используется источник питания постоянного тока Б5-8. Для измерения перемещения штока прессы используется потенциометр ПТП-1 6, на который установлен шкив, через который перекинута нить. Один конец нити закреплен на штоке прессы, на другом подвешен груз, чтобы обеспечить натяжение нити. Сам датчик закреплен на перекладине, между колоннами прессы, которые служат опорами для верхнего конца штока. Питание потенциометра осуществляется от источника питания постоянного тока Б5-12. Сигнал от датчика непосредственно передается на АЦП. Для уменьшения помех все оборудование заземлено на общую «землю».



**Рис. 3. Схема экспериментальной установки:**

1 – Персональный компьютер; 2 – аналогово-цифровая плата; 3 – блок питания Б5-12 для питания потенциометра ПТП-1; 4 – блок питания Б5-8 для питания виброизмерительного прибора ВИ6-6ТН; 5 – виброизмерительный прибор ВИ6-6ТН для питания и приема сигнала с датчика усилия; 6 – потенциометр ПТП-1 для измерения перемещения штока прессы; 7 – силоизмеритель, для размещения динамометра; 8 – датчик линейных перемещений для измерения усилия; 9 – пресс; 10 – съемный штамп для пролома льда; 11 – динамометр сжатия ДОУ-1

Перед проведением опытов все датчики были проградуированы. Градуировка производилась в лабораторных условиях и в натуральных условиях для силоизмерительной системы. В результате градуировки в лаборатории и в натуральных условиях градуировочные коэффициенты совпали.

В результате испытаний были получены диаграммы разрушающих усилий от прогиба ледяного покрова. Характерный вид такой зависимости показан на рис. 4. Были получены значения проломного усилия в зависимости от отношения длины к ширине нагрузки, площади ватерлинии энергомодуля. Также была исследована качественно картина процесса разрушения ледяного покрова.

Полученные результаты были пересчитаны на проект натурального судна. Были определены предельные толщины льда, при которых возможно безопасное погружение и всплытие энергомодуля.

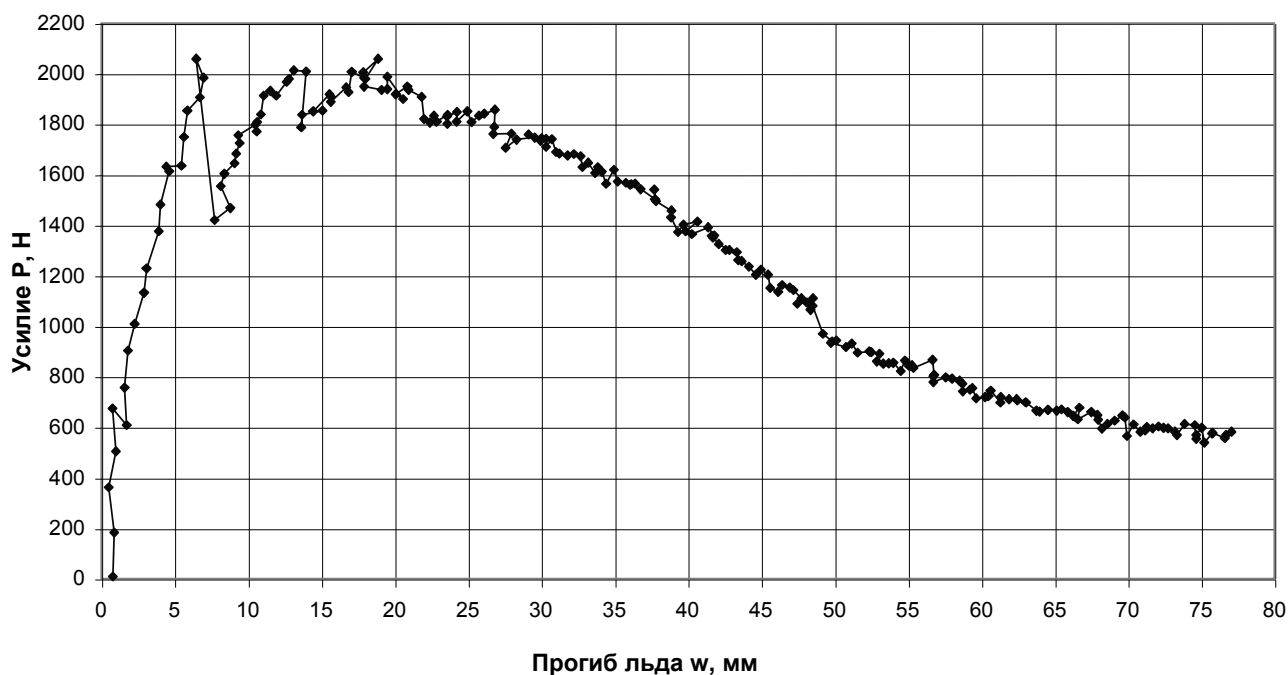


Рис. 4. Характерная диаграмма разрушения ледяного покрова

#### Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001 – 512 с.
2. **Зуев, В.А.** Моделирование ледового сопротивления судов. / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2011. №3 (90). С. 190-195.

Дата поступления  
в редакцию 21.01.2013

**A.G. Larin**

#### RESEARCH STAND FOR DEFINITION POSSIBILITY A DIVE AND EMERSION THE ENERGY MODULE IN ICE CONDITIONS

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

This article describes the research stand for determine possibility the descent and ascent of the energy module in ice conditions.

Overview process of the modeling in the natural ice conditions and conversion formulas model data for the full -scale ship was given.

Demonstrated the possibility of using the method of modeling in natural ice to simulate the fracture process.

The technique of model tests and data processing was showed.

Chart breaking force from of the deflection of the ice cover were obtained as result the test. The typical form of this dependence is shown.

Values failure force depending on the ratio of length to width of the load, waterline area for power module were obtained.

We investigated the qualitative picture of the process of destruction of ice cover. The results were converted to the project full-scale ship. Identified marginal ice thickness, when it is possible safe diving and surfacing power module.

*Key words:* energy module, research stand for ice condition, model natural ice, Arctic, chart damage ice cover.

УДК 621.43

И.Л. Захаров, В.Л. Химич, А.Н. Тарасов, А.В. Дегтярев, Л.А. Захаров

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГИИ РАБОЧЕГО ТЕЛА В СОВРЕМЕННЫХ ПОРШНЕВЫХ ДВС, РАБОТАЮЩИХ НА ТОПЛИВЕ РАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, ДО УРОВНЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены перспективные методы повышения энергии рабочего тела в современном поршневом ДВС, обеспечивающие выполнение требований энергетических, экономических и экологических стандартов Евро-6 и выше при эксплуатации их в составе водного, наземного и воздушного транспорта.

*Ключевые слова:* поршневые двигатели внутреннего сгорания, энергия, химический состав энергоносителя и окислителя топлив.

Бурное развитие промышленности и поршневых ДВС в составе водного, наземного и воздушного транспорта, а также в когенерационных и стационарных установках в начале XXI века, связанное с научно-техническим прогрессом, вызвало серьёзный рост энергопотребления и, как следствие, потребление энергоносителей углеводородных топлив природного и искусственного происхождения.

В качестве объекта исследования является рядный четырехцилиндровый двигатель четвертого поколения модельного ряда ЗМЗ, устанавливаемый на водный, наземный и воздушный транспорт (рис. 1).

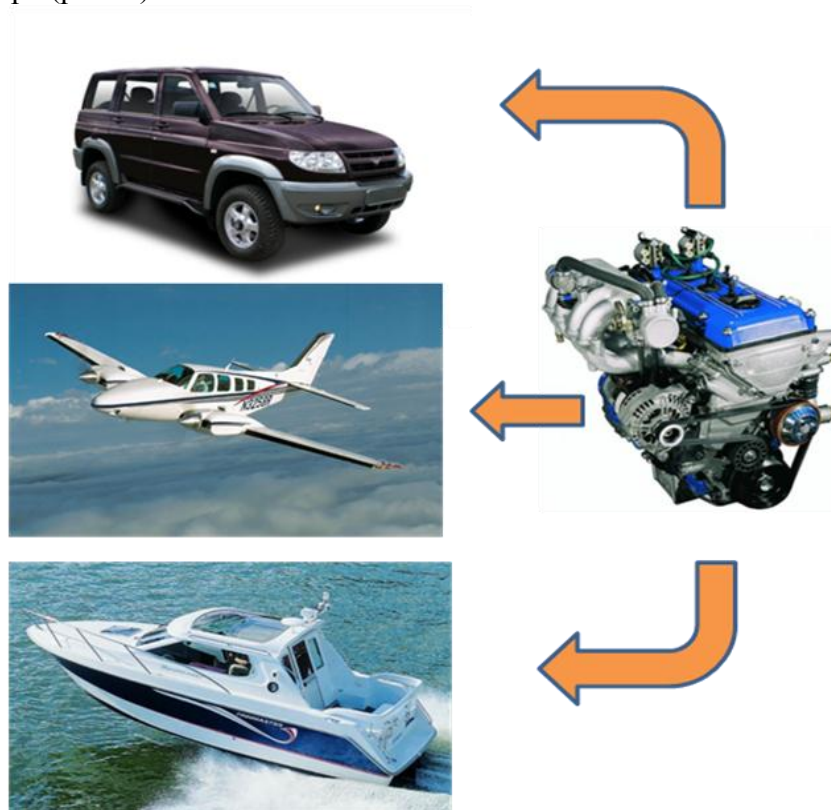


Рис. 1. Современный поршневой ДВС, устанавливаемый на водный, наземный и воздушный транспорт



Его техническая характеристика: рабочий объем  $V_h=2,445$  л,  $S/D=92/92=1$ , эффективная мощность  $N_e=66,2$  кВт при  $n=4500$  мин<sup>-1</sup>, масса  $m=181$  кг, удельный расход топлива  $g_e=0,348$  кг/(кВт·ч) при  $n=4500$  мин<sup>-1</sup>, коэффициент наполнения  $\eta_n=0,695$  при  $n=4500$  мин<sup>-1</sup>, эффективный КПД  $\eta_e=0,235$ , Бензин А-76, степень сжатия  $\varepsilon=6,7$ .

Анализ и синтез показал его следующие проблемы:

- 1) низкий КПД 0,22...0,29;
- 2) энергетические и экологические показатели ниже мировых стандартов.

### Энергетическое совершенствование поршневых атмосферных ДВС

Энергетические, экономические и экологические отечественные и европейские стандарты водных, наземных и воздушных транспортных средств предъявляют всесторонние эксплуатационные требования к современным поршневым двигателям.

Выполнение перспективных по экологической безопасности стандартов требует модернизации, синтеза и внедрения поршневого ДВС, обеспечивающего заданную топливную экономичность – **критерий оценки, который** определен стандартом на выброс диоксида углерода  $CO_2$  при выполнении рациональных и других эксплуатационных показателей. Прогресс по обеспечению заданных перспективных критериев оценки экологической безопасности стандартов, в том числе Евро-6 и выше, требует разработать:

- метод выбора эффективного термодинамического цикла работы поршневого ДВС, используя современные энергетические технологии;
- метод выбора эффективных органов выпуска и впуска подсистемы газообмена, рабочей камеры кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и заполнение её рабочим телом (воздухом с повышенным содержанием кислорода) до нормальных условий и выше:  $p_0=100000$  Па,  $T_0=298,16$  К,  $\rho=1,168608$  кг/м<sup>3</sup> по стандартам на поршневой ДВС;
- метод выбора топлив и окислителя топлив по химическим компонентам и по их критериям оценки.

### Метод современных перспективных энергетических технологий (выбора рабочего цикла) поршневого ДВС

В современных поршневых ДВС часть внутренней (химической) энергии паров топлива, сгораемых в рабочей камере, преобразование которых в механическую энергию происходит через ряд последовательных физико-химических и термодинамических преобразований в открытой термодинамической системе [1, 4].

Однако непосредственное исследование рабочего цикла затруднено сложностью всей совокупности факторов, влияющих на протекание рабочих процессов в целом. К таким факторам относятся следующие режимы работы поршневого атмосферного ДВС: масса и состав смеси, способ смесеобразования и момента воспламенения, предварительное сжатие массы смеси и многие конструктивные, регулировочные, а также управляющие факторы.

Кроме того, в поршневых ДВС имеет место одновременное протекание термодинамических, газодинамических, химических и тепломассообменных процессов, кратких по времени и накладывающихся друг на друга, что еще больше усложняет картину явлений в современном перспективном рабочем цикле поршневого атмосферного двигателя.

Поэтому оценку влияния отдельных факторов на рабочие процессы целесообразно осуществлять последовательно, рассматривая в цикле главные процессы в простейшей форме. Ввиду сложности явлений, происходящих в рабочей камере цилиндра современного ДВС, оценку влияния отдельных факторов на рабочие процессы целесообразно осуществлять последовательно, рассматривая в цикле главные процессы в простейшей форме, т.е. в открытой термодинамической системе.

При таком принципе протекания в рабочей камере цилиндра теоретического двигателя сложных явлений, получения и преобразование внутренней энергии рабочего тела в меха-

ническую энергию, рабочие циклы превращаются в идеальные, в которых «методом научного исследования» возможно уложить все рабочие процессы в рамки чисто термодинамической задачи [2, 3].

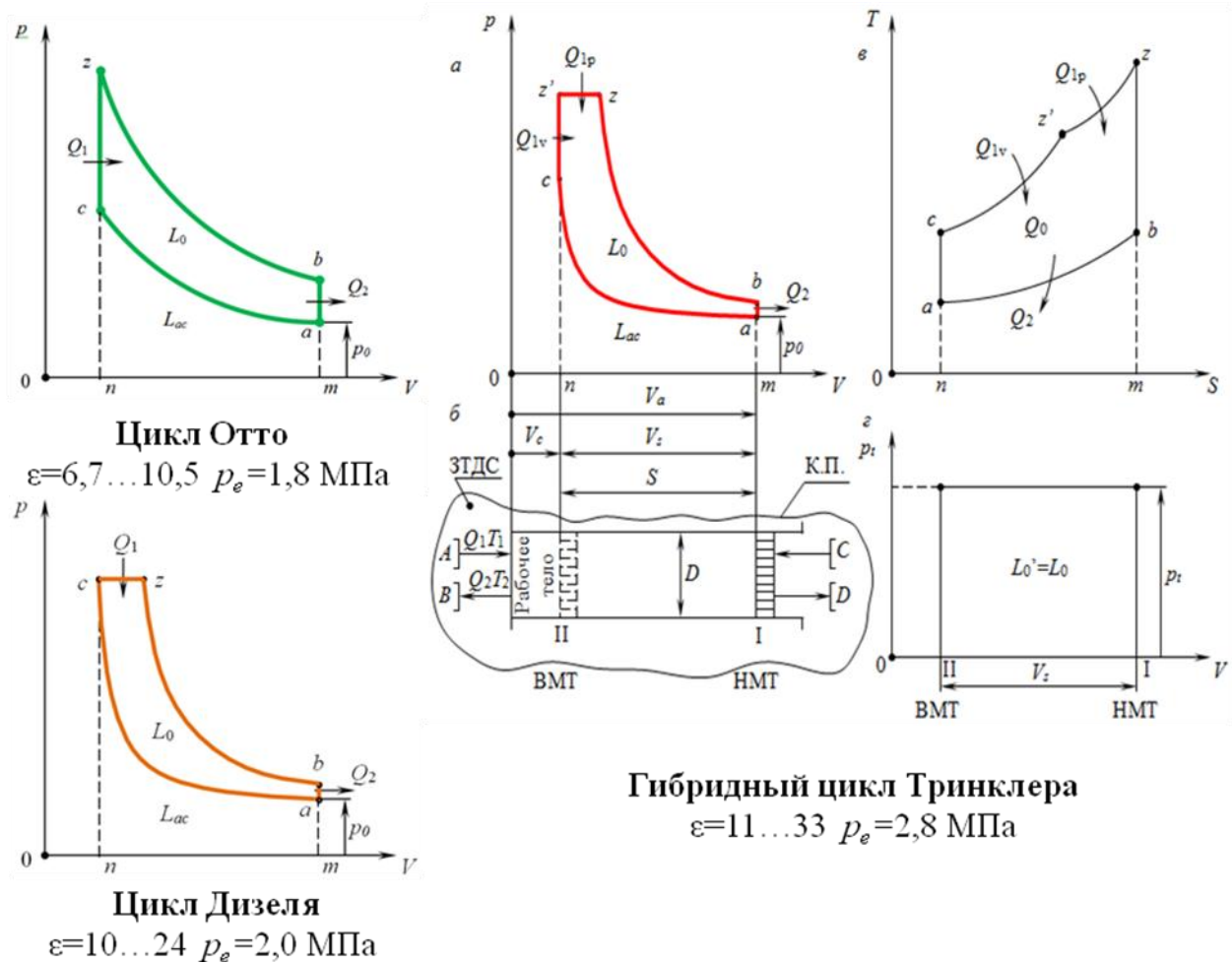


Рис. 2. Современные схемы выбора эффективного термодинамического цикла работы поршневого ДВС

На рис. 2 приведены основные термодинамические циклы, по которым работают поршневые атмосферные ДВС, отличающиеся подводом и отводом теплоты к рабочему телу в закрытой термодинамической системе:

- 1) цикл Отто, двигатели, работающие по циклу с подводом и отводом внутренней энергии к рабочему телу при постоянном объеме;
- 2) цикл Дизеля, двигатели, работающие по циклу с подводом внутренней энергии к рабочему телу при постоянном давлении, а отвод ее при постоянном объеме;
- 3) цикл Тринклера, двигатели, работающие по циклу с подводом внутренней энергии к рабочему телу частично при постоянном объеме и частично при постоянном давлении, а отвод – при постоянном объеме;
- 4) цикл Карно, на рис. 2 не показан, двигатели, работающие по циклу с подводом и отводом внутренней энергии к рабочему телу при постоянной температуре.

По циклу Карно, сравнивают двигатели, работающие по циклам Отто, Дизеля и Тринклера по известным термодинамическим методам расчета.

Основными термодинамическими показателями любого цикла, по которым работают поршневые атмосферные ДВС, являются:

- 1) **экономичность**, характеризуется термодинамическим КПД  $\eta_t$ , часовым  $G_t$  и удельным термодинамическим  $g$ , расходами условного топлива;

2) **эффективность**, определяемая удельной работой цикла, т.е. работой, приходящейся на единицу разности между максимальным и минимальным объемами рабочего тела в цикле.

Чем **больше** удельная полезная работа, тем **меньше** размеры рабочего цилиндра поршневого атмосферного двигателя потребуются для получения заданных энергетических термодинамической мощности  $N_t$  и среднего термодинамического давления цикла  $p_t$ .

**Цикл Отто**, рис. 2, характеризуется:

1. Рабочим объемом цилиндра (полным):

$$V_a = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}, \text{ м}^3;$$

2. Термодинамическим КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\delta^{k-1}} = 1 - \frac{T_a}{T_c};$$

3. Средним термодинамическим давлением цикла:

$$p_t = \frac{Q_1}{0,785 \cdot D^2 \cdot S_n} \cdot \eta_t, \text{ МПа.}$$

**Цикл Дизеля**, рис. 2, характеризуется:

2. Термодинамическим КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k \cdot (\rho - 1)}.$$

**Цикл Тринклера**, рис. 2, характеризуется:

2. Термодинамическим КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{L_t}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{\delta^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}.$$

В табл. 1 приведены значения характерных параметров и КПД этих циклов для исходных данных:  $p_0 = 0,1$  МПа и  $k = 1,40$ .

Таблица 1

Основные параметры циклов при одинаковом значении подвода теплоты  $q_u$

Параметры	Подвод теплоты в циклы		
	Отто $V=\text{const}$	Дизеля $p=\text{const}$	Тринклера $V=\text{const}$ $p=\text{const}$
Степень предварительного сжатия $\varepsilon$	7	14	21
Степень повышения давления $\lambda$	6,897	1,0	3,156
Степень предварительного расширения $\rho$	1,0	4,201	1,57
Термодинамический КПД $\eta_t$	0,5408	0,4984	0,6876
Максимальное термодинамическое давление цикла $p_z$ , МПа	10,66	4,077	22,698
Среднее термодинамическое давление цикла $p_e$ , МПа	2,053	1,751	2,012

**Формулы** термодинамического КПД циклов показывают, что при постоянной максимальной массе рабочего тела в полном объеме цилиндра, величина термодинамического

КПД цикла возрастает с увеличением степени предварительного сжатия, причем решающим фактором является не степень сжатия сама по себе, а степень расширения, величина которой при прочих равных условиях увеличивается с увеличением степени предварительного сжатия.

При этом следует отметить, что при снятии внешней скоростной характеристики с современного поршневого атмосферного ДВС на современном моторном стенде автоматически отмечается **момент** положения максимального давления цикла  $P_z$  относительно верхней мертвой точки (ВМТ) по углу поворота коленчатого вала (п.к.в.), который позволяет с высокой точностью определить степень расширения рабочего тела.

Увеличение степени расширения при одинаковом количестве внутренней энергии является следствием увеличения  $\Delta U$  – фактора изменения внутренней энергии – или при адиабатическом процессе расширения – увеличение полезной работы расширения и, следовательно, работы цикла.

Поэтому для **современных** и **перспективных** поршневых атмосферных ДВС **увеличение** степени расширения **является ключом** к повышенному КПД двигателя.

Так как между степенью расширения  $\delta$  и степенью предварительного сжатия  $\epsilon$  для всех термодинамических циклов существует определенная связь, а величина предварительной степени сжатия представляет удобную для расчета величину, основанную на конструктивных данных двигателя, то принято формулы термодинамических КПД выражать через величину предварительной степени сжатия, хотя с **методической точки зрения** было бы правильно **пользоваться** величиной степени расширения как более **оптимальной**.

Следует отметить, что современные поршневые атмосферные ДВС (судя по экспериментальным индикаторным диаграммам) работают по циклу Тринклера.

### **Метод выбора подсистемы газообмена и рабочей камеры КШМ для повышения внутренней энергии рабочего тела**

Поршневые атмосферные бензиновые двигатели работают в составе транспортного средства с существенно более низкими энергетическими показателями, чем на моторном стенде.

Так как нагрузка контролируется внутренней энергией рабочего тела, этот **определяющий параметр** может быть **использован как ключ** для воздействия на повышение полезной работы действительного термодинамического цикла. Такое воздействие для современного поршневого ДВС необходимо на полном дросселе. Оно позволяет повысить эксплуатационные характеристики двигателя, так необходимые для удовлетворения требований эффективной работы транспортного средства.

Отечественный и зарубежный опыт проведения экспериментальных работ показал, что выполнение норм Евро-4 потребовал увеличения рабочего объема двигателя на 10...12%, при этом были сохранены энергетические показатели двигателя.

Экологические стандарты Евро-5 и более требуют применения современного метода для исследования новых рабочих процессов термодинамического цикла поршневого ДВС.

*1. Индикаторная диаграмма и экспериментальные технические характеристики и анализ протекания рабочих процессов в рабочей камере КШМ*

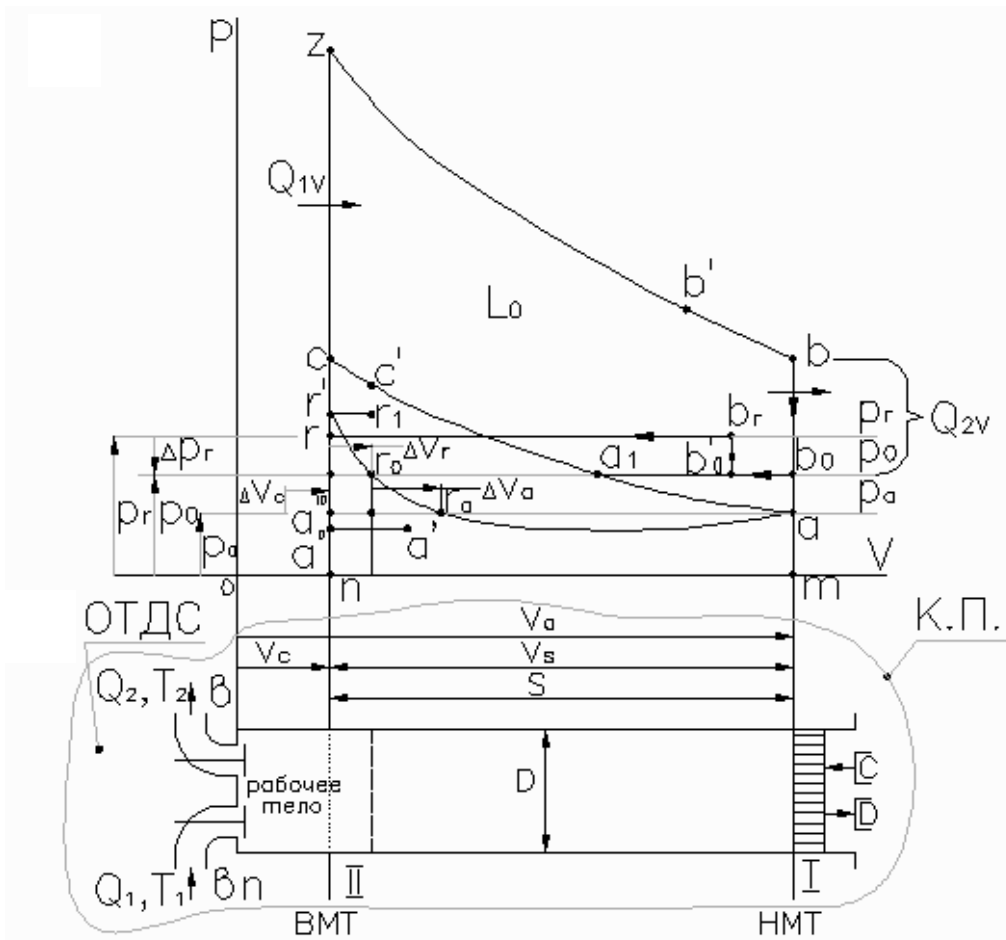
На рис. 3 показана схема индикаторной диаграммы, на которой дана диаграмма процесса принудительного выпуска отработавших газов при наличии в рабочей камере КШМ «вредного» пространства, объем которого равен объему камеры пространства предварительного сжатия рабочей смеси  $V_c$  между головкой и поршнем в крайнем положении при сжатии.

Наличие «**вредного**» пространства вводит новый процесс в рабочую диаграмму. Этот процесс расширения остаточных газов с давлением  $p_r$ , ( $\cdot$ )  $r'$ , до давления конца процесса

расширения остаточных газов  $p_r$ , ( $\cdot$ )  $r_a$  (процесс  $r'r_0r_a$ ). Только после его окончания может начаться процесс наполнения. Новый процесс расширения ( $r'r_0r_a$ ) остаточных газов объемом  $V_c$  можно разделить на два последовательно повторяющихся процесса.

Первый процесс, доля потерянного хода поршня при его перемещении от точки  $r'$  до точки  $r_0$ . При этом давление  $p_r$  уменьшается до  $p_0$ , а их разность равная  $\Delta p_b = p_r - p_0$  характеризует значительное гидравлическое сопротивление органов выпуска. Для уменьшения  $\Delta p_b$  необходима настройка органов выпуска.

Второй процесс, потерянного хода поршня при его перемещении от точки  $r_0$  до точки  $r_a$ . При этом давление  $p_0$  уменьшается до  $p_a$ , а их разность, равная  $\Delta p_{вп} = p_0 - p_a$ , характеризует значительное гидравлическое сопротивление органов впуска. Для уменьшения  $\Delta p_{вп}$  необходима настройка органов впуска.



**Рис. 3. Схема процессов выпуска и впуска при газообмене в цилиндре атмосферного ДВС, работающего по циклу Отто в  $Vp$  диаграммах:**

$b'bb_0b_r$  – свободный выпуск;  $b_rr'$  – принудительный выпуск;  $r'r_1$  – свободный выпуск;  $a'a'a''$  – предварение впуска;  $a'a''r'r_1$  – продувка камеры предварительного сжатия;  $aa_1$  – опаздывание впуска;  $a_1c'$  – процесс предварительного сжатия;  $cz$  – процесс сгорания;  $z'b'b$  – процесс расширения;  $r'r_0r_a$  – линия протекания давления в цилиндре в процессе наполнения

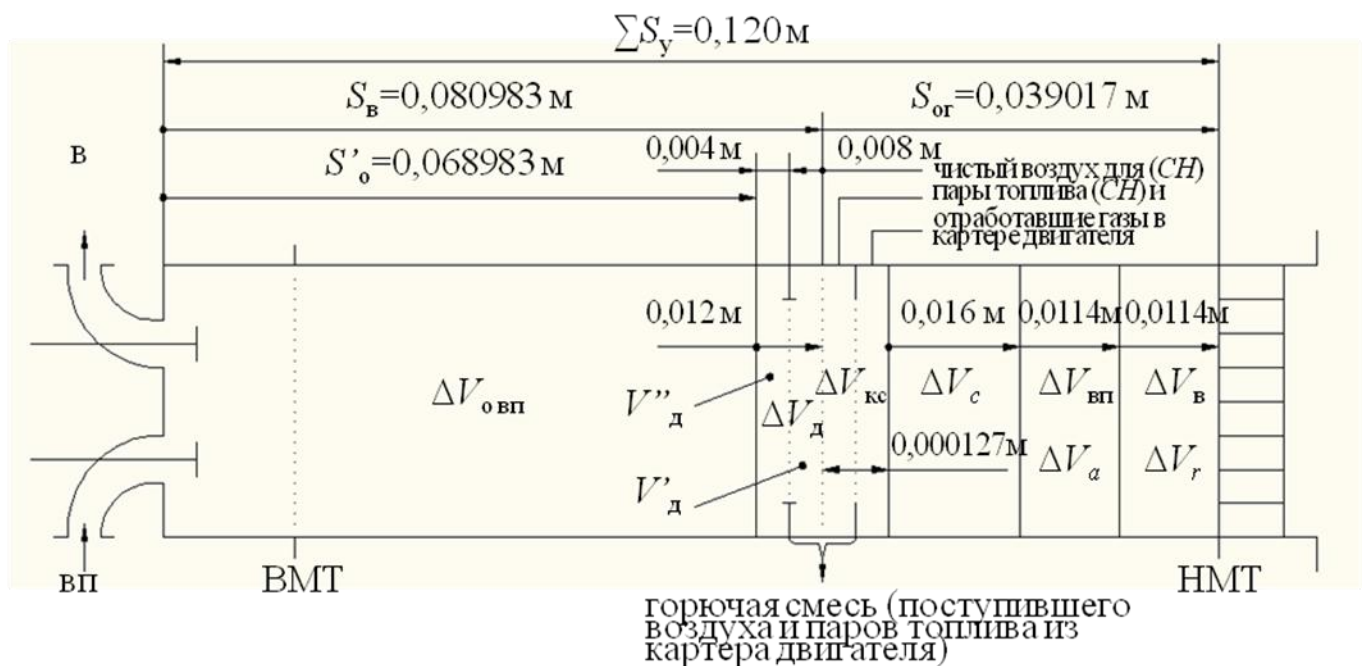
*2. Получение внутренней энергии рабочим телом в рабочей камере КШМ*

На рис. 4 приведена принципиальная схема распределения и получения внутренней энергии рабочим телом, где  $\Delta V_b$  – доля потерянного хода поршня от гидравлического со-

противления органов выпуска,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V_{\text{вп}}$  – доля потеряннного хода поршня от гидравлического сопротивления органов впуска,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V_c$  – доля потеряннного хода поршня от «**вредного пространства**» камеры предварительного сжатия, т.е. отсутствия продувки ее от остаточных газов,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V_{\text{кс}}$  – доля потеряннного хода поршня от удаления **картерной смеси**, состоящей из 50% паров топлива и 50% отработавших газов, из картера двигателя,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V_d = V'_d + V''_d$  – условная дозарядка **воздухом** рабочей камеры КШМ, расходуемое  $V'_d$  на сгорание паров топлива картерной смеси и  $V''_d$  на увеличение массового наполнения для повышения внутренней энергии,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V_{\text{овп}}$  – горючая смесь для получения внутренней энергии рабочего тела,  $\text{м}^3$ .

Прежде всего, в рабочей камере КШМ начинают расширяться остаточные газы (ОГ) с  $p_r$  до  $p_0$ , рис. 3; и только после преодоления гидравлических сопротивлений в органах впуска с  $p_0$  до  $p_a$  ОГ прилипают к днищу поршня и отделяются эластичными перегородками:  $V_{\text{в}}$  – выпуска,  $V_{\text{вп}}$  – впуска,  $V_{\text{пс}}$  – предварительного сжатия и вместе с поршнем перемещаются до положения поршня в НМТ.

При перемещении поршня от точки  $r_a$  до точки  $a$  (НМТ) в рабочую камеру поступают: **картерная смесь**, состоящая из 50% отработавших газов и 50% паров топлива, определяемая экспериментом  $V_{\text{кс}}$ ; свежее рабочее тело от процесса дозарядки  $V_d$ , а затем основной впуск свежего заряда в рабочую камеру КШМ  $V_{\text{вп}}$  и на этом совокупность газодинамических и термодинамических явлений процесса наполнения заканчивается.



**Рис. 4. Принципиальная схема изображения условных парциальных объемов и внутренней энергии рабочего тела в цилиндре поршневого ДВС**

В современных атмосферных поршневых ДВС с внешним смесеобразованием более точным будет расчет с учетом всех составляющих баланса энергии.

В общем виде полный баланс энергии за ход наполнения и сжатия:

1. В общем виде полный баланс энергии за ход наполнения:

$$U_{ог} + U_{вп} + L_{вп.с.з} + Q_{вп.с.з} + U_{кс} + U_{д} = U_{а} + L_{н.р.с} + U_{s},$$

где  $U_{ог} = c_r \cdot M_{ог} \cdot T_r$ , Дж – внутренняя энергия остаточных газов;

$U_{вп} = c_v \cdot M_{в} \cdot (T_{н.у.} - T_i) + m_t \cdot Q_{н}$ , Дж – внутренняя энергия свежего заряда;

$L_{вп.с.з.} = p_0 \cdot V_s \cdot \eta_{н}$ , Дж – работа, затраченная на выпуск свежего заряда;

$Q_{вп.с.з.} = c_p \cdot M_{общ} \cdot \Delta T$ , Дж – теплота, полученная свежим зарядом при подогреве его от

поверхностей стенок органов выпуска;

$U_{кс} = m_{ткс} \cdot Q_{н}$ , Дж – внутренняя энергия картерной смеси;

$U_{д} = c_v \cdot M_{в,д} \cdot T_{н.у.} + m_{т,д} \cdot Q_{н}$ , Дж – внутренняя энергия свежего заряда от дозарядки рабочей камеры КШМ;

$U_{а} = c_v \cdot (M_{общ} + M_{ог}) \cdot T_{а}$ , Дж – внутренняя энергия рабочей смеси в конце хода наполнения;

$L_{н.р.с.} = \int_{r'}^a p \cdot dV$ , Дж – работа, совершаемая рабочей смесью за ход наполнения;

$U_s = \frac{\omega_{ц}^2}{2} \cdot (M_{общ} + M_{ог})$ , Дж – энергия движения рабочей смеси в цилиндре в конце

выпуска. Полагая  $\omega_{ц} = 0$  и выражая работу наполнения через  $\mu_{в} \cdot p_a \cdot V_s$  (где  $\mu_{в}$  – коэффициент

работы наполнения,  $\mu_{в} = \frac{\int_{r'}^a p dV}{p_a \cdot V_s}$ ).

По данным обработки индикаторных диаграмм  $\mu_{в} = 0,82...0,9$ .

2. В общем виде полный баланс энергии за ход сжатия:

$$L_s + U_{э.и.р} = U_c,$$

где  $L_s = \frac{1}{n_1 - 1} \cdot (p_c \cdot V_c - p_a \cdot V_a)$ , Дж – абсолютная работа сжатия между точками  $a$  и  $c$ ;

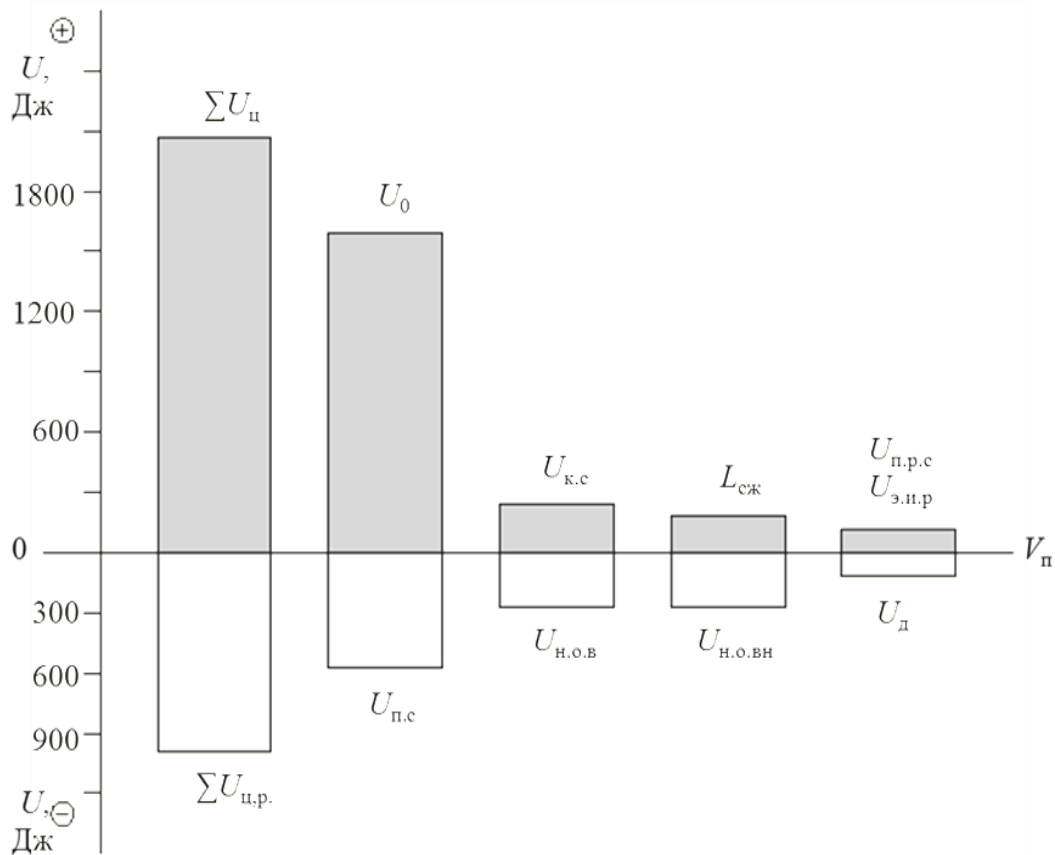
$U_{э.и.р} = 0,080$ , Дж – внутренняя энергия искрового разряда по данным эксперимента.

Используя рис. 3 и рис. 4, а также формулы полного баланса энергии рабочего тела за ход наполнения и сжатия выполнен расчет и проведен анализ и синтез повышения внутренней энергии рабочего тела. Результаты выполненной работы приведены на рис. 5.

Необходимо отметить следующие проблемы, связанные с использованием метода выбора органов подсистемы газообмена и рабочей камеры КШМ для четырехцилиндрового атмосферного поршневого двигателя четвертого поколения модельного ряда ЗМЗ:

- **большой** прорыв рабочей смеси в процессе сжатия и смесеобразования, а также отработавших газов в процессе сгорания и расширения через кольцевое уплотнение в картер двигателя и, как следствие, большой прорыв **картерной смеси** через кольцевое уплотнение из картера двигателя обратно в рабочую камеру КШМ в процессе наполнения. Эту проблему можно решить соответствующим выбором размеров, формой, микрорельефом инженерного решения цилиндра, поршня, колец и кинематики КШМ;
- большое гидравлическое сопротивление органов выпуска может быть уменьшено выбором геометрии и газодинамической настройки в составе транспортного средства;
- большое гидравлическое сопротивление органов выпуска. Эту проблему можно решить настройкой подсистемы газообмена расчетным способом и подтвердить экспериментом; так как масса циклового воздушного заряда определяет его энергетический по-

тенциал, поскольку от нее зависит количество топлива, способное полностью и своевременно сгореть в рабочей камере КШМ. Поэтому в современном бензиновом двигателе этой проблеме уделяется значительное внимание.



**Рис. 5. Схема распределения внутренней энергии рабочего тела по условным парциальным объемам в цилиндре поршневого ДВС**

**Метод выбора топлив и окислителя топлив по химическим компонентам и по их критериям оценки**

В работе применен термодинамический метод выбора топлив и их окислителей (см. табл. 2).

**Таблица 2**

**Цикловые термодинамические показатели выбора топлива по химическому составу и его окислителя**

Топливо	$m_{в,ц,лц}, кг$ $m_{O_2,ц,лц}, кг$	$l_0, \frac{кг.воздуха}{кг.топлива}$ $l_0, \frac{кг.кислорода}{кг.топлива}$	$m_{т,ц,лц}, кг$	$Q_n, Дж/кг$	$Q_{1,ц,лц}, Дж$	$G_i$
1	2	3	4	4	6	7



Пылевидное углеродное топливо C=1,0 H=0,0	0,000929505225	11,494	0,0000808687 34	34106600	2964	129 %
	0,000215645212	2,666608				

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Жидкое тяжелое топливо C=0,9 H=0,1	0,000929505225	13,793	0,0000673896 34	40939150	2964	107,5 %
	0,000215645212	3,199976				
Дизельное топливо C=0,874 H=0,126	0,000929505225	14,391	0,0000645893 42	42720000	2964	103,0 %
	0,000215645212	3,338712				
Бензин C=0,855 H=0,145	0,000929505225	14,828	0,0000626858 12	44013798	2964	100 %
	0,000215645212	3,440096				
Метан C=0,7618 H=0,2382	0,000929505225	16,970	0,0000547734 37	50381739	2964	87,4 %
	0,000215645212	3,937040				
Водород C=0,0 H=1,0	0,000929505225	34,483	0,0000269554 63	10243210 0	2964	43,0 %
	0,000215645212	8,000056				
Воздух			$O_2=23,2\%$ $N_2=76,8\%$			

Термодинамический метод предусматривает:

- 1) выбор топлива по химическому составу по Российским и Европейским стандартам;
- 2) цикловая масса воздуха и кислорода выбирается при термодинамических условиях для полного объема цилиндра;
- 3) теоретически необходимое количество воздуха и кислорода рассчитывается аналогично химическому составу топлива;
- 4) цикловой расход топлива рассчитывается по общепринятым методикам поршневого ДВС;
- 5) низшая теплота сгорания рассчитывается по общепринятым методикам на поршневой ДВС;
- 6) внутренняя энергия рабочего тела рассчитывается также по общепринятым методикам на поршневой ДВС.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает: масса воздуха и кислорода постоянная и несменяемая для всех родов топлива. При этом получаем внутреннюю энергию рабочего тела одинаковой для всех родов топлива – это главный (определяющий) параметр сравнения топлив. Однако для получения этой постоянной энергии затрачивается различное количество циклового и часового расхода топлива.

Если принять часовой расход топлива для бензина за 100% то видим: чем больше содержание углерода в топливе, тем меньше низшая теплота сгорания, тем выше часовой расход топлива, и наоборот, чем больше водорода в топливе, тем выше низшая теплота сгорания, и тем меньше часовой расход топлива.

Например, при работе двигателя на пылевидном углеродном топливе часовой расход увеличивается 29%, чем на бензине, а при работе двигателя на природном газовом топливе часовой расход уменьшается на 12,6%, а на чистом водороде на 57%.

Оценка топлива, как правило, ведется по удельному расходу на работающем двигателе.

### **Выводы**

#### **1. Разработан метод выбора эффективного термодинамического цикла с использованием современных энергетических технологий:**

- выбор современного рабочего цикла поршневого ДВС с высокой внутренней энергией рабочего тела;
- получены современные высокие энергетические показатели на уровне перспективных ДВС.

#### **2. Разработан метод выбора подсистемы газообмена и рабочий камеры КШМ для повышения внутренней энергии рабочего тела:**

- повышение внутренней энергии рабочего тела за счет продувки пространства камеры предварительного сжатия на 19 %;
- повышение внутренней энергии рабочего тела за счет настройки органов выпуска на 14%;
- повышение внутренней энергии рабочего тела за счет настройки органов впуска на 14%;
- повышение внутренней энергии рабочего тела за счет дозарядки на 5%.

#### **3. Метод выбора топлив и окислителя топлив по химическим компонентам и по их критериям оценки:**

- разработаны критерии оценки выбора топлив с различным химическим составом;
- определяющим критерием выбрана внутренняя энергия рабочего тела, постоянная для всех видов топлива;
- перспективное повышение внутренней энергии рабочего тела за счет ввода чистого кислорода в воздух с одновременным уменьшением азота в воздухе;
- наиболее перспективным топливом рекомендуется природное газовое топливо и водород.

### **Реализация метода**

Материалы методы используются:

- при создании новых и модернизации серийных поршневых ДВС на моторных предприятиях
- на кафедре «Энергетические установки и тепловые двигатели» НГТУ им. Р.Е. Алексеева при выполнении курсовых, дипломных и магистерских работ по специальности ДВС.

### **Библиографический список**

1. **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.
2. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41-43.
3. **Захаров, Л.А.** Повышение технико-экономических показателей бензиновых двигателей внут-

- ренного сгорания: дисс. ... д-ра техн. наук / Захаров, Л.А. – Н. Новгород, 2000. – 413 с.
4. **Захаров, Л.А.** Методика исследования и расчет термодинамических циклов поршневого ДВС с переменной степенью сжатия/ Л.А. Захаров, Н.А. Адясова, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Международной студенческой научно-технической конференции по технической термодинамике для ДВС, посвященной 50-летию ЗФ НГТУ им. Р.Е. Алексева: сб. научн. тр. / НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2010.
  5. Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Отто, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2010. – 33 с.
  6. Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Карно, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2010. – 14 с.

*Дата поступления  
в редакцию 21.01.2013*

**I.L. Zakharov, V.L. Khimich, A.N. Tarasov, A.V. Degtyarev, L.A. Zakharov**

**METHODS OF INCREASING ENERGY WORKING FLUID IN THE MODERN PISTON ENGINE RUNNING ON FUELS OF DIFFERENT CHEMICAL COMPOSITION, TO LEVELS PERSPECTIVE ENERGY, ECONOMIC AND ENVIROMENTAL STANDARDS**

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

Promising methods of increasing energy of the working body in the modern piston engine to meet the requirement of energy, economic and environmental standards Euro-6 and above in the operation as part of their water, land and air transportation.

The object of study is the inline four-cylinder engine of fourth generation, which is set on the water, land and air vehicles.

As a result, the method of selecting efficient thermodynamic cycle with the use of modern technologies in the field of energy; the method of selecting a subsystem of gas exchange and the chamber of a crank mechanism to increase the internal energy of the working of the body; the method of selecting the fuel and oxidizer fuel chemical components and criteria for their evaluation are developed.

*Key words:* Internal combustion piston engines, energy, chemical composition and oxidizer fuel energy source.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 004.415.2

С.А. Анисимов<sup>1</sup>, А.Б. Лоскутов<sup>1</sup>, И.В. Полозов<sup>1</sup>, А.И. Смирнов<sup>2</sup>, Е.Н. Соснина<sup>1</sup>

### РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-ТИРИСТОРНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ С КЛЮЧАМИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ТОКА (ТТРНМ ОТ)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Общество с ограниченной ответственностью «Теком»<sup>2</sup>, г. Н. Новгород

**Цель работы:** Исследование и разработка программного обеспечения системы управления электрическими сетями, состоящими из узлов, содержащих ТТРНМ ОТ и обеспечивающих одновременную возможность автономной работы каждого распределительного узла и централизованное управление всей совокупностью элементов энергосети.

**Научный подход:** Исследование проведено с использованием графовой модели электрических сетей и с использованием графа коммутационной схемы для модели электрических схем. Проектирование системы проведено с использованием объектно-ориентированного подхода.

**Результат:** Разработана общая концепция и архитектура сети, состоящей из узлов – активно-адаптивных систем управления (ААСУ) и узлов распределённой системы мониторинга и управления (РСМУ).

**Новизна:** Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для хозяйственных задач электроэнергетики, связанных с процессами генерации, распределения и учёта электроэнергии и инвентаризации оборудования узлов. Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6016 от 11.10.2011)

*Ключевые слова:* распределенная система мониторинга и управления, активно-адаптивная система управления, архитектура, топология

### Введение

В существующих схемах построения распределительных сетей, используется преимущественно централизованный ручной подход к управлению аварийными режимами. Основной отличительной чертой данного подхода является зависимость работы секционных аппаратов (разъединителей, пунктов секционирования) от решений верхнего уровня (диспетчера). Для обеспечения возможности выделения (секционирования) поврежденного участка сети на магистрали устанавливаются линейные разъединители. Сетевой резерв выполняется вручную.

В такой схеме при возникновении повреждения на любом участке происходит отключение защитного аппарата на отходящем фидере и все потребители линии на длительное время теряют питание. Для локализации повреждения на фидер выезжает оперативная бригада, и путем последовательных переездов и переключений разъединителей вручную выделяется поврежденный участок сети и запитываются остальные потребители. При данной схеме восстановления электроснабжения задействуется большое количество техники и персонала. Учитывая протяженность и условия прохождения трассы линии, время, затрачиваемое на переезды оперативных бригад, может достигать до нескольких часов и даже суток. Очевидно, что уровень надежности электроснабжения в данном случае крайне низкий.

Для повышения надежности электроснабжения необходимо применять ручной ди-

станционный подход к управлению аварийными режимами. Для этих целей вместо линейных ручных разъединителей требуется устанавливать телеуправляемые разъединители или пункты секционирования с дистанционным управлением. В случае возникновения повреждения все переключения выполняются дистанционно.

Очевидным преимуществом данного подхода является сокращение времени локализации повреждения и затрат. При использовании дистанционного ручного управления аварийным режимом необходимо постоянно контролировать мнемосхему электрической сети и, в случае, возникновения аварийного режима проанализировать факт повреждения и правильно принять решение о ее реконфигурации.

В соответствии с техническим заданием государственного контракта для решения данной проблемы требуется разработать аппаратный комплекс ТТРНМ ОТ, который позволяет решить указанную проблему по управлению электрическими сетями, обеспечивая одновременную возможность автономной работы каждого распределительного узла и централизованное управление всей совокупностью элементов энергосети. Кроме этого, данный узел может являться основой для построения энергетических гридов следующего поколения [1-2].

Разрабатываемое программное обеспечение (ПО) предназначено для функционирования ТТРНМ ОТ в части приема и распределения электрической энергии, автоматизированного управления узлом электрической нагрузки, его защиты, хранения и передачи информации. Комплекс ТТРНМ ОТ включает в себя следующие элементы:

1. Технологическую систему управления ТТРНМ ОТ (ТСУ), которая реализует физическое выполнение команд оперативного управления тиристорным коммутатором отводов регулировочных обмоток с ключами однонаправленного тока, диагностики и измерения необходимых величин функционирования. ТСУ является реализацией самого низшего (физического) уровня управления. Интерфейсом верхнего уровня является активно-адаптивная система управления ТТРНМ ОТ (ААСУ);

2. Активно-адаптивную систему управления ТТРНМ ОТ (ААСУ), которая обеспечивает функции оперативного управления тиристорным коммутатором отводов регулировочных обмоток с ключами однонаправленного тока, диагностики, защиты, измерения, контроля и учета электроэнергии, оперативного хранения и передачи информации на уровень вышестоящей иерархии. ААСУ позволяет обеспечивать работу в автономном режиме при нарушениях связи с верхним уровнем управления;

3. Распределенную систему мониторинга и управления ТТРНМ ОТ (РСМУ), которая реализует централизованное управление набором устройств ТТРНМ ОТ, удаленный доступ к информации и др.

Цель настоящей работы – разработка архитектуры ААСУ и РСМУ, определение поддерживаемых топологий и уровней в графе РСМУ, определение взаимодействия компонентов, разработка дизайна систем ААСУ и РСМУ.

### Функции подсистем ААСУ и РСМУ

ААСУ состоит из следующих подсистем:

- *Подсистема сбора технологической информации* для реализации активно-адаптивной системы – предназначена для сбора, систематизации и предоставления технологической информации о состоянии объекта автоматизации, для последующего решения задач эксплуатации узла и линий электропередач;
- *Подсистема логики действий* – осуществляет на основе заложенных в нее алгоритмов логико-математическую обработку полученных данных от подсистем сбора технологической информации и накопления и анализа данных. Подсистема реализована в виде программных модулей, обеспечивающих обработку получаемой информации, а также модулей, осуществляющих принятие решений о переключении режима работы узла;

- Подсистема накопления и анализа данных – включает в себя набор модулей, обеспечивающих выполнение функций долговременного хранения получаемых данных, мониторинга технологической информации и формирования отчётности. В состав подсистемы входят следующие компоненты:
  - хранилище данных;
  - модуль мониторинга и анализа, обеспечивающий возможности мониторинга и анализа оперативной технологической информации;
  - модуль отчётов, обеспечивающий анализ и формирование отчетности по работе узла за необходимый период.
- Подсистема взаимодействия с внешней системой мониторинга и управления обеспечивает оперативный гарантированный обмен данными между компонентами сети и решает следующие задачи:
  - передача технологической информации в центры управления;
  - передача сообщений об аварийных и предаварийных ситуациях на узле;
  - получение управляющих команд и запросов от системы РСМУ;
  - передача отчетов за определенный период по запросу РСМУ.
- Подсистема активно-адаптивного управления предназначена для осуществления управления ТТНМ ОТ в соответствии с логикой и алгоритмами активно - адаптивного управления.

Взаимодействие между устройствами ААСУ различных узлов, а также с системой РСМУ для обмена необходимой информацией осуществляется через интерфейс Ethernet. Организация данных реализуется в соответствии с требованиями протоколов TCP/IP и SNMP.

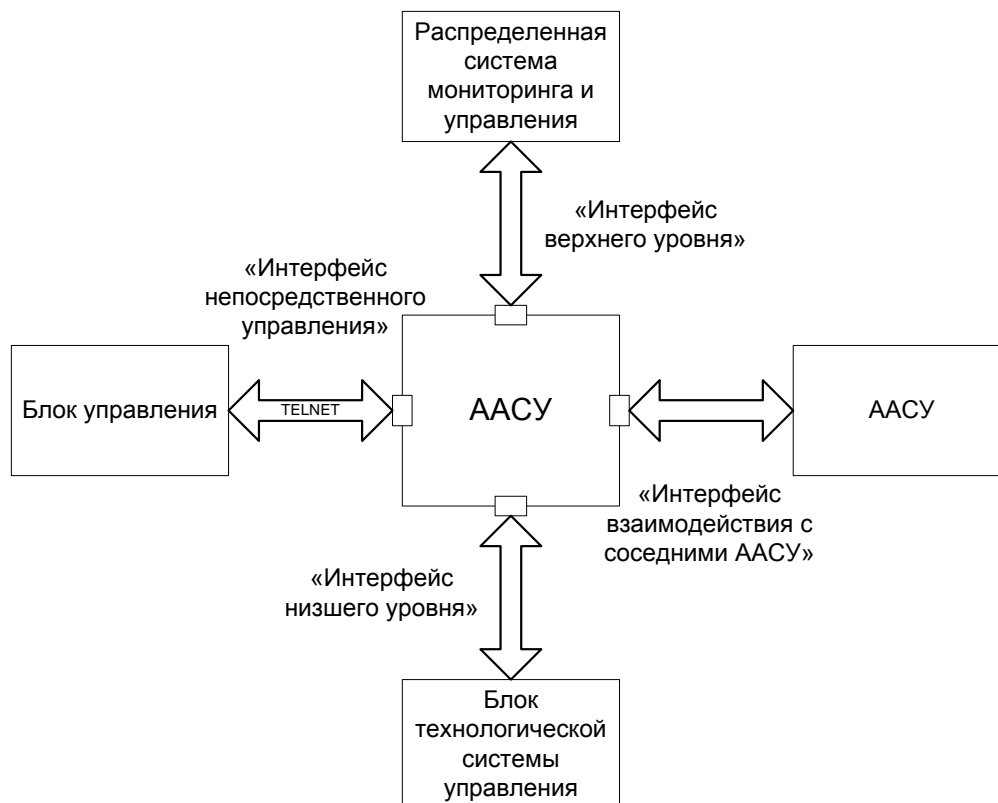


Рис. 1. Блок-схема интерфейсов ААСУ

ААСУ реализует следующие интерфейсы:

Южный интерфейс – протокол взаимодействия с системой управления низшего уровня (ТСУ). Взаимодействие компонент внутри узла нагрузки осуществляется через последо-

вательный интерфейс. Организация входных и выходных данных реализуется в соответствии со стандартами интерфейса RS-485 и протокола MODBUS RTU.

- Западный интерфейс - протокол подключения управляющего терминала (TELNET) с реализацией командного протокола управления и запросов данных. Реализуется через последовательный порт RS-232.
- Восточный интерфейс - протокол взаимодействия с соседними ААСУ для осуществления механизма активно-адаптивного управления ААСУ посредством хмлгрс вызовов. На протокольном уровне идентичен интерфейсу связи с РСМУ.
- Северный интерфейс – протокол взаимодействия с распределенной системой мониторинга и управления (РСМУ) для обеспечения верхнего уровня управления необходимой информацией и получения команд управления. Реализуется через закрытую сеть (по защищенным каналам) и/или через открытую сеть (с наличием систем безопасности).

Блок-схема интерфейсов ААСУ представлена на рис. 1.

В состав РСМУ входят следующие подсистемы и компоненты:

- Подсистема сопряжения с сетевыми элементами предназначена для реализации протоколов взаимодействия с ААСУ и РСМУ, а также для сопряжения РСМУ с внешними системами управления и обеспечивает:
  - двустороннее сопряжение РСМУ и ААСУ;
  - возможность сопряжения по основным протоколам взаимодействия вычислительных систем (Q3/CMIP, SNMP, CORBA, ASCII) и частным протоколам;
  - возможность сопряжения с другими системами на основе протоколов производителей.
- Подсистема централизованного мониторинга работы ААСУ и технологического оборудования обеспечивает выполнение следующих функций:
  - сбор и хранение в базе данных основных аварийных сообщений;
  - анализ взаимосвязанных событий, корреляции, фильтрации аварийных сообщений и формирования сообщения о первопричине неисправности;
  - архивирование аварийных сообщений (в том числе, в исходной форме), извлечение архивированных сообщений, удаление сообщений из архива, экспортирование списка аварийных сообщений;
  - квитирование получения сигнала оператором;
  - передача информации в систему формирования и обработки аварийных квитанций.
- Подсистема централизованного сбора, хранения и обработки данных предназначена для сбора и хранения данных о работе сети ТТРМ ОТ с целью анализа и последующего управления. Также подсистема осуществляет промежуточную обработку получаемых данных с целью предварительного агрегирования для повышения эффективности последующей обработки.
- Подсистема учета ресурсов и оборудования (инвентаризации) предназначена для учета физических и логических ресурсов сети, а также для формирования отчетности по располагаемым ресурсам. Данная подсистема позволяет осуществлять:
  - учет физических ресурсов (питающие линии, распределительная система, ТТРМ ОТ);
  - учет логических ресурсов: топологии сети и ее характеристик (наименование сетей, подсетей и виртуальных сетей, схема организации), а также логических соединений для передачи данных и их характеристик;
  - автоматическое или задаваемое пользователем обновление базы данных ресурсов сети в соответствии с реальным состоянием сети;
  - создание, сохранение и использование новых шаблонов управляемых и/или сетевых элементов;
  - деление сетевых элементов по уровням доступа в соответствии с физическими и логическими доменами сети;

- графическое отображение ресурсов сети с индикацией нагрузки и повреждения;
- иерархическое отображение сети с учетом прав доступа различных пользователей.
- Подсистема формирования и обработки аварийных квитанций осуществляет взаимодействие с подсистемами централизованного мониторинга и учета ресурсов и обеспечивает выполнение следующих функций:
  - формирование процедур обработки аварийных квитанций с указанием «маршрута движения» между подразделениями предприятия и ответственными лицами;
  - формирование аварийной квитанции при появлении аварийного сообщения на сети, возможность передачи квитанции соответствующим подразделениям, возможность эскалации ситуации;
  - ручное и автоматическое создание аварийной квитанции, механизмы отслеживания;
  - ведение базы данных аварийных квитанций;
  - создание форм аварийных квитанций пользователем.
- Подсистема оповещения реализует альтернативные способы оповещения об изменении состояния контролируемых объектов (SMS, электронная почта, передача сообщения на пейджер).
- Подсистема статистики и аналитики предназначена для анализа технических показателей и формирования итоговой статистической и аналитической отчетности. Работа подсистемы статистики и аналитики тесно взаимосвязана с подсистемами учета ресурсов сети, подсистемой централизованного мониторинга и подсистемой анализа качества функционирования. Подсистема обеспечивает работу следующих функций:
  - мониторинг качества в режиме реального времени с возможностью контроля KQIs (Key Quality Indicator) SLA и оповещения в случае нарушения соглашений об уровне обслуживания (SLA);
  - генерация автоматических отчетов о качестве предоставляемых услуг;
  - создание собственных отчетов в различных форматах;
  - сбор данных, хранение и формирование итоговых параметров сети с разбивкой по часам, дням, месяцам и т.п.;
  - дополнительный анализ данных для формирования трендов нагрузок;
  - долгосрочный анализ функционирования системы;
  - графическое представление данных по качеству функционирования с возможностью построения графиков, диаграмм, отображения параметров качества на графическом представлении сети
- Подсистема защиты и аутентификации выполняет следующие функции:
  - разделение пользователей на группы в соответствии с правами доступа и управления;
  - аутентификация пользователей при помощи системы паролей;
  - аппаратная аутентификация вычислительных систем, подключаемых к ААСУ по протоколу TELNET;
  - аппаратная аутентификация вычислительных систем, входящих в иерархию управления на всех уровнях распределенной системы.
- Подсистема отображения информации реализует следующие функции:
  - возможность заполнения дополнительных полей в базе данных аварийных сообщений для указания предпринимаемых действий по устранению аварии;
  - навигация от списка аварийных сообщений к графическому представлению;
  - присвоение аварийным сигналам приоритетов в соответствии со степенью важности и возможность фильтрации информации по признакам приоритетности;
  - возможность выбора цветовой и звуковой индикации сигналов для различных приоритетов.

Система РСМУ предусматривает наличие следующих интерфейсов, показанных на рис. 2:



- Интерфейс взаимодействия с ААСУ ТТНМОТ - интерфейс низшего уровня («южный интерфейс») – интерфейс взаимодействия с ААСУ ТТНМОТ, необходимый для обеспечения получения данных и управления;
- Интерфейс взаимодействия с соседними РСМУ - интерфейс передачи данных в другую РСМУ («восточный интерфейс») для возможности объединения с другими РСМУ при формировании сети управления. Предназначен для обеспечения более высоких уровней управления данными и получения внешних команд управления;
- Интерфейс взаимодействия с пользователями – представляет собой интерфейс автоматизированных рабочих мест (АРМ) операторов. Реализуется через веб-интерфейсы (технология «тонкого клиента»).

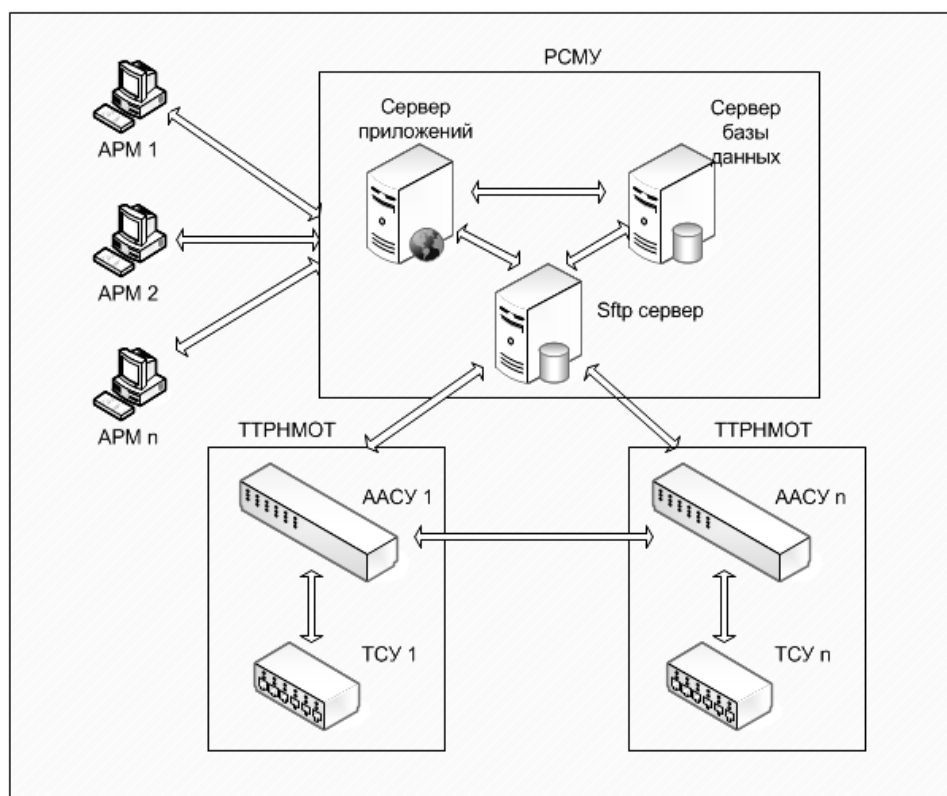


Рис. 2. Взаимодействие компонентов сети РСМУ

### Топология сети

Общая концепция сети РСМУ представлена на рис. 3:

- сеть состоит из узлов ААСУ, связанных между собой;
- к сети также подключены узлы РСМУ;
- каждый узел РСМУ отвечает за свою часть общей сети.

Система РСМУ должна быть способной обслуживать сеть, включающую в себя до 4000 связанных друг с другом устройств. Устройства, с одной стороны, входят в единый граф топологии сети, а, с другой – могут и должны быть разделены на разные логические группы. Анализ топологий графов в [3-5] показал, что работа с общей топологией устройств будет сложна и неудобна из-за ее большого размера, тогда как работа с подгруппами элементов представляется оптимальной с точки зрения удобства, и с точки зрения разграничения сфер ответственности операторов. Общая схема построения топологии сети РСМУ представлена на рис. 4.

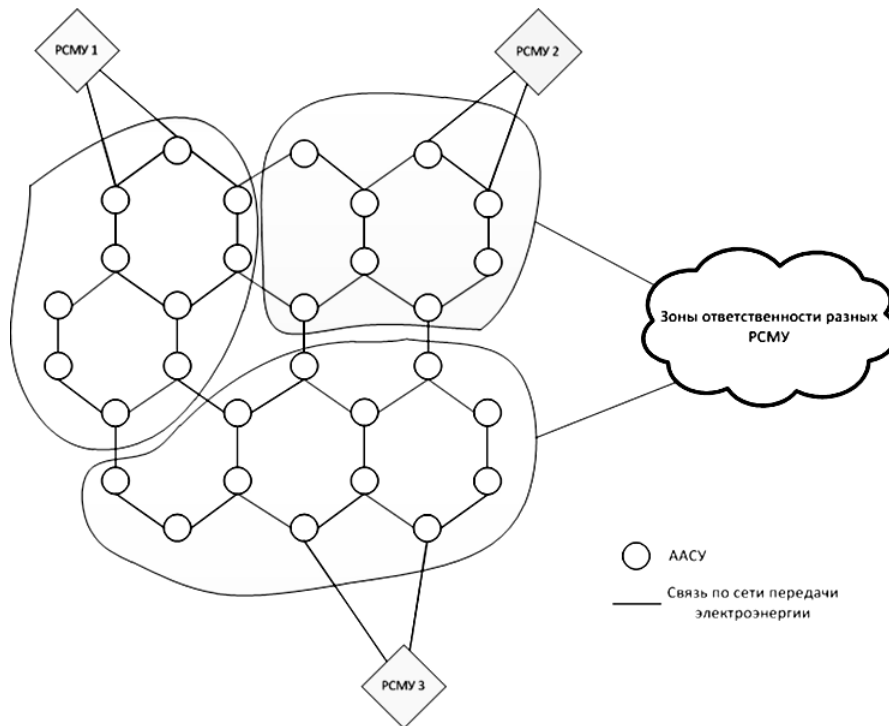


Рис. 3. Общая схема сети РСМУ

## Принцип отображения топологии сети РСМУ

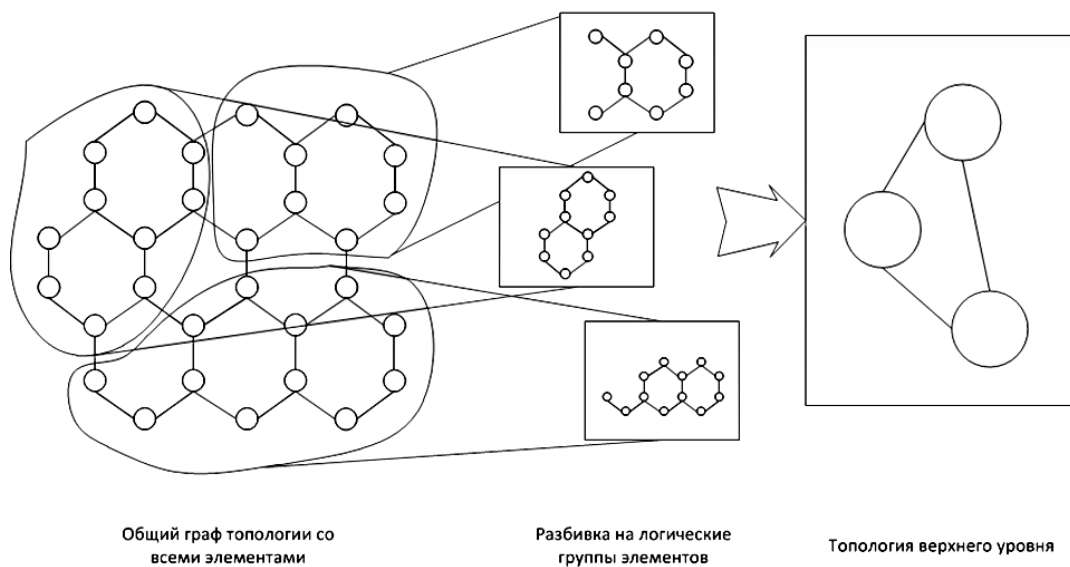


Рис. 4. Схема построения топологии сети РСМУ

Принципы построения топологии:

- Основная топология строится в виде единого связного графа;
- Существует возможность разбивки общей топологии на логические группы по принципам, определяемым пользователем:
  - географическое разделение;
  - административное разделение;
  - логическое разделение, с точки зрения построения сети.

- Возможность дальнейшего объединения групп элементов в диаграммы верхнего (третьего) уровня.  
Связи между элементами:
  - Первоначальный общий граф топологии считается основополагающим.
  - Связи элементов на диаграммах второго и третьего уровней отрисовываются автоматически в соответствии с общим графом топологии.
- Отображение аварийных ситуаций основано на следующих принципах:
- Аварийные ситуации на элементах сети, входящих в элемент топологии третьего уровня, агрегируются для отображения на элементах топологии третьего уровня.
  - Имеется возможность отображения как общего графа топологии, так и каждой логической группы элементов по отдельности, а также топологий третьего уровня в виде диаграмм.
  - Имеется возможность отображения отдельных ветвей в дереве элементов для топологий второго и третьего уровня и входящих в них элементов.

### Дизайн программного обеспечения ААСУ и РСМУ

Архитектура программного обеспечения ААСУ представлена на рис. 5.

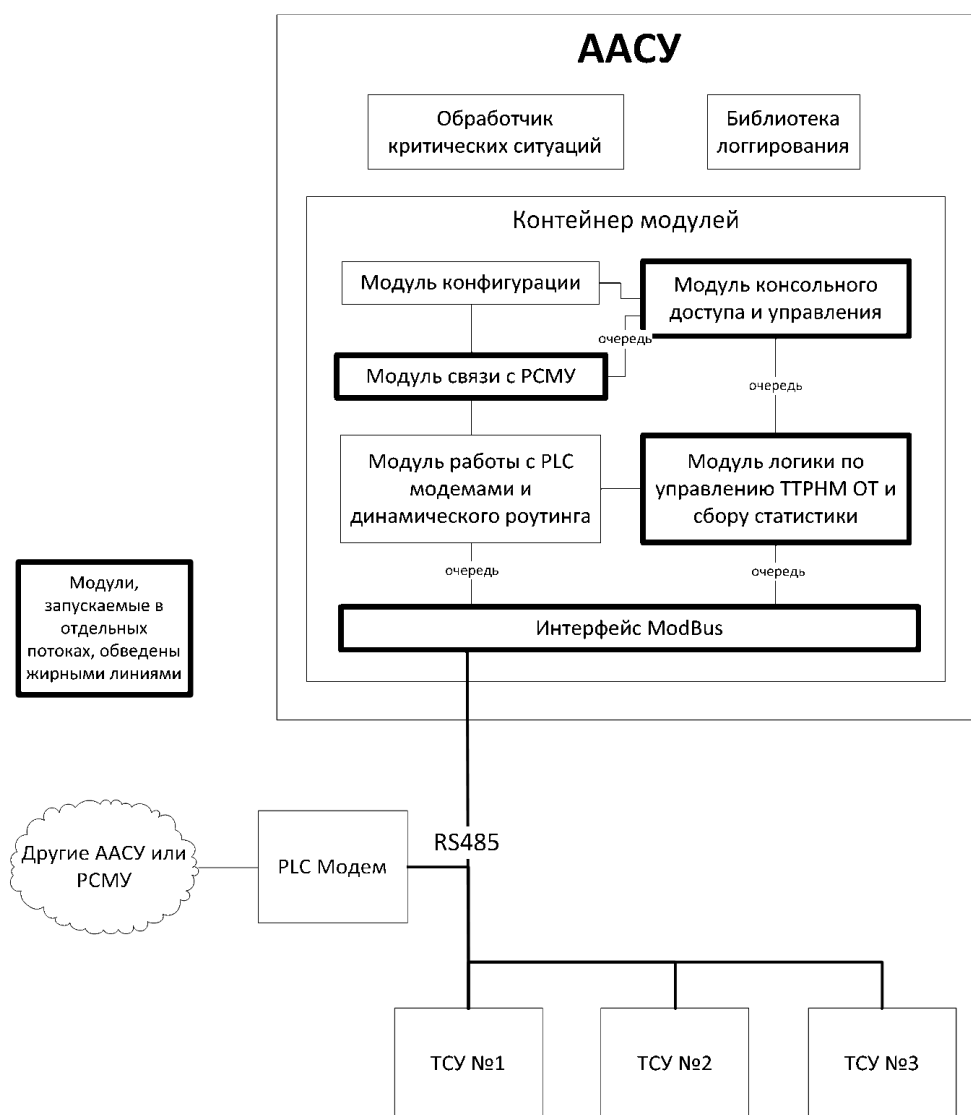


Рис. 5. Архитектура программного обеспечения ААСУ

При старте приложения происходит инициализация основных компонентов. Все логические модули приложения инициализируются внутри контейнера модулей после старта и инициализации. Модули инициализируются в соответствии с фиксированным списком, хранящимся в контейнере модулей. Работа приложения завершается только в случае перезапуска при изменении конфигурации. Также завершение работы может наступить при наступлении аварийной ситуации. Модули связываются между собой через контейнер модулей по шаблону проектирования. Задача обработчика критических ситуаций - отловить момент наступления критической ситуации и обеспечить корректное завершение работы приложения.

Архитектура программного обеспечения РСМУ представлена на рис. 6.

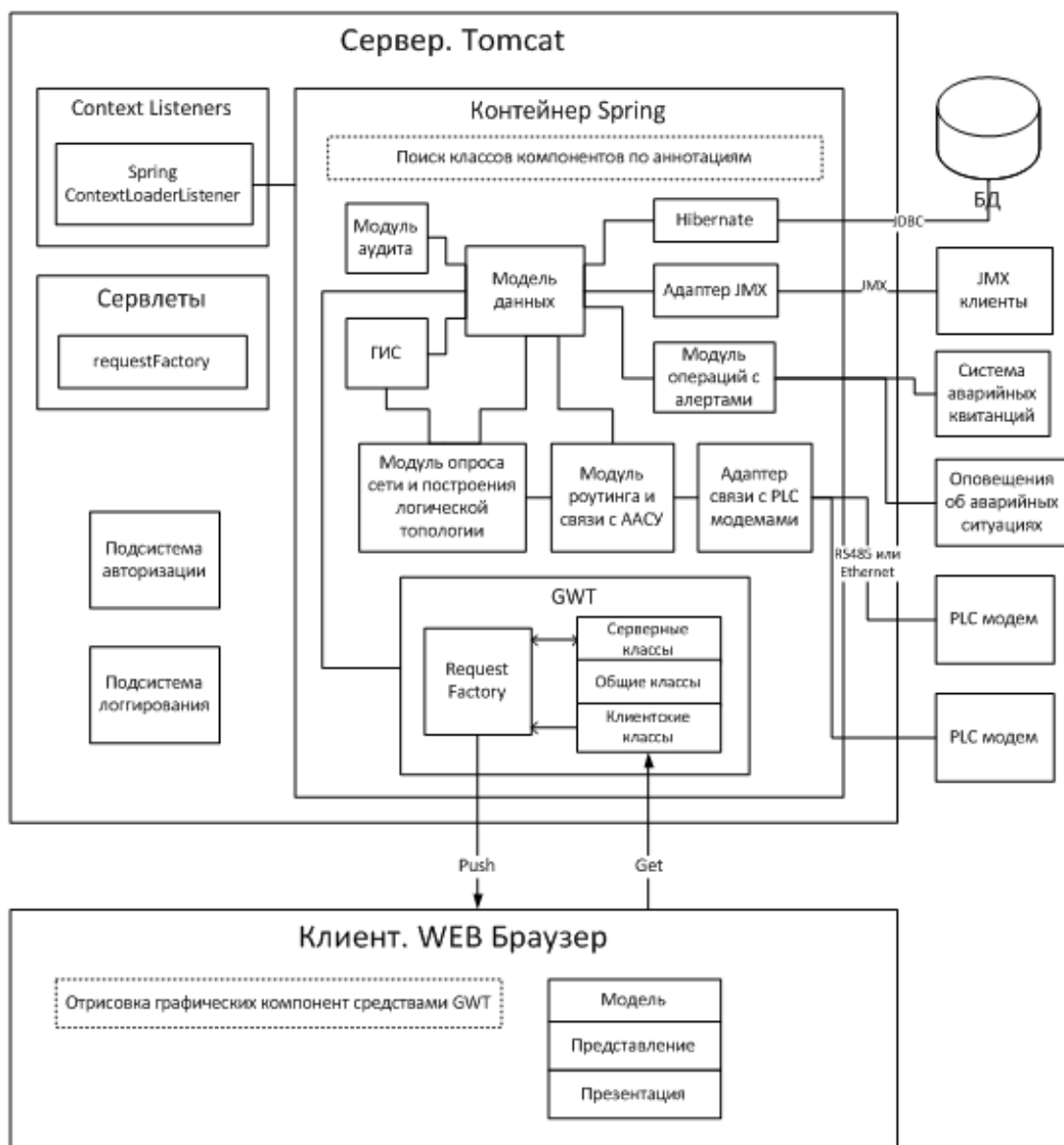


Рис. 6. Архитектура программного обеспечения РСМУ

Физически весь код запускается и работает внутри сервера приложений Tomcat. Библиотека Spring Framework выступает в роли контейнера для классов бизнес-логики приложения. Библиотека Spring Framework инициализируется посредством Context Listener в Tomcat.

Для описания модели классов и зависимостей между ними используются аннотации. Для работы с базой данных используется библиотека Hibernate. Подсистема логгирования инициализуется и существует внутри сервера приложений Tomcat независимо от контейнера Spring. Клиент разрабатывается по модели MVP и основан на центральной шине событий и уведомлений.

### Заключение

Разработана архитектура программного обеспечения для системы управления трансформаторно-тиристорным регулятором нового типа. Предложена топология сети с возможной поддержкой энергетических гридов нового поколения. Разработан дизайн систем ААСУ и РСМУ.

### Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №3. С. 147-151.
2. **Анисимов, С.А.** Алгоритмы управления отказами в энергетических гридах следующего поколения / С.А. Анисимов, М.Н. Ушакова // Технические науки XVII Нижегородская сессия молодых ученых: материалы научно-технической конференции / НИУ РАНХиГС. – Нижний Новгород. 2012. С. 112-114.
3. **Анисимов, С.А.** Протокол поиска ресурсов в децентрализованных гридах, обладающих свойствами тесного мира / С.А. Анисимов, В.А. Зыбин, В.В. Крылов // Труды НГТУ, 2009. Т. 80. №1. С. 13-19.
4. **Анисимов, С.А.** Распределение нагрузки в децентрализованных гридах, обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ. 2011. №3. С. 173-179.
5. **Анисимов, С.А.** Управление отказами в децентрализованных гридах обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ. 2011. №6. С. 214-218.

*Дата поступления  
в редакцию 09.10.2012*

**S.A. Anisimov<sup>1</sup>, A.B. Loskutov<sup>1</sup>, I.V. Polozov<sup>1</sup>, A.I. Smirnov<sup>2</sup>, E.N. Sosnina<sup>1</sup>**

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM ARCHITECTURE FOR THE THYRISTOR-CONTROLLED VOLTAGE AND POWER TRANSFORMER WITH UNIDIRECTIONAL CURRENT SWITCHES (TVPT UCW)**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev<sup>1</sup>,  
LLC Tecom<sup>2</sup>

**Purpose:** Design and development of software control and monitoring system for the electrical power grid consisting of TVPT UCW and providing ability for each grid node to work independently as well as for the entire grid to be centrally controlled.

**Design/methodology/approach:** Research is conducted using graph model of the electrical power grid and circuit diagram for the electrical circuit model. Software control system is designed based on the OOP principles.

**Findings:** The main concept has been developed for building strategy and architecture of the electrical grid consisting of nodes represented as Active and Adaptive Control Systems (AACS), and centrally controlled by the Distributed Control and Monitoring System (DCMS).

**Originality/value:** Findings of this work can be used in the area of commercial electrical power distribution, generation and metering, as well as power distribution equipment inventory. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as part of government contract from October 11 2011, № 16.526.12.6016.

*Key words:* Distributed Control and Monitoring System, Active and Adaptive Control System, architecture, topology.

УДК 621.316.925

А.Л. Куликов<sup>1</sup>, Б.В. Папков<sup>2</sup>, М.В. Шарыгин<sup>2</sup>

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6–10 кВ

Нижегородское предприятие магистральных электрических сетей<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой технико-экономической эффективности замены и модернизации устройств релейной защиты в сетях напряжением 6–10 кВ. Конечной целью разработки, создания и эксплуатации устройств релейной защиты является повышение надёжности и эффективности функционирования электрической сети и электроснабжения потребителей, что приводит к снижению ущерба. На основании результатов обследования предприятий разных отраслей промышленности с различной структурой технологических схем проанализированы возможные последствия внезапных нарушений электроснабжения потребителей, связанные с отказами релейной защиты. Приведён пример количественной оценки ущерба, показывающий эффективность предлагаемого метода.

*Ключевые слова:* электрические сети, релейная защита, надёжность электроснабжения, эффективность, ущерб.

### Введение

В настоящее время выбор объема релейной защиты и автоматики (РЗА) и расчета уставок релейной защиты (РЗ) производится, как правило, без какого-либо экономического обоснования, в соответствии с усредненными типовыми решениями, а также личным опытом и предпочтениями проектировщика и заказчика. Такой подход значительно упрощает проектирование и эксплуатацию устройств РЗ, но имеет и ряд отрицательных моментов:

- невозможно создать быстродействующую селективную чувствительную РЗ с зоной резерва;
- предъявляемые требования к РЗ противоречат друг другу и необходимо определять их приоритетность;
- разнообразие нагрузок может требовать разных решений по РЗ;
- часто остаётся открытым вопрос о количестве и качестве резервных защит;
- развитие микропроцессорных защит дало возможность применения практически любого типа РЗ с примерно одинаковой стоимостью;
- трудности при технико-экономическом обосновании модернизации и реконструкции РЗ.

В результате экономическая оценка эффективности той или иной защиты сводится к простейшему случаю, когда считается, что стоимость подсистемы РЗА должна составлять 5 – 20% от стоимости сети.

Однако конечной целью разработки, создания и эксплуатации РЗ является повышение надёжности и эффективности функционирования как самой электрической сети, так и электроснабжения потребителей, что приводит к снижению ущерба как при разного рода отказах элементов электрической сети, так и при отказах и ложных срабатываниях устройств РЗ. Поскольку абсолютной надежности любой технической системы добиться невозможно, необходимо минимизировать возможный ущерб, совершенствуя устройства, принцип действия и алгоритмы работы РЗ.

Степень остроты проблемы обеспечения требуемой эффективности средств РЗ определяется, прежде всего, их назначением и сложностью. При этом наиболее рекомендуемыми методами повышения эффективности РЗ являются:

- применение высоконадёжных комплектующих изделий;
- применение схем, выходные параметры которых мало чувствительны к изменениям характеристик их элементов;
- применение специальной защиты систем РЗ и её элементов от воздействия дестабилизирующих внешних факторов;
- резервирование элементов и блоков систем РЗ;
- проведение профилактических проверок технического состояния РЗ;
- анализ возникших неисправностей для выявления и доработки недостаточно надёжных комплектующих изделий, схем, узлов;
- прогнозирование отказов систем, блоков и отдельных элементов РЗ;
- поддержание необходимой квалификации обслуживающего персонала;
- разработка и применение новых алгоритмов работы и методик расчета уставок РЗ.

### Принципы оценки экономической эффективности РЗ

К эффективности функционирования РЗ (как совокупности надёжности и технического совершенства РЗ) предъявляются вполне определённые требования [1], обеспечиваемые мероприятиями, реализация которых вносит соответствующий вклад в обеспечение эффективности. Анализ содержания задач по обеспечению эффективности РЗ показывает, что многие из них решаются на основе оценки предлагаемых мероприятий. Это задачи, в которых определяются:

- степень удовлетворения требований к уровню надёжности РЗ;
- целесообразность реализации тех или иных конкретных мероприятий по повышению надёжности;
- наиболее эффективные мероприятия для реализации в конкретном случае применения РЗ.

При выборе критерия оценки мероприятий по обеспечению эффективности систем РЗ необходимо учитывать следующие положения:

- к показателям большинства видов РЗ предъявляются количественные требования;
- повышение надёжности и технического совершенства приводит к увеличению эффективности функционирования РЗ;
- реализация любого мероприятия требует определённых материальных затрат.

Известно, что существуют достаточно много критериев оценки экономической эффективности. Например, целесообразность реализации того или иного мероприятия в конкретной системе РЗ можно оценивать, сравнивая показатели стоимостного значения выигрыша в полезном эффекте использования РЗ от повышения её надёжности  $\Delta C$  и затраты на реализацию мероприятия по повышению надёжности  $C_3$  (при условии, что затраты в «базовом» варианте равны нулю). Тогда критерий целесообразности реализации мер по повышению надёжности РЗ определится как

$$E_3 = \frac{\Delta C}{C_3}. \quad (1)$$

Критерий (1) представляет собой выигрыш в полезном эффекте использования РЗ при реализации рассматриваемого мероприятия, приходящийся на единицу затрат при его реализации. Мероприятие по повышению надёжности можно считать целесообразным, если стоимостное значение выигрыша превышает затраты на его реализацию, то есть  $E_3 > 1$ .

Для оценки целесообразности мер по повышению надёжности РЗ можно использовать и другой критерий, представляющий собой разность  $\Delta C$  и  $C_3$ . При этом значение  $\Delta C$  может быть определено из соотношения

$$\Delta C = C - C_0, \quad (2)$$

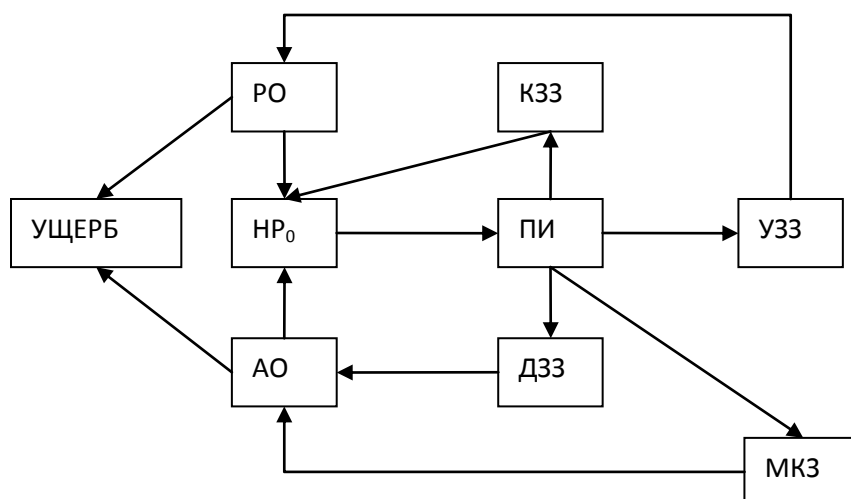
где  $C$  и  $C_0$  – стоимостные значения полезного эффекта использования РЗ при условии, что рассматриваемое мероприятие соответственно реализовано ( $C$ ) или не реализовано ( $C_0$ ).

В [3–5] предлагаются методы обоснования решений по РЗ, основанные на минимизации народнохозяйственных затрат, включающих ущерб, оценку которого предлагается производить по обобщенным удельным показателям, полученным до 1990 г. Однако в современных экономических условиях такой подход вызывает ряд возражений.

Во-первых, понятие народнохозяйственного ущерба устарело, так как затраты сетевой компании не должны сравниваться с эффектом, возникающим у потребителя. Во-вторых, численные значения удельных ущербов давно не актуализировались, что вынуждает обращаться к зарубежным источникам, которые далеко не всегда соответствуют отечественным условиям в силу принципиальных различий производственных систем. В-третьих, удельные ущербы изначально предназначались для оценки проектов электроснабжения в масштабе района электрической сети и крупнее. Поэтому при оценке надёжности устройств РЗ на одном присоединении или в рамках одного предприятия эти ущербы не отражают истинной величины технико-экономических потерь.

С точки зрения надёжности основной функцией РЗ является снижение ущерба  $U$  при аварийных ситуациях в электроэнергетической системе (ЭЭС). Защита, обладающая высоким техническим совершенством, может существенно повысить надёжность функционирования как самой ЭЭС, так и электроснабжения потребителей. Так как любая электрическая сеть не может быть абсолютно надёжной, есть вероятность возникновения ущерба от ненадёжности у потребителей  $U_{\Pi}$  и ущерба сетевой организации  $U_{CO}$ . Эти вероятности определяются ложными и излишними (при повреждениях вне зоны защиты) срабатываниями РЗ, отказами в срабатывании. Процент неправильных действий устройств РЗ, выполненных на электромеханических (электромагнитных) элементах по данным [1] составляет 0,1–0,6%; для реле на интегральных микросхемах – 0,3%; для защит на базе микропроцессоров – 5%. На этом основании становится очевидным необходимость разработки и использования автоматизированных поверочных комплексов.

Известно, что доля однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в современных электрических сетях достигает до 70%. Доля кратковременных ОЗЗ в их общем числе составляет 70–90%. Простейшая диаграмма состояний электрической сети при возникновении ОЗЗ [4] представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Диаграмма состояний электрической сети при возникновении ОЗЗ:**

$НР_0$  – нормальный режим сети; ПИ – пробой изоляции фазы сети на землю; КЗЗ – кратковременное, самоустранившееся ОЗЗ; УЗЗ – устойчивое ОЗЗ; ДЗЗ – двойное замыкание на землю; МКЗ – междофазное короткое замыкание в месте повреждения; АО – автоматическое отключение повреждённого элемента; РО – ручное отключение повреждённого элемента при устойчивом повреждении

Возможность получения положительного эффекта от фиксации кратковременных са-



моустраняющихся ОЗЗ определяется наличием информации о кратковременных пробоях изоляции. В кабельных сетях промышленных предприятий каждому устойчивому ОЗЗ предшествуют 2–3 кратковременных пробоя с интервалом времени 40–50 мин и более, а для электродвигателей 6 кВ – от нескольких часов до нескольких суток.

При выборе перспективного варианта РЗ уровень надежности сети по отношению к существующему должен измениться. Выбранному варианту РЗ будут соответствовать прогнозные ущербы потребителей  $U_{\Pi}$  и сетевой организации  $U_{CO}$ , а также затраты потребителей  $Z_{\Pi}$  и затраты сетевой организации  $Z_{CO}$ , связанные с монтажом и обслуживанием устройств РЗ (изменением уровня надежности сети).

Предлагается следующий алгоритм оценки экономической эффективности РЗ.

Шаг 1. Если при отказе элементов электрической сети нельзя пренебречь вероятностью катастрофических последствий ( $U \gg Z$ ), то любое повышение уровня её надежности можно считать оправданным.

Шаг 2. Если вероятностью катастрофических последствий можно пренебречь (ущерб соизмерим с затратами), то для оценки эффективности выбранного варианта РЗ необходимо сравнить  $\Delta Z$  с  $\Delta U$ , где  $\Delta U$  – разность величин ожидаемых ущербов до и после реализации выбранного варианта РЗ, а  $\Delta Z$  – разность величин ожидаемых затрат до и после реализации выбранного варианта РЗ.

Если

$$\Delta Z_{\Pi} < \Delta U_{\Pi}, \quad (3)$$

то выбор системы РЗ с точки зрения потребителей оправдан.

Если

$$\Delta Z_{CO} < \Delta U_{CO}, \quad (4)$$

то выбор оправдан с точки зрения сетевой организации.

Замечания:

- если реализация выбранного варианта РЗ производится силами потребителей или в сети потребителей (на промышленных предприятиях), то  $Z_{CO} = 0$  и обоснование модернизации можно проводить только по условию (1);
- если реализация выбранного варианта РЗ производится силами сетевой организации, то  $Z_{\Pi} = 0$  и обоснование модернизации можно проводить только по условию (2);
- условия (1-2) должны использоваться с учетом дисконтирования для приведения прогнозных величин  $Z$  и  $U$  в соизмеримый вид по фактору времени к текущему моменту. Дисконтирование выполняется путём умножения будущих денежных потоков (потоков платежей) на коэффициент дисконтирования  $K_d$ :

$$K_d = 1 / (1 + i)^n,$$

где  $i$  – процентная ставка, о.е.;  $n$  – номер периода (года).

Величина  $\Delta U$  может быть вычислена двумя способами: как разность абсолютных значений ущербов  $U$  при разных вариантах устройств РЗ (естественно, что при этом необходим независимый расчет  $U$  для каждого варианта); и исходя из относительного технического эффекта (например, РЗ1 лучше РЗ2 по параметру П1).

Как правило, расчет затрат  $Z$  производится довольно легко на основании информации о стоимостях устройств РЗ, их монтажа и обслуживания [3]. Основными проблемами обоснования будут являться:

- определение технического эффекта устройств РЗ, особенно новых разработок. Численные значения могут быть получены либо на основании экспертной информации от завод-изготовителей, либо из новых публикаций;
- определение величин ущербов  $U$ .

### Оценка экономического ущерба

В самом общем виде ущерб представляет стоимостное выражение реакции сетевой организации, потребителей электроэнергии и смежных систем на нарушения функциональных режимов связей, объединяющих эти системы. Как правило, ущерб представляется в виде

количественной оценки ликвидации последствий, нанесённых имуществу физического или юридического лица (производителю, поставщику, потребителю) вследствие причинения ему вреда, неисполнения условий заключённого с ним договора или экологических нарушений в связи с ненадёжностью работы объекта энергетики.

В соответствии с рекомендациями [8], ущерб от ненадёжности – убытки производителя, поставщика и потребителя, вызванные ненадёжностью объекта энергетики, а также связанными с ней экологическими нарушениями. Средний ущерб определяется его математическим ожиданием, приходящегося на один отказ объекта энергетики или его математическим ожиданием за расчётный период. Удельный ущерб определяется отношением его абсолютной величины либо к единице недоотпущенной продукции, либо к единице ограничиваемой мощности (производительности), либо к единице времени.

На стадии эксплуатации различают следующие основные виды ущерба от отказов элементов электрической сети [1, 7, 8]: ущерб отключенных (или ограничиваемых) потребителей электроэнергии; ущерб сетевой организации; ущерб окружающей природной среде; ущерб социальный; ущерб моральный.

Основные сложности возникают при определении ущерба первого вида. Это связано с особенностями различных технологических процессов и многообразием схем электроснабжения производственных систем потребителей; режимов работы их элементов; связанностью подсистем по технологическим, энергетическим, транспортным и другим связям.

В настоящее время сформировались два основных принципа оценки ущерба от нарушений электроснабжения потребителей. Первый основан на детальном подсчете всех потерь и затрат, являющихся следствием отказа. Второй – на использовании удельных показателей ущерба, определяемых с той или иной степенью приближения, агрегированных в пределах типа технологического производства, отрасли или промышленности в целом.

Первый принцип используется в задачах, где возможно получение достоверной информации о технологическом процессе производства и схеме его электроснабжения, изменения нормальной работы которого будут анализироваться при возможных нарушениях электроснабжения. Второй – обеспечивает информацию о возможном ущербе для решения крупномасштабных задач пространственной и временной иерархии, когда экономические последствия отключений потребителей оцениваются ориентировочно, а технические решения, в которых используются сведения об ущербе, затрагивают надежность крупных узлов нагрузки системы.

Естественно, что первый принцип позволяет получить более объективную и точную оценку ущерба, но требует обширной первичной информации. Для задач, где есть либо существенный недостаток и (или) неопределённость исходной информации, либо наоборот, ее чрезмерно большой объём не позволяет выделить наиболее существенные, влияющие на ущерб факторы, единственно возможным методом остаётся второй метод с применением укрупнённых удельных показателей ущерба.

Определение ущерба сетевой организации производится подобно расчету первой составляющей ущерба. Он состоит из двух составляющих: первая определяется затратами сетевой организации на аварийно-восстановительные (внеплановые) ремонты отказавшего оборудования; вторая – суммой расходов на покрытие ущербов потребителей, предъявленных в судебном порядке.

Ущербы прочих видов (природной среде, социальный, моральный) либо не определяются вовсе, либо оцениваются приближенно, когда их вкладом в величину суммарного ущерба нельзя пренебречь. В этом случае составляющие ущерба могут оцениваться как в денежном измерении, так и в иных (единицах недовыпущенной продукции, длительности простоя, разного рода качественных оценках). Отметим, что общепринятых правил определения этих составляющих ущерба в настоящее время не существует.

При помощи удельных показателей ущерба оценивается интегральный ущерб потребителей, без разбиения его на множество структурных слагаемых. Его представляют одной

или двумя обобщенными составляющими: первая – из-за простоя производственного объекта, его оборудования, рабочей силы и соответствующей недовыработки продукции; вторая – потери, связанные с неуправляемым останом объектов производства вследствие нарушения электроснабжения и потерями от вынужденного изменения режима работы производства. Сюда входят затраты от возможных повреждений оборудования, порчи сырья, материалов, затраты на повторный пуск производства, возрастание расходов материальных, энергетических и трудовых ресурсов при неоптимальном режиме работы производства, потери от нарушения нормального хода технологического процесса и т.д.). Эта составляющая зависит от технологических особенностей каждого производства, ее оценка даже в общем виде с использованием удельных ущербов практически невозможна. Поэтому на практике обычно ограничиваются рассмотрением только первой составляющей.

Ущерб  $U$  единичного случая отключения состоит из двух составляющих:  $U_{пр}$  – ущерба от простоя и  $U_{откл}$  – от факта отключения:

$$U = U_{пр} + U_{откл}, \text{ руб.откл.}$$

Ущерб от простоя рассчитывается по выражению

$$U_{пр} = y_0 \cdot P_{ср} \cdot t_э = y_0 \cdot W_{откл},$$

где  $y_0$  – удельный ущерб от простоя потребителя, руб./кВт·ч;  $P_{ср}$  – средняя отключенная мощность, кВт;  $t_э$  – длительность отключения, ч/откл.;  $W_{откл}$  – недоотпущенная (недополученная) электроэнергия, кВт·ч/откл.

Ущерб от факта отключения  $U_{откл}$  определяется как

$$U_{откл} = y_{0,откл} \cdot P_{ср,фид},$$

где  $y_{0,откл}$  – удельный ущерб от факта отключения, руб./откл.

Среднегодовое значение ущерба оценивается с учётом средней частоты отключений  $\omega_{ср}$ , откл./г. и средней продолжительности  $t_{э,ср}$  одного отключения, ч/откл.:

$$U_{пр} = y_0 \cdot P_{ср} \cdot t_{э,ср} \cdot \omega_{ср}; \quad U_{откл} = y_{0,откл} \cdot P_{ср} \cdot \omega_{ср},$$

Величины удельных ущербов могут зависеть от времени и длительности отключения, отрасли отключаемого предприятия, типа отключаемого электроприемника и т.д. Длительности  $\square_э$  и частоты отключений  $\omega_{ср}$ , величины удельных ущербов  $y_0$  определяются по справочным данным или аппроксимацией, исходя из ретроспективы внезапных отключений.

Другой, более точный метод расчёта ущерба потребителей основан на имитационном моделировании последствий срыва технологического процесса производства. В основе его лежит универсальная модель оценки длительности простоя отключенного участка производства – «агрегата» (рис. 2) [7].

По характеру последствий все отказы участков производственной системы подразделяются на три группы:

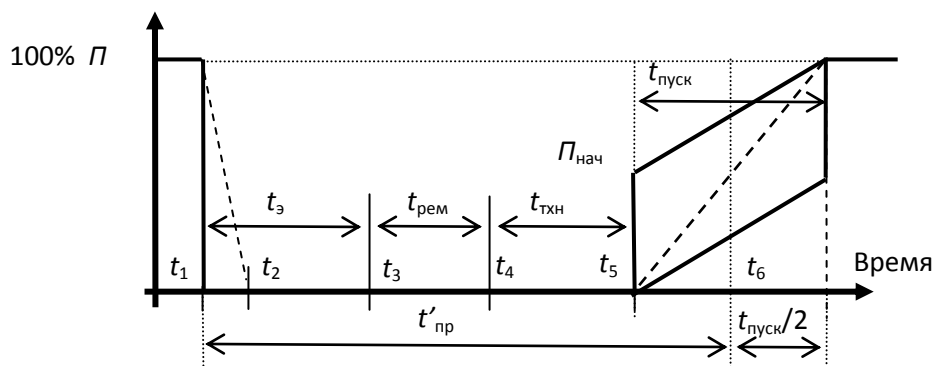
- 1) необесценивающие производственную продукцию;
- 2) частично обесценивающие;
- 3) полностью обесценивающие.

В системе с необесценивающими отказами отсутствует необходимость в повторении технологического процесса. Вся наработка между системными отказами является полезной, а длительность простоя производственного участка  $t_{пр}$  соответствует длительности нарушения электроснабжения  $t_э$ . Иначе,  $t_{пр} = t_э$ .

В системе с полностью обесценивающими отказами последствия настолько тяжелые, что приходится всю работу, проделанную к моменту отказа, выполнять заново. Нарработка до отказа является бесполезной, если она меньше заданной величины, и должна быть включена в потери рабочего времени. Полезной признается только та часть наработки, которая не прерывалась отказом.

Большинство нарушений электроснабжения относятся к категории частично обесценивающей выпускаемую продукцию. После восстановления электроснабжения требуется некоторое время  $t_{тхн}$  на восстановление нормального хода производственного процесса  $t_{пр} = t_{тхн} + t_э$ .

Отключение разных участков с примерно одинаковой потребляемой мощностью на одном предприятии может вызвать принципиально разные последствия. Для подавляющего большинства производств (рис. 2) длительность между временами  $t_1$  и  $t_2$  настолько мала, что ею в большинстве случаев пренебрегают.



**Рис. 2. Срыв и восстановление производственного процесса при внезапном нарушении электроснабжения:**

$\Pi$  – производительность объекта производства;  $t_1$  – момент внезапного нарушения электроснабжения;  $t_2$  – спад производительности до нуля;  $t_3$  – длительность нарушения электроснабжения;  $t_{рем}$  – длительность возможных ремонтных работ;  $t_{тхн} = f(t_3)$  – длительность восстановления технологического процесса;  $t_{пуск} = f(t_3)$  – длительность выхода объекта производства на 100%-ную производительность после  $t_{тхн}$

Если повреждений технологического оборудования нет, то ремонтная составляющая  $t_{рем}$  отсутствует. Зависимость длительности наладки технологического процесса  $t_{тхн} = f(t_3)$ , как правило, нелинейна, но для анализа реальных ситуаций может быть представлена в виде линейной или кусочно-линейной аппроксимации.

Практически для любого производственного процесса существует максимально возможная длительность нарушения электроснабжения  $t_3 = t_0$ , которая не приводит к срыву технологического процесса производства. С увеличением  $t_3$  до значения  $T_{кр}$  наблюдается рост  $t_{тхн}$ , который стабилизируется при  $t_3 \geq T_{кр}$  ( $t_{тхн} = \text{const}$ ). Это связано с тем, что при длительных нарушениях электроснабжения длительность  $t_{тхн}$  определяется стандартным перечнем проведения работ и фиксирована технологическим регламентом производственных операций. Отдельные производства (химия, нефтепереработка) могут иметь несколько значений  $T_{кри}$ , ( $i = \overline{1, n}$ ). Если принять линейную зависимость  $\Pi = f(t_{пуск})$ , то, вводя при-

веденное время пуска  $t'_{пуск}$ , имеем  $t'_{пуск} = \frac{t_{пуск}}{2}$ , а в общем случае:  $t'_{пуск} = kt_{пуск}$ .

В зависимости от вида производства и особенностей технологического процесса ремонт может начинаться как одновременно с моментом нарушения электроснабжения, так и после того, как произойдет восстановление нормального режима питания. Таким образом, в моделях оценки последствий нарушений электроснабжения вводится понятие приведенного времени простоя.

Если ремонт начинается после восстановления электроснабжения,

$$t'_{пр} = t_3 + t_{рем} + t_{тхн} + kt_{пуск}$$

При возможности начать ремонт сразу после обнаружения поврежденного при нарушении электроснабжения технологического оборудования приведенное время простоя определяется как

$$t'_{\text{пр}} = t_{\text{рем}} + t_{\text{ТХН}} + kt_{\text{пуск}}, \text{ если } t_{\text{рем}} > t_{\text{э}};$$

и

$$t'_{\text{пр}} = t_{\text{э}} + t_{\text{ТХН}} + kt_{\text{пуск}}, \text{ если } t_{\text{рем}} \leq t_{\text{э}}.$$

Каждый параметр, представленный на рис. 2, вносит свою долю в суммарный ущерб, в виде оплачиваемого простоя, затрат на ремонт, непроизводительного расхода сырья во время останова и пуска и т.д.

При агрегативном преобразовании производственной системы всё разнообразие технологического оборудования потребителя отражается тремя абстрактными элементами – «агрегат» (участки производства), «накопитель» (склады, емкости хранения полуфабрикатов). Взаимовлияние этих элементов учитывается элементом «связь» (электрические, технологические и пр.) [8].

Опыт обследования большого числа предприятий различных отраслей промышленности с разной структурой технологических схем показал, что поведение производства в условиях кратковременного отключения питания (в том числе при неправильных действиях РЗ) хорошо передается именно агрегативной. При этом возможен выбор такого присоединения, в котором модернизация устройств РЗ необходима в первую очередь [10] и эффект от неё будет максимальным.

### Пример оценки эффективности модернизации устройств РЗ от ОЗЗ

Определим эффективность внедрения устройств РЗ от неустойчивых ОЗЗ в сети предприятия химической промышленности с договорной мощностью потребления  $P = 5$  МВт, кабельной сетью напряжением 10 кВ, состоящей из  $n = 20$  линий (КЛ) общей длиной  $l = 8$  км.

Технический эффект от внедрения устройств РЗ от неустойчивых ОЗЗ состоит в том, что примерно 50% устойчивых повреждений в сети, сопровождающихся отключением фидеров, будет выявлено на ранней стадии развития и предупреждено. Внедрение новых устройств РЗ будет эффективно, если затраты на их оборудование и содержание будут меньше, чем разница ущербов от ненадежности сети до и после модернизации (3).

В соответствии со справочными данными [2], удельный ущерб от простоя агрегата в химической промышленности – 11 \$/кВт.ч в ценах 1998 г. (курс доллара 6,29 руб./\$, коэффициент приведения к ценам 2012 г. –  $k \approx 8$ ); среднее время восстановления технологического цикла  $t_{\text{ср}} = 50$  ч/отказ.

Поскольку среднее время восстановления технологического цикла больше, чем любые средние время восстановления электроснабжения из-за устойчивых отказов, то расчет ущерба проводится по ней. При этом: удельный ущерб от факта отказа  $y_{0,\text{отк}} = 1\,000$  руб./кВт/отказ; средняя частота устойчивых отказов для КЛ –  $\omega = 7,5$  отк./г. на 100 км их длины; срок службы новых устройств РЗ  $T_{\text{сл}} = 25$  лет; средняя отключенная мощность составит

$$P_{\text{ср}} = \frac{P}{n} = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ МВт}.$$

Среднее количество отказов в кабельной сети предприятия

$$\omega_{\text{ср}} = \omega l = \frac{7,5}{100} \cdot 8 = 0,6 \text{ отк./г.}$$

Количество предотвращенных отказов (при внедрении новых устройств РЗ будет предотвращено около 50%) составит  $\omega_{\text{сред.пред}} = 0,3$  отк./г.

Среднегодовой предотвращенный ущерб составит

$$\Delta U_{\text{П.год}} = \Delta U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{откл}} = y_0 P_{\text{ср}} t_{\text{ср}} \omega_{\text{ср.пред}} + y_{0,\text{откл}} P_{\text{ср}} \omega_{\text{ср.пред}} = 2\,150\,700 \text{ руб./г.},$$

где  $y_0 = 11 \cdot 6,29 \cdot 8 = 553,52$  руб./кВт.ч;

Суммарный предотвращенный ущерб за весь срок службы устройств

$$\Delta U_{\text{П}} = \Delta U_{\text{П.год}} \cdot T_{\text{сл}} = 2\,150\,700 \cdot 25 = 53\,767\,500 \text{ руб.}$$

Дисконтированный предотвращенный ущерб составит около 20 млн руб. (при наилучшем варианте: при процентной ставке 0,1 и нулевой инфляции).

### Выводы

В современных условиях перехода электроэнергетики к рыночным отношениям, модернизации релейной защиты и замене электромеханических устройств на микропроцессорные необходима объективная оценка технико-экономической эффективности мероприятий по повышению надёжности. Детальный анализ возможных последствий внезапных нарушений электроснабжения потребителей, связанных с отказами релейной защиты, позволяет перейти к обоснованному принятию технических решений по внедрению современных систем релейной защиты. Пример количественной оценки ущерба показывает эффективность предлагаемого метода.

### Библиографический список

1. **Шалин, А.И.** Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем / А.И. Шалин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
2. **Непомнящий, В.А.** Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей / В.А. Непомнящий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 188 с.
3. **Гук, Ю.Б.** Теория надёжности в электроэнергетике / Ю.Б. Гук. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
4. **Шабад, М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
5. **Шуин, В.А.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с.
6. Надёжность систем энергетики: сборник рекомендуемых терминов. – М.: ИАЦ «Энергия», 2007. – 192 с.
7. **Папков, Б.В.** Основы теории систем для электроэнергетиков / Б.В. Папков, А.Л. Куликов; под ред. Н.И. Воропая. – Н. Новгород: ВВАГС, 2011. – 456 с.
8. Современные проблемы экономики электроэнергетики: сб. ст. – Н. Новгород: НГТУ, 2009. – 393 с.
9. **Червонный, Е.М.** Рациональное распределение отключаемой мощности между потребителями при ликвидации аварийной ситуации в энергосистеме / Е.М. Червонный, М.В. Шарыгин // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Вып. 56. Задачи надёжности реформируемых систем энергетики и методы их решения. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2006. С. 250–258.

*Дата поступления  
в редакцию 22.12.2012*

**A.L. Kulikov, B.V. Papkov, M.V. Sharygin**

### **EFFICIENCY ASSESSMENT OF ADOPTION OF INDIVIDUAL MICROPROCESSOR-BASED PROTECTION FROM SINGLE-PHASE EARTH FAULTS IN 6–10 kV POWER NETWORKS**

**Purpose:** The authors consider problems related to the assessment of technical and economic efficiency of replacement and modernization of relay protection equipment in power networks with voltage of 6–10 kV.

**Approach:** The final goal of design, development and operation of relay protection equipment is the increase in reliability and efficacy of power network functioning and power supply, resulting in loss diminution.

**Findings:** Possible consequences of sudden disruption of power supply associated with relay protection failures are analyzed based on results of research in various industry branches possessing different technological scheme structures.

**Research limitations:** Single-phase earth faults in 6–10 kV power networks.

**Value:** A given example of a quantitative estimation of a loss shows the efficiency of the proposed methodology.

*Key words:* electric power system, control, reliability of energy supply, efficiency, loss.

УДК 621.314.222.6

А.С. Серебряков<sup>1</sup>, Д.А. Семенов<sup>2</sup>**НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт<sup>2</sup>

Предложено запатентованное устройство для диагностики состояния главной изоляции высоковольтного электрооборудования по напряжению саморазряда и возвратному напряжению. Цель создания описываемого устройства – определить оставшийся ресурс электрооборудования и не допустить внезапных пробоев электрической изоляции в процессе эксплуатации. В основу устройства положен метод контроля изоляции по абсорбционным характеристикам, в частности, по напряжению саморазряда и возвратному напряжению.

Показано, что по результатам измерений уменьшение напряжения саморазряда для распределительных трансформаторов составляет в среднем 30 В за год. Созданное устройство позволяет более точно прогнозировать оставшийся ресурс главной изоляции распределительных трансформаторов.

*Ключевые слова:* диагностики высоковольтной изоляции, заряд абсорбции, ток абсорбции, напряжение саморазряда, возвратное напряжение, постоянные времени саморазряда, износ изоляции.

Высоковольтное электрооборудование может нормально работать лишь с исправной изоляцией. В процессе эксплуатации из-за увлажнения, перегрева, динамических нагрузок и перенапряжений происходит общее старение изоляции, т.е. ухудшение ее физико-химических характеристик. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты, которые приводят к пробое изоляции.

Ресурс изоляции, как правило, определяет ресурс электрооборудования. Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации периодически проверяют. Для этого производят периодический контроль и испытания изоляции, а в случае необходимости и ее ремонт. Такие мероприятия обеспечивают поддержание требуемой степени надежности электрооборудования в процессе его эксплуатации [1].

Периодичность и нормы испытаний устанавливаются стандартами, Правилами технической эксплуатации и ведомственными инструкциями для каждого вида оборудования. При такой системе обслуживания контроль и ремонт оборудования производят по времени эксплуатации.

Как показывает практика, такая система технического обслуживания не является оптимальной. Большие резервы повышения эффективности эксплуатации трансформаторов и другого электрооборудования заложены в системе обслуживания по реальной потребности или по реальному техническому состоянию. Переход к такой системе невозможен без использования современных приборных средств, основанных на надежных и научно обоснованных методах выявления дефектов и оценки технического состояния изоляции. Для этих целей авторами разработано новое устройство для объективной оценки качества высоковольтной изоляции, на которое получен патент РФ [2]. Устройство предназначено для оценки качества главной изоляции высоковольтных электрических машин, трансформаторов и кабелей. Оценка состояния главной изоляции электрооборудования определяется на основе комплекса измерений или многопараметрического тестирования с тем, чтобы дефекты, не выявленные одним методом, могли бы выявляться другими методами.

Структурная схема предлагаемого устройства для контроля качества электрической изоляции представлена на рис. 1. Устройство содержит источник испытательного напряже-

ния 1 с управляющим входом 2, по которому устанавливается значение выходного напряжения источника испытательного напряжения, и входом 3 для быстродействующего отключения источника, бесконтактное токовое реле 4, эталонный резистор 5, ограничитель напряжения 6, зарядный ключ 7, масштабный преобразователь напряжения 8, дополнительный резистор 9, дополнительный ключ 10, разрядный ключ 11, разрядный резистор 12, индуктивную катушку 13, выходные выводы 14 и 15 устройства. К выходным выводам устройства подключают «землю» и объект испытания, представляющий собой параллельное соединение конденсатора, емкость которого равна емкости испытуемого объекта, и резистора, представляющего собой сопротивление утечки изоляции испытуемого объекта.

Кроме того, устройство содержит двухвходовой управляемый коммутатор 16 с первым 17 и вторым 18 информационными входами и управляющим входом, аналого-цифровой преобразователь 19, устройство ручного ввода информации от органов управления (клавиатура) 20, программируемый контроллер (комплексный цифровой элемент высшего функционального уровня) с двумя каналами ввода информации 22 и 23 и двумя каналами 24 и 25 вывода информации.

Канал 22 служит для ввода диагностической информации, а канал 23 – для ввода информации от органов ручного управления – клавиатуры), Канал вывода 24 служит для вывода управляющих команд, а канал 25 – для вывода диагностической информации. Аналоговый выходной канал 26 служит для управления напряжением источника питания, а дискретный выходной канал 27 – для управления двухвходовым коммутатором. Устройство сопряжения 28 с объектом управления служит для включения обмоток высоковольтных реле. Устройство отображения информации 29 предназначено для считывания результатов измерений. Диаграмма срабатывания высоковольтных ключей устройства приведена на рис. 2.

Главная изоляция высоковольтного электрооборудования, как правило, выполняется из нескольких диэлектриков с разными физическими свойствами и электротехническими характеристиками, что делает изоляцию неоднородной и позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В такой комбинированной изоляции наблюдается специфическое явление, которое заключается в том, что на границе раздела диэлектриков накапливаются заряды, называемые зарядами абсорбции. Это явление называется структурной или миграционной поляризацией. О процессе структурной поляризации можно судить по коэффициенту абсорбции, напряжению саморазряда и возвратному напряжению [3].

Для измерения напряжения саморазряда изоляцию необходимо зарядить от высоковольтного источника питания. После этого заряженную изоляцию отключают от источника питания и подключают к измерительному прибору. Напряжение на изоляции  $u_c$  при разряде ее на собственное сопротивление утечки называют напряжением саморазряда. Возвратное напряжение  $u_b$  измеряют на изоляции после отключения заряженной изоляции от источника напряжения и кратковременного ее разряда на землю [3].

Цикл измерения параметров неоднородной высоковольтной изоляции включает в себя семь стадий (рис. 2): 1 – предварительный разряд изоляции на землю (ключи 7 и 10 разомкнуты, ключ 11 замкнут); 2 – заряд изоляции (ключи 7 и 10 замкнуты, ключ 11 разомкнут); 3 – саморазряд изоляции (ключи 7 и 11 разомкнуты, ключ 10 замкнут); 4 – повторный заряд изоляции (ключи 7 и 10 замкнуты, ключ 11 разомкнут); 5 – включение добавочного резистора при повторном заряде (ключ 7 замкнут, ключи 10 и 11 разомкнуты); 6 – кратковременный разряд изоляции на землю (ключи 7 и 10 разомкнуты, ключ 11 замкнут); 7 – измерение возвратного напряжения (ключи 7 и 11 разомкнуты, ключ 10 замкнут).

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии ключ 11 замкнут, а ключ 7 и ключ 10 разомкнуты, и электрическая емкость объекта испытания разряжаются на «землю» через разрядный резистор 12 и индуктивную катушку 13. Необходимость введения индуктивной катушки вызвана соображениями электромагнитной совместимости, так как в разрядной цепи при малом значении разрядного резистора 12 и больших значениях емкости испытуемого объекта в момент замыкания разрядного ключа 11 возникают экстратоки с кру-



тым передним фронтом, высокочастотные электромагнитные помехи от которых могут приводить к сбою электронной аппаратуры. Включение индуктивной катушки делает передний фронт тока более пологим, тем самым снижая уровень высокочастотных помех. В установленном режиме катушка не оказывает сопротивления протеканию тока.

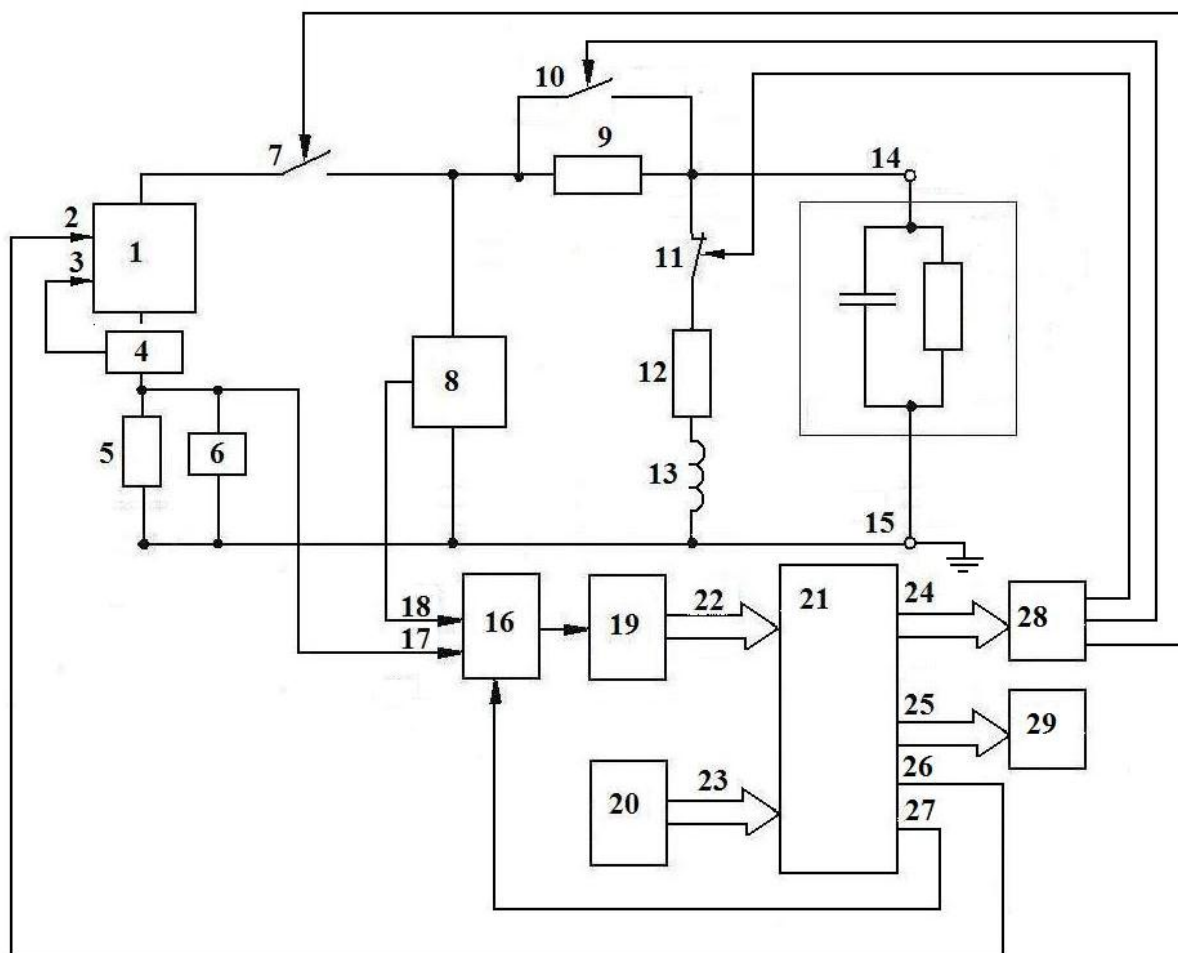


Рис. 1. Структурная схема нового устройства для контроля качества электрической изоляции

После разряда емкости изоляции в течение одной минуты в соответствии с Правилами устройства электроустановок программируемый контроллер 21 по каналу 26 подает на вход источника питания сигнал на установку требуемого значения напряжения источника питания. Далее через канал 24 и устройство сопряжения с объектом 28 подаются сигналы сначала на размыкание ключа 11 и затем на замыкание ключей 7 и 10. При указанном положении ключей 7, 10 и 11 начинается процесс заряда емкости изоляции объекта испытаний. При этом сигнал, пропорциональный току, протекающему через испытуемый объект, снимаемый с эталонного резистора 5, подается на первый вход 17 коммутатора 16. Сигнал с выхода масштабного преобразователя 8, пропорциональный напряжению на объекте испытаний, подается на второй вход 18 коммутатора сигналов 16. Сигнал, подаваемый с выхода 27 программируемого контроллера 21 периодически с большой скоростью переключает каналы двухвходового коммутатора 16, и на его выходе поочередно появляются сигналы, пропорциональные напряжению и току. Эти сигналы преобразуются аналого-цифровым преобразователем 19 и через первый канал ввода информации подаются в программируемый контроллер 21, где по известной формуле в соответствии с законом Ома рассчитывается значение сопротивления изоляции  $R$  объекта испытаний и коэффициент абсорбции как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к его пятнадцатисекундному значению. На дис-

пнее строится зависимость сопротивления изоляции от времени и выводятся результаты расчета. Далее зарядный ключ 7 выключается, ключ 10 остается замкнутым, а ключ 11 разомкнутым и начинается процесс саморазряда изоляции, который продолжается, также, как и заряд изоляции, в течение одной минуты [3].

В процессе саморазряда измеряется только напряжение саморазряда на объекте испытания. Рассчитываются необходимые данные (емкость  $C$ ), и на дисплее 29 строится кривая напряжения саморазряда – зависимость напряжения саморазряда от времени. Через одну минуту снова включается зарядный ключ 7, ключ 10 остается замкнутым, а ключ 11 разомкнутым, и снова в течение одной минуты происходит повторный заряд изоляции. При этом повторяются те же измерения, что и при первом замере. Повторный заряд изоляции необходим для того, чтобы перед измерением возвратного напряжения компенсировать убыль заряда в изоляции, произошедшей в процессе саморазряда. Эта убыль всегда различная. Начальные условия для процесса измерения возвратного напряжения также были бы различными и их нельзя было бы сравнивать друг с другом. После окончания повторного заряда на короткое время размыкается дополнительный ключ 10 и в цепь испытуемого объекта вводится дополнительный резистор 9 известного значения. Введение дополнительного резистора увеличивает внутреннее сопротивление источника питания, что влияет на протекание процессов, обусловленных частичными разрядами в изоляции. Измеряя сопротивление изоляции с введенным и выведенным добавочным сопротивлением, можно судить об отсутствии или наличии частичных разрядов в изоляции и их интенсивности [3].

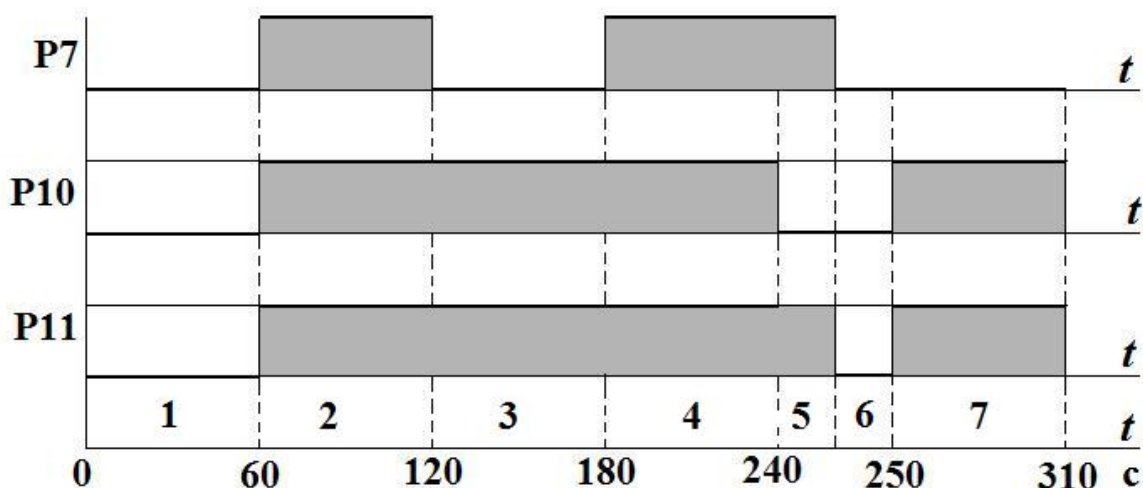


Рис. 2. Диаграмма срабатывания высоковольтных ключей устройства

После определения наличия частичных разрядов все ключи отключаются, в течение короткого времени (выбрано равным 5 с) геометрическая емкость изоляции разряжается через разрядный ключ 11, разрядный резистор 12 и индуктивную катушку 13 на «землю», а поглощенный внутри изоляции заряд абсорбции на «землю» стечь не успевает. Через 5 с разрядный ключ 11 размыкает, а ключ 10 замыкает свои контакты, процесс разряда прекращается и начинается процесс измерения возвратного напряжения, которое возникает на изоляции за счет поглощенного заряда абсорбции, постепенно заряжающего разряженную геометрическую емкость. Процесс саморазряда длится одну минуту, в течение которой измеряется возвратное напряжение и на дисплее строится его зависимость от времени. По окончании одной минуты разрядный ключ 11 замыкает свои контакты. Процесс измерения заканчивается, и оставшийся в изоляции заряд разряжается на «землю».

Если производится испытание крупных машин, кабелей или трансформаторов, обладающих большой емкостью, которая не успевает полностью зарядиться через одну минуту,

то в этом случае следует пользоваться стандартом США – заряжать изоляцию в течение 10 мин и коэффициент абсорбции (по стандарту США индекс поляризации) определять как отношение десятиминутного значения сопротивления изоляции к одноминутному значению.

В некоторых случаях (за рубежом), наряду с индексом поляризации, нормируют коэффициент диэлектрической абсорбции (DAR), вычисляемый как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к тридцатисекундному ее значению. Программируемый контроллер позволяет измерять сопротивление изоляции по указанным выше программам и выдавать информацию на дисплей.

Вход 2 регулируемого источника испытательного напряжения позволяет устанавливать требуемые значения напряжения в зависимости от номинального напряжения объекта испытания. При коротких замыканиях в объекте испытания бесконтактное токовое реле подачей сигнала на вход 3 источника питания обеспечивает быстрое снятие напряжения. Ограничитель напряжения  $b$  при коротких замыканиях ограничивает уровень сигнала, снимаемого с эталонного сопротивления, и тем самым предохраняет коммутатор и АЦП от повреждений при коротких замыканиях.

На рис. 3 показаны полученные авторами с помощью разработанного прибора реальные зависимости напряжения саморазряда главной изоляции от времени для распределительных трансформаторов с разными сроками эксплуатации: 1 – новый трансформатор при вводе его в эксплуатацию), 2 – после 10 лет эксплуатации, 3 – после 28 лет эксплуатации, 4 – после полного срока эксплуатации более 40 лет, когда трансформатор полностью выработал свой ресурс. Нагрузка трансформаторов составляла 70–80% от номинальной.

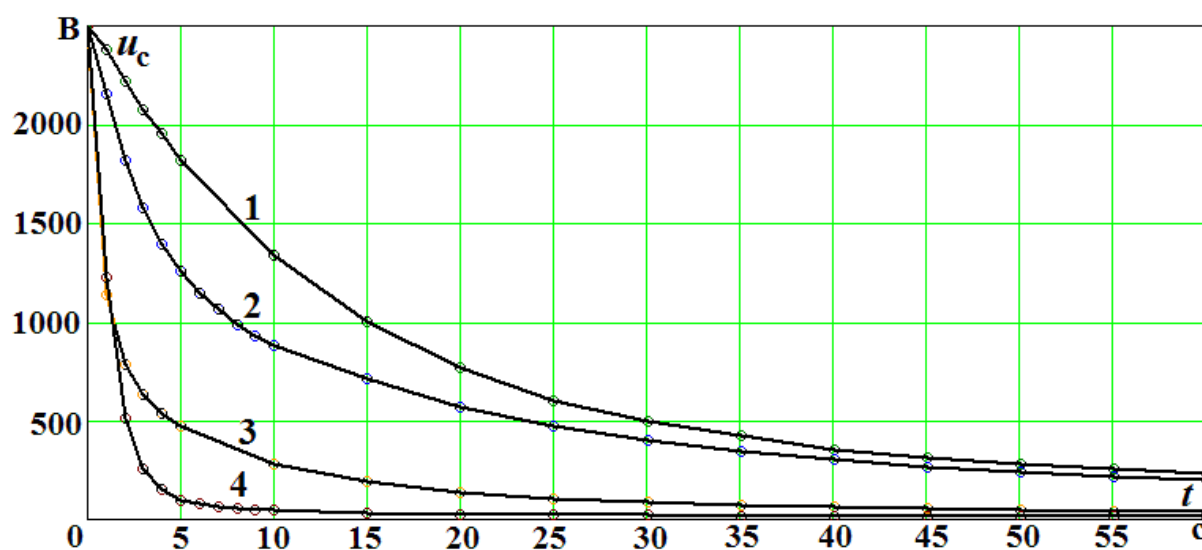


Рис. 3. Кривые саморазряда главной изоляции трансформаторов с разными сроками эксплуатации

Как показали исследования (рис. 3) кривые напряжения саморазряда аппроксимируются тремя ярко выраженными экспонентами: *быстрой* с постоянной времени  $\tau_1=0,5-2,2$  с; *средней* с постоянной времени  $\tau_2=5-11$  с и *медленной* с постоянной времени  $\tau_3=30-70$  с. Установлено, что начальное значение у быстрой экспоненты с увеличением срока эксплуатации возрастает, а у средней и медленной – уменьшается.

Как видно из рис. 3, напряжение саморазряда с увеличением срока эксплуатации трансформаторов уменьшается. Исследованиями авторов установлено, что для напряжения саморазряда  $u_{c15}$ , измеренного на 15-й секунде после начала процесса саморазряда, уменьшение напряжения для распределительных трансформаторов составило в среднем 30 В за

год. Пользуясь этим соотношением, можно определить оставшийся ресурс главной изоляции трансформаторов. С увеличением срока службы уменьшается и возвратное напряжение, по значению которого также определяют оставшийся ресурс.

Технико-экономический эффект от предложенного устройства определяется улучшением электромагнитной совместимости устройства, повышением надежности его работы, а также более высоким уровнем автоматизации, более удобной формой обработки и отображения полученных результатов измерения и возможностью более точно прогнозировать оставшийся ресурс главной изоляции высоковольтного электрооборудования.

### Библиографический список

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования; под общей ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Кога-на, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001. – 256 с.
2. Пат. РФ № 119125. Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов Д.А., Степанов Б.С., Игнаткин Д.Н. Опубл. 10.08.2012, Бюл. №22.
3. **Серебряков, А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.

*Дата поступления  
в редакцию 22.12.2012*

**A.S. Serebryakov, D.A. Semenov**

### NEW ARRANGEMENT FOR QUALITY ASSURANCE OF ELECTRIC ISOLATION

It has been suggested the patented arrangement for diagnostics of a condition of the main isolation of a high-voltage electric equipment on a pressure of the self-category and a returnable pressure. Objective of creation of a described arrangement is to define the remained resource of electric equipment and to not admit sudden breakdowns of electric isolation while in service.

The quality monitoring of isolation is put in a basis of an arrangement of absorption characteristics, in particular, on a pressure of the self-category and a returnable pressure.

It is shown, that by results of measurements reduction of a pressure of the self-category for distributive transformers averages 30 V for a year. The created arrangement allows predicting more precisely the remained resource of the main isolation of distributive transformers.

*Key words:* diagnostics of high-voltage isolation, a charge of absorption, a current of absorption, a pressure of the self-category, a returnable pressure constants of time of the self-category, wear of isolation.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.745.55

А.Г. Панов

### ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ФСМг-МОДИФИКАТОРОВ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И МИКРОСТРУКТУРУ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ

ИНЭКА, г. Набережные Челны

Выявлено, что все основные структурные составляющие модификатора ФС50Мг5 ( $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Mg<sub>2</sub>Si) активно влияют на протекание процессов первичной кристаллизации высокопрочного чугуна, что проявляется в существенном изменении морфологии и количестве графита и матрицы в структуре чугуновых отливок. Измельчение микроструктуры ФС50Мг5 приводит к повышению сфероидизирующего и уменьшению графитизирующего эффектов.

*Ключевые слова:* отливка, высокопрочный чугун, лигатура, модификатор, микроструктура, фазовый состав, стабильность, механизм влияния

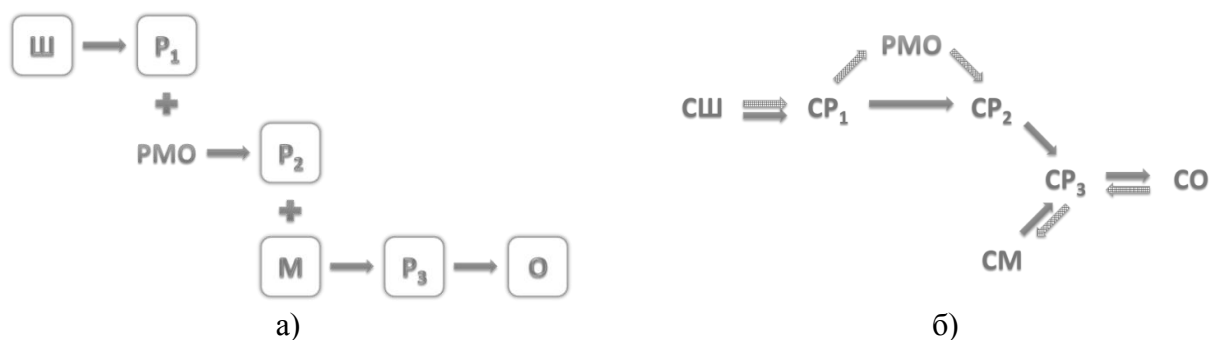
Отечественные государственные стандарты на отливки из чугунов с шаровидным графитом включают два: ГОСТ7293 и ГОСТ7769. Большинство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в отечественном производстве изготавливается из чугунов марок ВЧ45, ВЧ50 и ВЧ60 (ГОСТ7293), а также Gh-56-40-05 (Нормаль FIAT-BAЗтаблица №52215), значительно реже – ВЧ40, ВЧ70 (ГОСТ7293), ЧН19Х3Ш и ЧС5Ш (ГОСТ7769), а также ЧН16Д7ХШ ТУ 4111-080-00219454-2005. На высокопрочный чугун с вермикулярным графитом для отливок в конце 80-х на основе многочисленных теоретических и практических результатов исследований был разработан ГОСТ 28394-89, однако сколь-нибудь серьёзного практического освоения этот перспективный материал в отечественной промышленности, к сожалению, до сих пор не получил.

Традиционный отечественный подход к выбору и разработке магнийсодержащих лигатур-модификаторов для технологического процесса заключается в выборе наиболее дешёвого элементного состава, а также оптимизации фракционного и элементного состава по степени усвоения ведущих элементов. Такой подход не вызывает трудностей в изготовлении отливок из ВЧШГ относительно невысоких по прочностным и пластическим свойствам марок (ВЧ50, Gh-56-40-05), допускающих большие размахи и дисперсии соотношения феррит/перлит матрицы, формы, размеров и распределения графитов в их микроструктуре. Однако при изготовлении отливок с повышенными требованиями к пластичности (ВЧ45, ВЧ40, ВЧ35 с ферритной матрицей), прочности (ВЧ60, ВЧ70 с перлитной, ВЧ100 с аустенитно-бейнитной матрицей), ростоустойчивости (ЧН19Х3Ш с аустенитной матрицей), где ограничивается, или не допускается наличие в микроструктуре матрицы чугуна «посторонних» фаз, такой подход неприемлем. Требуется дополнительно учитывать влияние микроструктуры и фазового состава модификаторов [1, 2, 3], что в производствах никогда не делается. В результате изготовление указанной продукции сопровождается повышенным браком и затратами на дополнительное легирование и/или термическую обработку отливок. Это, по всей видимости, и явилось основной причиной низкой освоенности отечественной промышленно-

стью изделий из высококачественных высокопрочных чугунов с шаровидным, особенно вермикулярным графитом [4].

Дополнительной трудностью в последние годы является увеличение разнообразия и вместе с тем усиление влияния наследственного состояния расплава перед модифицирующей обработкой из-за изменения структуры шихты и методов приготовления расплавов чугунолитейного производства [3, 5, 6].

Результатом исследований, направленных на устранение выявленных причин, стал метод повышения стабильности модифицирования (качества) чугунолитейных расплавов [7]. Суть метода заключается в следующем (рис. 1). Получаемый при выплавке из шихты, каждый экземпляр которой имеет определённую исходную структуру, расплав  $P_1$  в обычных условиях литейного производства имеет наследственное строение  $CP_1$ , которое с помощью рафинирующе-модифицирующей обработки ( $PMO$ ) следует изменить, а именно, разрушить или удалить сохранившиеся в нём структуры для получения расплава  $P_2$ , приобретающего таким образом макро- и микрооднородное строение  $CP_2$ . При этом методы и режимы рафинирующе-модифицирующей обработки следует выбирать в зависимости от  $CP_1$ , а следовательно, от структуры шихты и технологии плавки расплава  $P_1$ . Перед разливкой следует путём ввода в однородный расплав  $P_2$  с помощью лигатур-модификаторов  $M$  (модифицирования) внести в него элементы структуры расплава (ЭСР), то есть создать в нём необходимое микрооднородное строение  $CP_3$ , обеспечивающее в термовременных условиях разливки и кристаллизации структурообразование требуемого строения графита и матрицы чугуна отливки  $CO$ .



**Рис. 1. Метод повышения стабильности модифицирования:**

*а* – схема технологического процесса; *б* – схема управления формированием структуры отливки

Важной задачей литейной науки является выявление частных механизмов структурообразования чугуновых расплавов при их взаимодействии с лигатурами-модификаторами и разработка на основе этих данных требований к структуре и физико-химическим свойствам отдельных фаз модификаторов, обеспечивающих необходимую степень и устойчивость микрооднородности расплавов чугунов в конкретных условиях литейного производства.

Наибольший объём информации по механизмам влияния микроструктуры модификаторов на кристаллизацию литейных расплавов получен для силуминов [3]. На основании этой информации авторы делают вывод о генетическом влиянии структуры модифицирующих лигатур, в частности  $Al+Ti$ , на структуру и свойства сплавов в системе «твёрдое – жидкое – твёрдое». При этом установлена качественная и количественная корреляция «Параметры интерметаллида (ИМ) в лигатуре» → «Параметры структуры сплава» через «матрицу генома лигатуры»:

$$\left\{ \begin{array}{c} C_3 \\ \overline{FC} \\ A \\ M \\ N \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{c} \text{СПЛАВ} \\ P \\ \text{ИП} \\ Ж \\ C \end{array} \right\} \quad (1)$$

В левой части матрицы приведены учитываемые составляющие генома лигатуры: С<sub>0</sub> – содержание элемента в лигатуре, ФС – фазовый состав ИМ, А – средний размер ИМ, М – морфология ИМ, N – количество ИМ. В правой части представлен объект ответственности или действия составляющих генома: СПЛАВ – марка модифицируемого сплава или система сплава, Р – расход лигатуры, ИП – инкубационный период действия ИМ, Ж – живучесть ИМ, С – свойства модифицируемого сплава.

В работах [2, 8] впервые исследованы изменения структуры и модифицирующей способности литых Fe-Ni-Mg-лигатур – модификаторов высокопрочных чугунов – под влиянием модифицирования их расплава и ускоренного охлаждения. В работе [9] обобщены полученные результаты и предложен механизм влияния микроструктуры ЖНМг-модификаторов на строение высокопрочных чугунов. Наследуемые чугуном расплавом элементы структуры (ЭСР) модификаторов и влияние их характеристик на микроструктуру отливок представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Матрица влияния характеристик структурных элементов ЖНМг-модификаторов на их наследование чугунами расплавами и микроструктуру отливок**

Фаза ЖНМг-модификатора	Наследуемые из модификаторов ЭСР чугуна Влияние на живучесть унаследованных ЭСР	Влияние на степень переохлаждения расплава при кристаллизации	Влияние на микроструктуру чугуна в отливке					
			графит		аустенит (перлит)			
			ССГ	размеры		количество	дисперсность	
Графит:	Углеродные ЭСР	↓	+	-	-		↓	↓
размеры	↑	↓		↓	↑		↓	↓
морфология (тип графита)	↑	-		↑	-		-	-
Аустенит:	ЭСР с ближним порядком аустенита	↓	+	↓	↑	+	↑	↓
размеры	↑	↓		↓	↑		↑	↓
морфология (содержание С)	↑	-		-	-		-	-
Магниты и карбомагниты никеля и железа:	Квазигазовые (межкластерные) ЭСР, богатые магнием	↑	+	↑	↓			
размеры	↓	↓		↓	↓			
Фосфиды РЗМ <sup>1</sup>	Тугоплавкие фосфиды РЗМ	↓	+	↓		+	↑	↓

<sup>1</sup>Переходит в микроструктуру отливки

Целью настоящей работы было получение материаловедческой информации и выявление механизма влияния микроструктуры модифицирующих лигатур ФСМг5 на микроструктуру отливок высокопрочных чугунов.

Исследовали влияние микроструктуры ФСМг-модификаторов на их графитизирующую и сфероидизирующую модифицирующую способность.

Расплавы опытных лигатур готовили в печи ИСТ-0,16 с графитовым тиглем переплавом предварительно тщательно перемешанного товарного модификатора ФС50Мг5 (ТУ 14-141-73-86, Ключевской завод ферросплавов) количеством 25,5 кг на плавку. Первую плавку проводили с добавлением магния в количестве 300 г (1,16%), вторую плавку проводили с ковшевым модифицированием расплава поверхностно-активными элементами (модификатор Glitter)

в количестве 0,015%. Химический состав лигатур опытных плавок представлен в табл. 2. Расплавы перегревали до  $T = 1380\text{--}1390^\circ\text{C}$ . Плавку разливали одним ковшем сначала методом ЦБЛ в пластину толщиной 3 мм и в отливку толщиной 20 мм, а остатки расплава – в изложницу в чушку толщиной 10 см. Таким образом изготовили 6 вариантов модификаторов:

- М11 – без модифицирования, ЦБЛ, толщина пластины 3 мм;
- М12 – без модифицирования, ЦБЛ, толщина отливки 20 мм;
- М13 – без модифицирования, изложница, толщина чушки 10 см;
- М21 – с модифицированием, ЦБЛ, толщина пластины 3 мм;
- М22 – с модифицированием, ЦБЛ, толщина отливки 20 мм;
- М23 – с модифицированием, изложница, толщина чушки 10 см.

Таблица 2

## Химический состав лигатур опытных плавок

Плавка	Mg	Si	PЗМ
№1 (немодифицированный расплав)	5,4±0,3	45,2±0,7	0,50±0,15
№2 (модифицированный расплав)	4,50±0,22	46,2±0,7	0,44±0,15

Влияние микроструктуры модификаторов на их модифицирующую способность исследовали на лигатурах М13, М21 и М22, предварительно дроблёных и фракционированных до обычно применяемой в литейном производстве фракции 0,8–5,0 мм. Предварительные исследования показали, что опытные лигатуры имеют различные микроструктуры, а именно, в них происходит последовательное измельчение основных фаз  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Mg<sub>2</sub>Si в ряду М13 → М22 → М21. Примеры изображений микроструктур, полученных с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ32 и автоматического анализатора изображений ImageExpertPro 3, приведены на рис. 2.

Учитывая, что чугуны обладают структурной наследственностью, связанной со структурой исходных шихтовых материалов, эксперименты проводили на специально выплавляемых в индукционной печи ИСТ-0,4 синтетических чугунах с перегревом и выдержкой расплава выше 1600°C в течение не менее получаса с последующим охлаждением до рабочей температуры выпуска 1400–1410°C. Чугунный расплав в количестве 100 кг выпускали в ковш ёмкостью 160 кг. Модифицирование осуществляли в ковше с помощью стального колокольчика. Пробы для определения химического состава заливали через 1 мин при температуре расплава 1350–1360°C и через 5 мин после окончания модифицирующей обработки.

Фактический расход модификаторов и основных модифицирующих элементов представлен в табл. 3. Как видно из табл. 3, по количеству вводимых элементов операции модифицирования незначительно отличаются только по кремнию. Причём в виде немодифицированного чушкового модификатора вводилось более низкое количество (на 0,1% абсолютных или 10% относительных) кремния, чем в виде модифицированных модификаторов, что по имеющейся ранее информации [10, 11] должно было бы проявиться на более низком графитизирующем эффекте.

Таблица 3

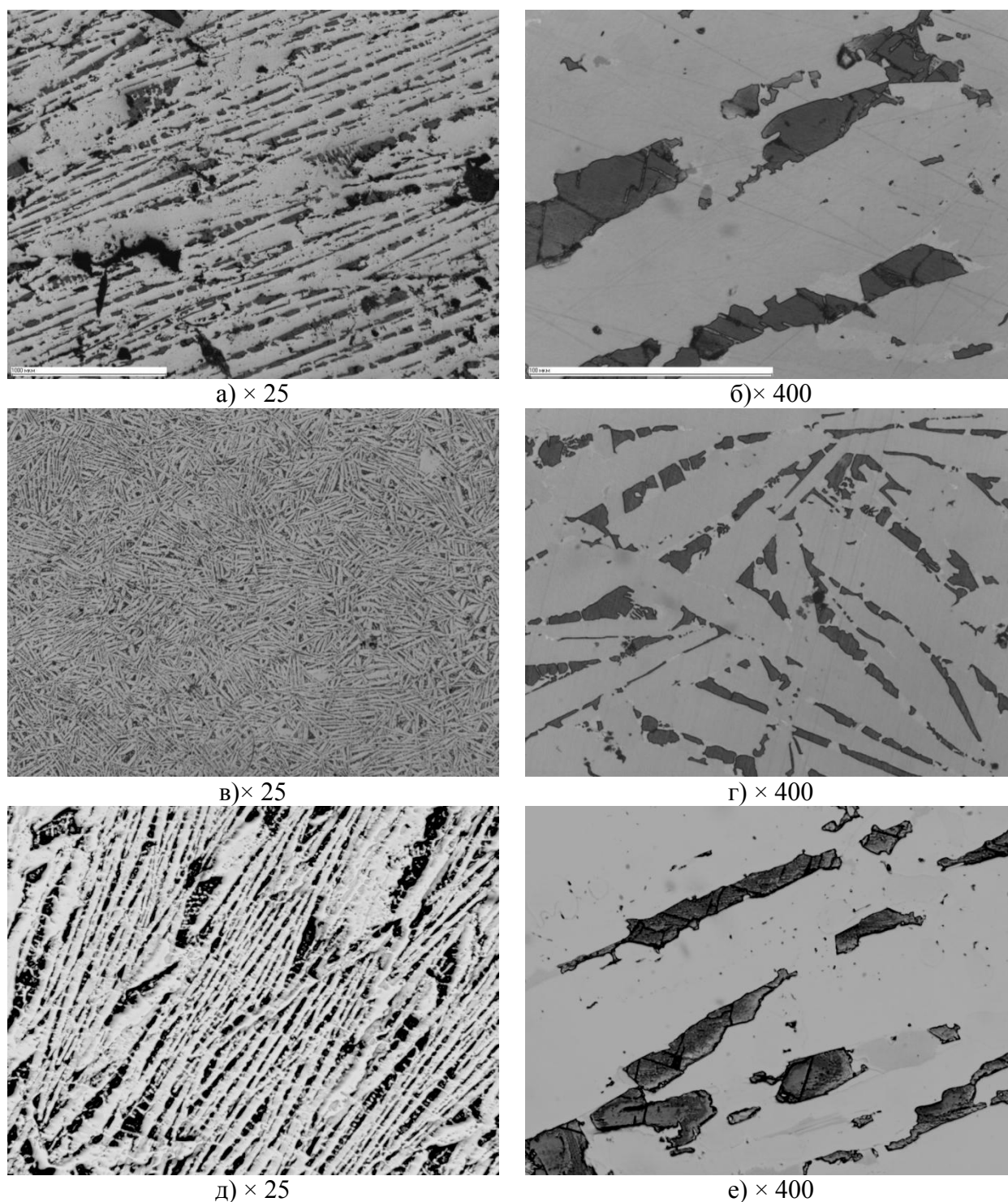
## Расход модификаторов и магния при изготовлении опытного чугуна

Ковш	Модификатор	Расход лигатуры, %	Расход элементов, %		
			Mg	Si	PЗМ
1	М21 (модифицированный, пластина)	1,2	0,054	0,55	0,005
2	М13 (немодифицированный, чушка)	1,0	0,054	0,45	0,005
3	М22 (модифицированный, ЦБЛ)	1,2	0,054	0,55	0,005

Результаты определения химического состава расплавов чугунов до модифицирова-



ния (расплав), после модифицирования ферросилицием ФС75 в количестве 0,5% (СЧ) и после модифицирования опытными лигатурами (ВЧ\_М...) через 1 мин после обработки (первый результат) и через 5 мин (второй результат) представлены в табл. 4.



**Рис. 2. Микроструктура опытных лигатур:**  
*а, б* – М13 (верх чушки); *в, в* – М21 (вдоль поверхности пластины); *д, е* – М22

Чугун, модифицированный лигатурой М13, имеет самое низкое содержание серы и магния уже через 1 мин после обработки, а через 5 мин остаточное содержание магния в нём уменьшается почти в полтора раза. Такой характер поведения можно объяснить наличием в микроструктуре модификатора крупных магнийсодержащих фаз ( $Mg_2Si$ ), образующих при

взаимодействии с чугунным расплавом наиболее крупные пузырьки и сульфиды магния, которые легко и быстро совместно всплывают. При этом в жидкую фазу расплава переходит и остаётся в нём минимальное количество магния.

Таблица 4

## Химический состав чугуна и степень усвоения магния

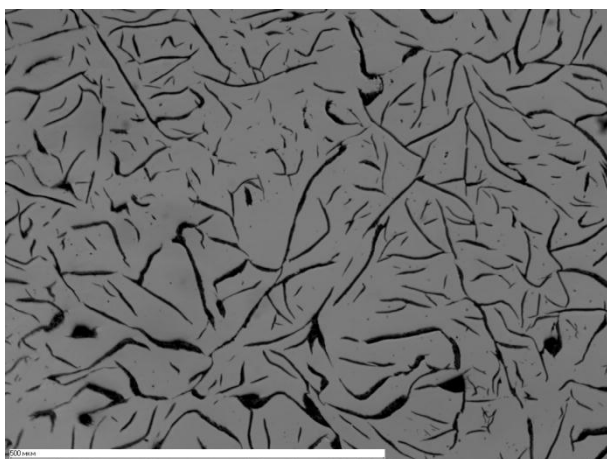
Проба	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mg	
								усвоение из лигатуры
Расплав	3,86	1,28	0,70	0,20	0,014	<b>0,017</b>	-	-
СЧ	3,83	1,61	0,70	0,20	0,015	<b>0,018</b>	-	-
ВЧ М13/1	3,81	1,78	0,69	0,19	0,014	<b>0,011</b>	<b>0,024</b>	<b>44</b>
ВЧ М13/2	3,79	1,77	0,69	0,19	0,014	<b>0,011</b>	<b>0,017</b>	<b>31</b>
ВЧ М21/1	3,79	1,88	0,69	0,19	0,014	<b>0,014</b>	<b>0,029</b>	<b>54</b>
ВЧ М21/2	3,76	1,88	0,69	0,19	0,014	<b>0,014</b>	<b>0,027</b>	<b>50</b>
ВЧ М22/1	3,74	1,90	0,67	0,19	0,015	<b>0,012</b>	<b>0,032</b>	<b>59</b>
ВЧ М22/2	3,79	1,89	0,68	0,19	0,016	<b>0,019</b>	<b>0,046</b>	<b>85</b>

Максимальное содержание серы со средним содержанием магния наблюдается у чугуна, модифицированного лигатурой М21, что объясняется наиболее мелкой микроструктурой и соответственно – наиболее мелкими пузырьками и сульфидами магния, которые наиболее хорошо усваиваются и медленнее удаляются из расплава. Поэтому изменение содержания как серы, так и магния в расплаве в течение 5 мин происходит незначительно.

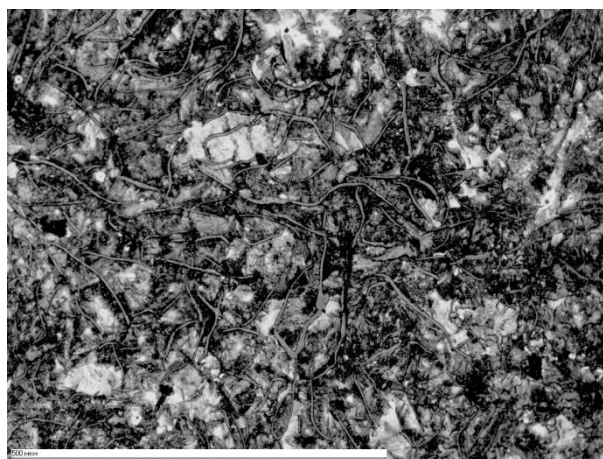
Максимальное количество магния и близкое к минимальному содержание серы после модифицирующей обработки в чугунном расплаве наблюдается для лигатуры М22.

Исследование микроструктуры модифицированных ферросилицием ФС75 (рис. 3) и модифицированных опытными лигатурами (рис. 4, рис. 5) чугунов с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ32 и автоматического анализатора изображений ImageExpertPro 3 показало следующие результаты.

Модифицированный ферросилицием ФС75 чугун имеет в своей микроструктуре графит пластинчатый в количестве ~ 14% с перлитной металлической матрицей до 5% феррита.



а)



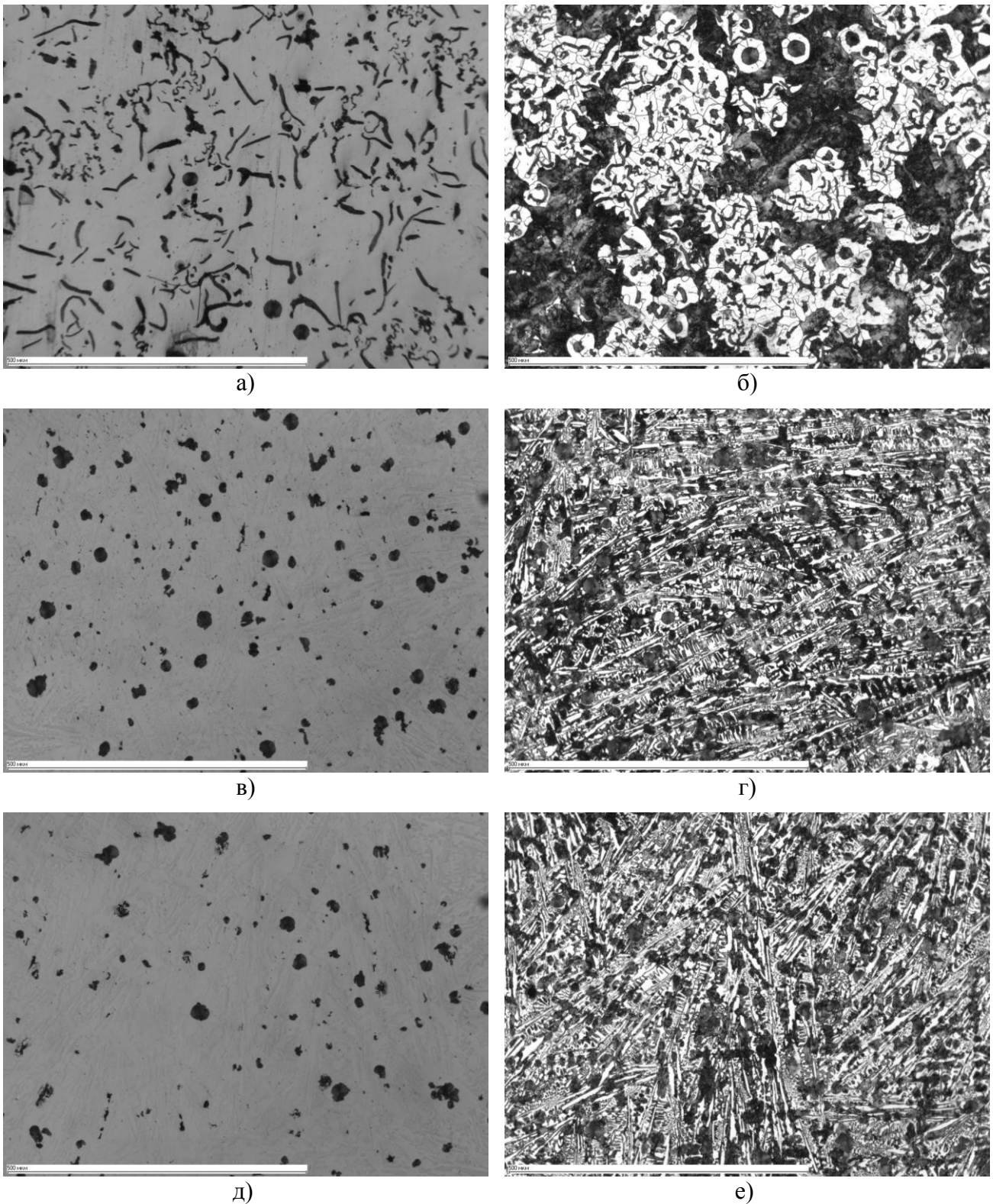
б)

Рис. 3. Микроструктура чугуна, модифицированного ФС75:

а –  $\times 100$  (не травлено); б –  $\times 400$  (травлено)

Модифицированный лигатурой М13 чугун (рис. 4, а, б) имеет в своей микроструктуре ~ 12% графита, в основном вермикулярной формы, с отдельными включениями шаровидной формы. Металлическая матрица – феррито-перлитная с долей феррита ~ 30%, без свободного

цементита.

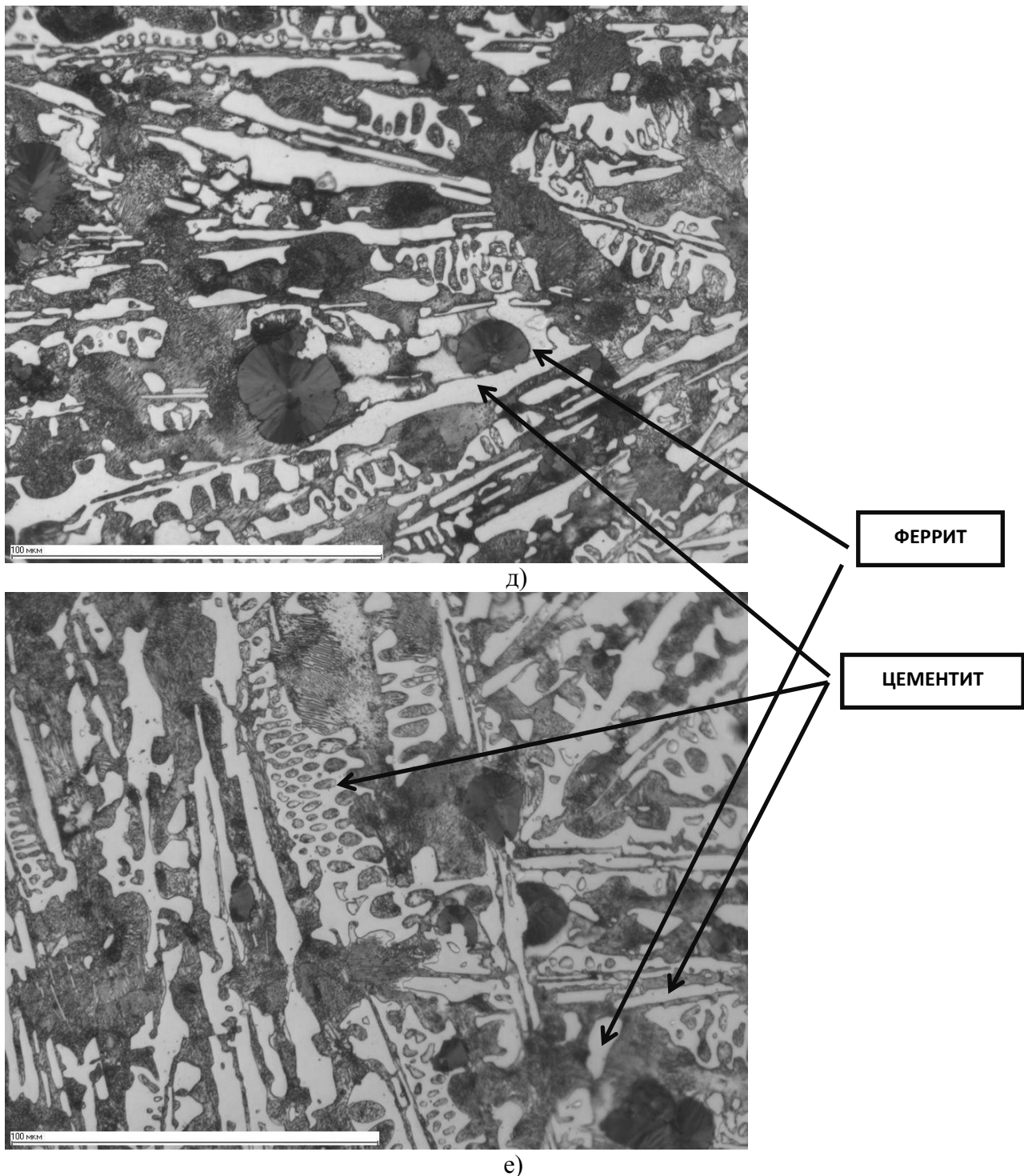


**Рис. 4. Микроструктура чугунов, модифицированных опытными лигатурами:**  
*а, б* – M13; *в, г* – M21; *д, е* – M22, соответственно *а, в, д*  $\times 100$  (не травлено) *б, г, е*  $\times 400$  (травлено)

Модифицированный лигатурой M21 чугун (рис. 4, *в, г* и рис. 5, *а*) имеет в своей микроструктуре примерно в два раза меньше ( $\sim 6\%$ ) графита, весь графит имеет шаровидную форму. Металлическая матрица в основном состоит из перлита, ледебурита распавшегося и пер-

вичного цементита, общее содержание цементита первичного и ледебурита ~ 25%. Также наблюдается небольшое (менее 5%) количество феррита в виде оторочки вокруг некоторых включений шаровидного графита (несформировавшийся «бычий глаз»).

Микроструктура чугуна, модифицированного лигатурой M22 (рис. 4, *д-е* и рис. 5, *б*), схожа с микроструктурой чугуна, модифицированного лигатурой M21. При этом уменьшается количество графита до ~3%, несколько увеличивается количество цементита ледебурита распавшегося и первичного (до ~ 30%) и уменьшается количество феррита до ~ 2%.



**Рис. 5. Микроструктура матрицы чугунов,  $\times 400$ , травлено, модифицированных лигатурой M21 (*а*) лигатурой M22 (*б*)**  
 Выявленные особенности микроструктуры опытных чугунов не могут быть объясне-

ны особенностями состава использованных модифицирующих лигатур. В то же время они объясняются особенностями микростроения модификаторов. Рафинированный гомогенизированный чугунный расплав *P2* (рис. 1), в соответствии с современными представлениями, является механической смесью элементов структуры, обладающих ближним порядком, соответствующим цементиту в твёрдом состоянии, с разупорядоченными (межкластерными) структурными элементами. При вводе в такой расплав ФС50Mg5-модификаторов в него вносятся элементы структур лигатур, унаследованные от их твёрдого строения [11]:  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Mg<sub>2</sub>Si. Расплав становится специфически микронеоднородным.

Структуры, унаследованные от FeSi, особенно  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, в соответствии с квазихимической моделью микронеоднородного строения расплава [5], взаимодействуют с ЭСР, имеющими ближний порядок цементита. В результате такого взаимодействия в расплаве перераспределяются химические связи между атомами Fe, Si и C, образуются новые обеднённые углеродом Fe-C-Si-структуры, являющиеся при охлаждении расплава предзародышами и зародышами феррита и аустенита, а также освобождается углерод, который впоследствии формируется в свободном виде, то есть в виде графита. Фазы  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, особенно FeSi, являются относительно тугоплавкими и энергоёмкими. Чем они крупнее в модифицирующих лигатурах, тем выше начальная микронеоднородность чугунного расплава, требуется большая энергия и более длительное время для протекания описанного физико-химического процесса. Поэтому в чугунах, модифицированных лигатурой M13, имеющей максимально крупные фазы FeSi и  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, несмотря на меньшее количество введённого с модификатором кремния и соответственно меньшее количество кремния в модифицированном чугуне, структура получается без отбела с перлитом-ферритной матрицей. В то время как в чугунах, модифицированных лигатурами M21 и M22, обладающими более чем на порядок меньшими объёмными размерами, время релаксации (перехода от микронеоднородного до однородного состояния) расплава при температуре опытного процесса, очевидно, менее 1 мин. Поэтому большинство потенциальных предзародышей феррита, аустенита и графита, образующихся по описанному механизму, не достигают критических размеров, графитообразование не активизируется и чугун кристаллизуется с большой долей первичного цементита и ледебурита.

Структуры, унаследованные чугунным расплавом *P2* от фаз Mg<sub>2</sub>Si модифицирующих лигатур, являясь легкоплавкими и малоэнергоёмкими, участвуют в формировании его межкластерных пространств и связей. Кремний обладает большим сродством к железу, чем к магнию, поэтому при взаимодействии Mg<sub>2</sub>Si с ЭСР чугуна, имеющими ближний порядок цементита, высвобождается атомарный магний, который после достижения критического размера зародыша формируется в пузырьк. Кроме того, магний имеет высокое сродство к кислороду и сере, поэтому также легко теряет связь с кремнием и образует оксиды и сульфиды. Чем мельче фазы Mg<sub>2</sub>Si в модификаторах, тем, очевидно, меньшие размеры имеют фазы, образующиеся по описанному механизму.

Таким образом, при модифицировании лигатурой M13, обладающей крупнокристаллической структурой, происходило наиболее активное парообразование магния, что привело к максимальной очистке от серы (сульфидов магния) и минимальному усвоению магния расплавом, недостаточном для формирования графита с шаровидной формой. При модифицировании лигатурами M21 и M22 произошло максимальное усвоение магния, достаточное для формирования графита с шаровидной формой. При этом рафинирование от неметаллических включений (в частности, сульфидов) происходило с минимальными темпами при обработке расплава лигатурой M21, имеющей минимальные размеры фаз в исходном твёрдом состоянии. Поэтому невсплывшие сульфиды и, по всей видимости, оксиды послужили дополнительными центрами графитизации при кристаллизации, и в микроструктуре чугуна ВЧ\_M21



кристаллизовалось в два раза больше графита при более низком содержании цементита и более высоком содержании феррита, чем в чугунах ВЧ\_М22.

### Выводы

1. Все структурные составляющие сфероидизирующего модификатора ФС50Mг5 ( $\alpha$  - FeSi<sub>2</sub>, FeSi, Mg<sub>2</sub>Si) активно влияют на протекание процессов первичной кристаллизации высокопрочного чугуна, что проявляется в существенном изменении морфологии и количестве графита и матрицы в структуре чугунных отливок.

2. Наследуемые чугуном расплавом от модификатора структуры FeSi и  $\alpha$  - FeSi<sub>2</sub>, взаимодействуют с ЭСР, имеющими ближний порядок цементита, в результате чего в расплаве перераспределяются химические связи между атомами Fe, Si и C, образуются новые обеднённые углеродом Fe-C-Si структуры, являющиеся при последующем охлаждении расплава предзародышами и зародышами феррита и аустенита; поэтому в чугунах, обработанных крупнокристаллическими модификаторами, активнее протекает первичная кристаллизация графита, аустенита и феррита, а в чугунах, обработанных мелкокристаллическими модификаторами, первичная кристаллизация графита, феррита и аустенита подавляется и кристаллизуется цементит и ледебурит.

3. Наследуемые чугуном расплавом от модификатора структуры Mg<sub>2</sub>Si модификаторов участвуют в формировании разупорядоченных областей чугуна расплава, их размеры влияют на интенсивность удаления магния и неметаллических включений из расплава, что влияет на количественные характеристики и морфологию графита; измельчение магнийсодержащих фаз приводит к повышению сфероидизирующего и графитизирующего эффектов.

### Библиографический список

1. **Панов, А.Г.** О влиянии окисленности Fe-Si-Mg лигатур на свойства ЧШГ, полученного разными методами модифицирования / А.Г. Панов, А.Э. Корниенко // Литейщик России. 2010. № 1. С. 27-34.
2. **Панов, А.Г.** Влияние микроструктуры литых Fe-Mg-Ni лигатур на кристаллизацию и микроструктуру модифицированного высокопрочного чугуна // Изв. вузов. ЧМ. 2010. №11. С. 55-60.
3. **Никитин, В.И.** Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 476 с.
4. **Дибров, И. А.** Состояние и перспективные направления развития литейного производства России // Литейщик России. 2011. №9. С. 9-15.
5. Исследование структурообразования расплавов чугунов. Влияние наследственности на свойства отливок из ЧВГ / А.Г. Панов [и др.] // Литейщик России. 2010. № 4. С. 17-20
6. **Панов, А.Г.** Управление качеством чугуна дуговой плавки для ответственных автомобильных отливок / А.Г. Панов, Э.В. Панфилов, Д.А. Гуртовой // Литейное производство. 2011. № 12. С. 5-7.
7. **Панов, А.Г.** Метод повышения стабильности результатов модифицирования графитизированных чугунов // Литейщик России. 2010. № 8. С. 17-19.
8. **Панов, А.Г.** Совершенствование технологии модифицирования чугунов с шаровидным графитом Mg-Ni-Fe лигатурой / А.Г. Панов, Ан. Э. Корниенко, А.Э. Корниенко // Литейщик России. 2009. № 3. С. 27-30.
9. **Панов, А.Г.** О механизме наследственного влияния микроструктуры лигатур на строение и свойства высокопрочного чугуна // Литейщик России. 2012. № 9. С. 9-13.
10. **Гиршович, Н.Г.** Справочник по чугунному литью / Н.Г. Гиршович; под ред. Н.Г. Гиршовича. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение (Ленинград. отд.), 1978. – 758 с.

11. **Шерман А.Д.** Чугун: справ. изд. / А.Д. Шерман; под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Metallurgy. 1991. – 576 с.
12. **Уббеллоде А.Р.** Расплавленное состояние вещества: [пер. с англ.] / А.Р. Уббеллоде. – М.: Metallurgy, 1982. – 376 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2013*

**A.G. Panov**

## **FeSiMg-MODIFIER MICROSTRUCTURE INFLUENCE ON DUCTILE IRON CRYSTALLIZATION AND MICROSTRUCTURE**

INEKA, Naberezhnye Chelny

The work is devoted to solving the problem of modification instability during manufacture of ductile iron castings.

Laboratory tests revealed that FeSi50Mg5-ligature microstructure refinement leads to an overall spheroidizing effect increase and graphitizing effect decrease. This result is essential to develop an effective process for making castings.

According to the theory of molten matter state was propounded the interaction mechanism of the modifier with a cast iron melt, explaining the results. FeSi and - FeSi<sub>2</sub> phases of the modifier interact with clusters of iron melt which have a short-range order of cementite. As a result carbon-depleted Fe-C-Si structures are formed which are pre-nucleuses and nucleuses for ferrite and austenite upon cooling the melt later. Therefore, in cast irons which are processed with macrocrystalline modifiers, primary crystallization of graphite, austenite and ferrite actively occurs, and in cast irons which are processed with fine-crystalline modifiers, primary crystallization of graphite, ferrite and austenite is suppressed, and cementite with ledebourite crystallize mainly. Mg<sub>2</sub>Si-phases of the modifiers are involved in the formation of disordered regions melt iron. Sizes of these phases affect the removal intensity of magnesium and non-metallic inclusions from the melt, which in turn affects the quantitative characteristics and morphology of graphite.

*Key words:* casting, ductile iron, modifier, microstructure, stability, influence mechanism.

УДК 620.179.16

А.А. Хлыбов<sup>1</sup>, А.Л. Углов<sup>2</sup>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ОБРАЗЦОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ РАДИАЦИОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>.  
Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем. г. Н. Новгород<sup>2</sup>

Представлены результаты исследования акустическими методами контроля сталей 15Х2МФА, 15Х2МНФА, подвергаемых радиационному облучению. По результатам испытаний установлены корреляционные связи механических характеристик материала с акустическими. Показано, что упругие волны могут быть использованы в задачах оценки текущего состояния материала корпуса реактора.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, упругие волны, диагностический параметр.

**Введение**

Корпус реактора является одним из наиболее важных узлов ядерной энергетической установки, разрушение или частичное повреждение которого несовместимо с эксплуатацией всей ядерной установки. Ресурс корпуса фактически определяет предельный срок эксплуатации АЭС. В настоящее время стоит вопрос о продлении срока эксплуатации до 60 лет. Корпус реактора (ВВЭР-440) изготовлен из низколегированной конструкционной стали (сталь 15Х2МФА). Для ВВЭР-1000 в качестве конструкционного материала используется сталь 15Х2МНФА).

На корпус ВВЭР в процессе эксплуатации воздействуют температура и поток нейтронов. Наибольшую опасность для материала корпуса оказывает поток нейтронов. При эксплуатационной температуре 350°C и интенсивности потока нейтронов  $\Phi > 10^{17}$  нейтрон/см<sup>2</sup> с энергией больше 0.5 МэВ наблюдается низкотемпературное радиационное охрупчивание [1, 2]: повышаются прочностные характеристики, предел прочности, текучести. Но при этом существенно ухудшаются их пластические свойства, в частности, снижается относительное удлинение, поперечное сужение, ударная вязкость. Ухудшаются характеристики сопротивления хрупкому разрушению: критическая температура хрупкости, вязкость разрушения. Температура хрупко-вязкого перехода смещается в область положительных температур. Радиационная хрупкость ограничивает эксплуатационный ресурс большинства конструкционных сплавов, используемых в ядерной энергетике. Значительную опасность при этом представляет сильно возрастающая с ростом дозы облучения чувствительность сплавов к ударным нагрузкам и наличию концентраторов напряжений.

Для оценки состояния, определения механических характеристик материала корпуса реактора, находящегося в эксплуатации, используют образцы-свидетели, установленные в активной зоне реактора. Также вырезают образцы-темплеты непосредственно из материала корпуса без ухудшения прочностных характеристик (для первых реакторов система образцов-свидетелей не была предусмотрена). Такой подход требует значительных затрат, полученные данные не всегда достоверно отражают реальное состояние материала корпуса, так как информация ограничена.

В настоящее время надежного и оперативного средства контроля не существует, поэтому получение достоверной информации, применение ее для оценки текущего состояния материала и возможность прогнозирования поведения конструкции на ближайший период эксплуатации является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является: исследование влияния радиационного облучения



на физико-механические характеристики корпусной стали, обоснование применения средств диагностики для определения стадий и количественной оценки поврежденности конструкционных материалов.

### Теоретическая часть

В проблеме мониторинга технического состояния объекта зачастую возникает вопрос выбора физического метода контроля. В силу близости природы и взаимосвязи упругих характеристик металла и упругих волн акустические методы контроля весьма эффективны, и в большинстве случаев следует отдавать предпочтение именно им. Акустические методы позволяют получить информацию как о макродефектах, так и процессах, протекающих на микроуровне. С их помощью можно решать задачи, связанные с оценкой физико-механических характеристик ответственных технических объектов [3]. Упругие волны характеризуются такими параметрами, как скорость распространения, затухание. Скорость ультразвуковой волны  $C$  (м/с) при прохождении через исследуемый образец определяется по формуле

$$C = L/T,$$

где  $L$  – толщина образца, м;  $T$  – время распространения упругих волн в контролируемом образце, с.

Используя известные из теории упругости соотношения, запишем выражения для упругих модулей:

$$G = C_t^2 \rho,$$

$$E = C_l^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu);$$

$$\nu = (0.5 * C_l^2 - C_t^2) / (C_l^2 - C_t^2),$$

где  $G$  – модуль сдвига, МПа;  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_l$ ,  $C_t$  – скорости продольной и сдвиговых волн, соответственно, м/с.

### Объекты исследования и методика измерений

В работе исследовались образцы из сталей 15Х2МФА и 15Х2МФНА.

Химический состав стали 15Х2МФА: С 0,11-0,21, Si 0,17-0,37, Mn 0,30-0,60, S ≤ 0,020, P ≤ 0,020, Cr 2,0-3,0, Ni ≤ 0,40, Mo 0,60-0,80, V 0,25-0,35, Cu ≤ 0,30.

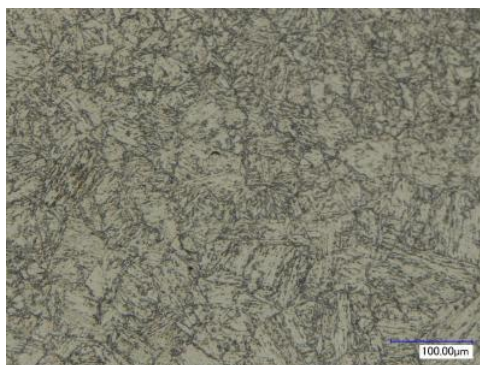
Химический состав стали 15Х2МФНА: С 0,13 - 0,16, Si 0,17 - 0,37, Mn 0,30 - 0,60, Cr 1,8 - 2,3, Ni 1,0 - 1,5, Mo 0,5 - 0,7, Cu ≤ 0,08, S ≤ 0,012, P ≤ 0,010, V 0,10 - 0,12.

В практике отечественного реакторостроения сталь типа 15Х2МФА используется в улучшенном состоянии, т. е. после закалки при 990–1000°C и высокого отпуска при 690-710°C (10 ч воздух). Микроструктура стали 15Х2МФА сорбит (рис. 1). Оценка величины зерна осуществлялась с помощью программы Spectr MET, использующей ГОСТ 5639-82. Метод основан на замере линейных размеров отрезков—хорд, отсекаемых в зернах прямыми линиями, и применяется для определения величины зерна в разнотернистой структуре. Результаты измерения размера зерна после закалки и высокого отпуска представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты измерения балла зерна

Балл	Размеры, мм	Количество, %
14	0.0017 - 0.0025	10,63
13	0.0025 - 0.0036	8,39
12	0.0036 - 0.0052	19,84
11	0.0052 - 0.0076	17,02
10	0.0076 - 0.0110	13,74
9	0.0110 - 0.0160	9,41



**Рис. 1. Микроструктура стали 15X2МФА, закалка 1000°С, высокий отпуск 700°С, воздух (10 ч), x500**

В качестве измеряемых акустических характеристик использовались время распространения импульсов (задержка) объемных: продольные и сдвиговые (поляризация вдоль и поперек образца) волны [4, 5, 6] и волны Рэлея (поверхностные волны, толщина контролируемого поверхностного слоя порядка 1 мм). Измерения проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН». Измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» реализует акустический метод отраженного излучения (эхо-метод) и предназначен для генерации зондирующих сигналов, регистрации и обработки параметров отраженных упругих волн. Вся обработка информации, поступающей с датчиков, проводится автоматически в процессорном блоке. Система позволяет хранить всю исходную информацию, необходимую для использования в практических задачах контроля.

Погрешность измерения времени распространения отраженных импульсов при работе с преобразователем на резонансной частоте не более  $1 \times 10^{-9}$  с и погрешность измерения коэффициента затухания не более  $\pm 4\%$ . ИВК позволяет провести любое количество измерений, после чего определяется среднее значение в точке измерения. Частотный диапазон – до 30 МГц. Время проведения замера и получения необходимой информации фактически определяется результатами подготовки поверхности образца (конструкции) к контролю. Можно работать как с одним датчиком, работающим на излучение и прием, так и с двумя – излучение и прием осуществляется разными датчиками.

В работе использовались пьезокерамические преобразователи, контактирующие непосредственно с контролируемым образцом. Акустический контакт между датчиком продольной волны и контролируемой средой осуществляется через слой вязкой жидкости. Для ввода и приема сдвиговых волн использовался вязкий материал, свойства которого близки к эпоксидной смоле. В одной точке проводилось не менее пяти измерений. Эти данные усреднялись, и определялось среднее значение задержки для каждого из типов используемых упругих волн.

### **Исследование радиационного охрупчивания**

Акустические измерения проводились на образцах-свидетелях типа Шарпи (размеры  $10 \times 10 \times 55$  мм), образцах темплетов мини Шарпи (размеры  $5 \times 5 \times 27,5$  мм) из стали основного металла и металла сварного шва. Механические испытания проводили согласно требованиям соответствующих ГОСТов. Акустические измерения проводили на образцах, используемых для механических испытаний. Повреждающие дозы облучения и механические свойства испытанных образцов приведены в табл. 2 и 3.

В работе были исследованы темплеты (мини Шарпи, размеры  $5 \times 5 \times 27,5$  мм), вырезанные из металла сварного шва корпусов следующих реакторов:

- Кольская АЭС: 1, 2-й блоки;
- Нововоронежская АЭС: 3, 4-й блоки;

- Хмельницкая АЭС: 1-й блок (разный уровень облучения).

Химический состав материала сварного шва показан на примере материала Кольской АЭС и образцов – свидетелей (табл. 2). В табл. 3 представлены результаты испытаний образцов из темплетов сварного шва № 4 корпусов реакторов блоков 1 и 2 Кольской АЭС на статическое растяжение при комнатной температуре ( $+23\pm 5^\circ\text{C}$ ) после дооблучения в каналах для образцов-свидетелей блока 1 Ровенской АЭС в течение трех топливных циклов.

Таблица 2

## Химический состав металла сварных швов активной зоны корпусов

АЭС	Содержание, % (вес)									
	P	Cu	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	V
Кольская, блок 1	0.034	0.14	0.05	0.42	1.04	0.015	1.39	0.48	0.15	0.15
Кольская, блок 2	0.039	0.18	0.06	0.36	0.97	0.023	1.53	0.50	0.22	0.15
Хмельницкая, блок 1	0.008	0.07	0.155	0.23	0.42	0.009	1.82	0.51	1.00	0.11

Таблица 3

## Механические характеристики темплетов, вырезанных из металла сварного шва

Кольская АЭС	Индекс образца	Флюенс нейтронов, см <sup>-2</sup>	Механические свойства	
			Rp0.2, МПа	Rm, МПа
Блок 1	159	2,73x10 <sup>19</sup>	636	754
	178	2,41x10 <sup>19</sup>	716	786
Блок 2	278	2,28x10 <sup>19</sup>	663	760
	279	2,25x10 <sup>19</sup>	671	755

Опасным последствием реакторного облучения применительно к материалам корпусов является радиационное охрупчивание, которое приводит к смещению критической температуры хрупкости в области более высоких температур, ограничивает безопасную область температур эксплуатации корпуса реактора и уменьшает работу разрушения в вязкой зоне температурной зависимости ударной вязкости. Температура хрупкости является одним из основных показателей безопасной эксплуатации реактора.

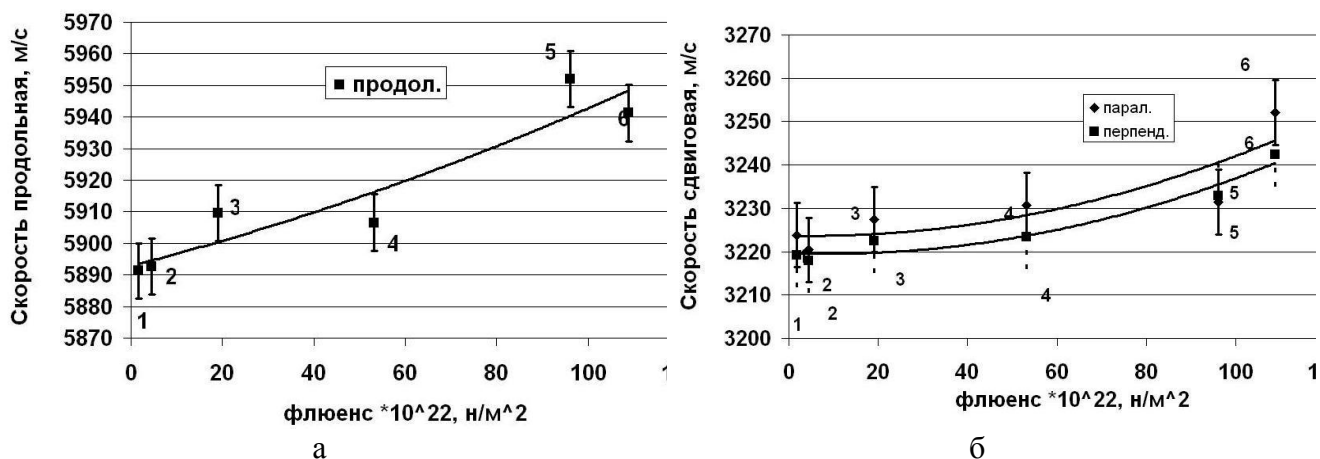
Результаты испытаний малоразмерных (5×5×27.5 мм) образцов из сварного шва корпусов реакторов Кольской АЭС (блоки 1, 2), Нововоронежской АЭС (блоки 3, 4) и Хмельницкой АЭС (блок 1, разный уровень облучения) по определению критической температуры перехода от вязкого разрушения к хрупкому приведены в табл. 4.

Таблица 4

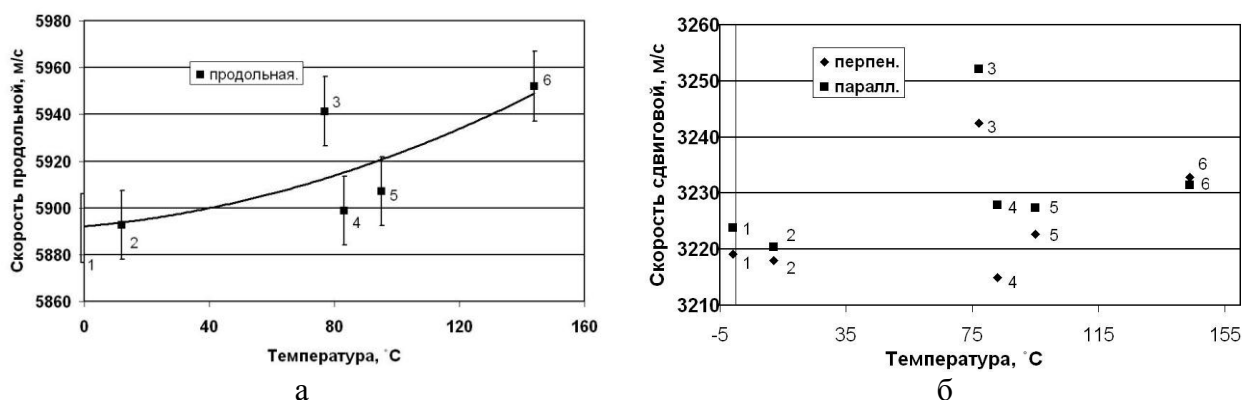
Значения критической температуры ( $TR_{5\times 5}$ ) хрупкости для малоразмерных (5×5×27.5 мм) образцов

АЭС	Суммарный флюенс, *10 <sup>22</sup> м <sup>-2</sup>	Tk <sub>5×5</sub> , °C (российский стандарт)
Хмельницкая, блок 1	1,694	-1
Хмельницкая, блок 1	4,4775	12
Кольская, блок 1	38.1	83
Кольская, блок 2	30.8	95
Нововоронежская, блок 3	96.1	144
Нововоронежская, блок 4	108.8	77

Параллельно с проведением механических характеристик исследовалось поведение скорости упругих волн. Зависимость средних значений скоростей продольных и сдвиговых волн от величины флюенса представлена на рис. 2. Зависимость средних значений скоростей продольных и сдвиговых волн от критической температуры хрупкости для исследуемых энергоблоков представлена на рис. 3. Усреднение проводилось по всем исследуемым образцам для каждого блока.



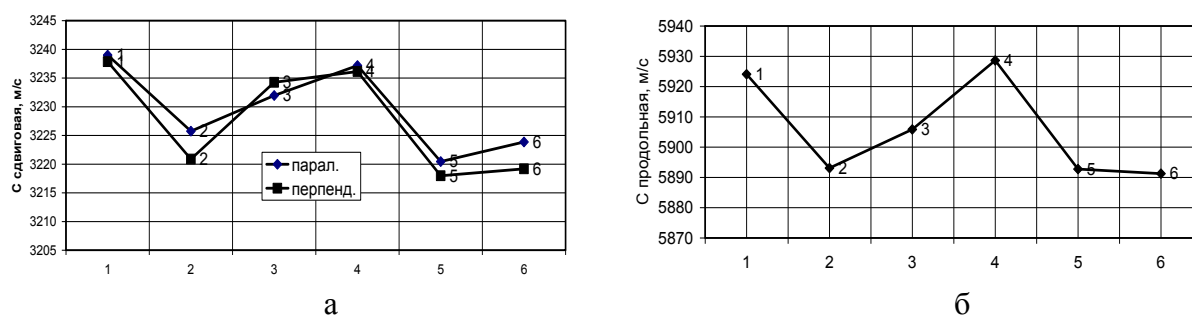
**Рис. 2. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от флюенса:**  
1, 2 – Хмельницкая АЭС (блок 1, выгрузка 3); 3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2);  
5, 6 – Нововоронежская АЭС (блоки 3 и 4)



**Рис. 3. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от критической температуры хрупкости:**  
1, 2 – Хмельницкая АЭС (блок 1, выгрузка 3); 3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2);  
5, 6 – Нововоронежская АЭС (блоки 3 и 4)

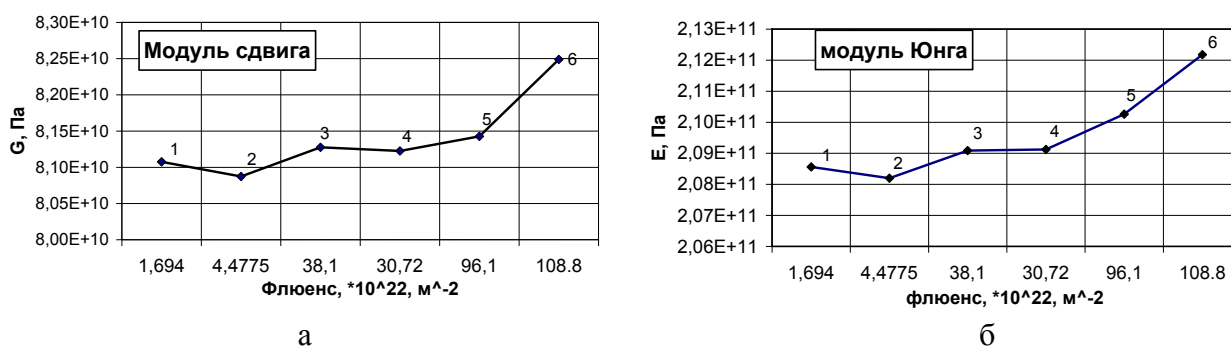
На рис. 3 представлены результаты акустических измерений (скорость продольных и скорость сдвиговых волн) на образцах-свидетелях (образцы типа Шарпи 10x10x55 мм) корпуса реактора Хмельницкой АЭС, блок 1. Точки № 1–4 получены на образцах в состоянии поставки (облучение отсутствует), 5, 6 получены на образцах-свидетелях после облучения (по четырем образцам для каждой точки). Для образцов в состоянии поставки измерения проводились по десяти образцам, затем данные усреднялись. Полученные данные показывают, что материал сварного шва (точка 2) и основного металла (точки 1, 4) отличаются по акустическим характеристикам: скорость упругих волн для основного металла выше, чем для шва. Образцы под номером 1 – это образцы в состоянии поставки, находятся на длительном хранении. Образцы под номером 4 были испытаны для определения механических характери-

стик, после чего были проведены акустические измерения. Различия скоростей для сварного шва и основного металла необходимо учитывать при создании алгоритма и методики контроля материала реактора. Материал из зоны термического влияния занимает промежуточное положение. Следует также отметить, что скорости упругих волн как продольных, так и сдвиговых для металла сварного шва в состоянии поставки (точка 2), и облучения (точки 5, 6) практически совпадают при изменении химического состава в указанных выше пределах. Небольшие изменения скорости упругих волн от флюенса нейтронов можно объяснить низким уровнем облучения. При радиационном облучении меняются упругие характеристики материала (рис. 5). Акустический метод позволяет определить упругие характеристики материала в реальном времени, без использования специальных образцов и нагружающих устройств.



**Рис. 4. Зависимость скорости сдвиговой (а), продольной (б) волн от материала образцов для Хмельницкой АЭС, блок 1:**

1 – поставка (ОМ), 2 – поставка (СШ), 3 – поставка (ЗТВ), 4 – поставка (ОМ),  
5 – облучение  $1,69 \cdot 10^{22}$  (СШ), 6 – облучение  $4,48 \cdot 10^{22}$  (СШ)

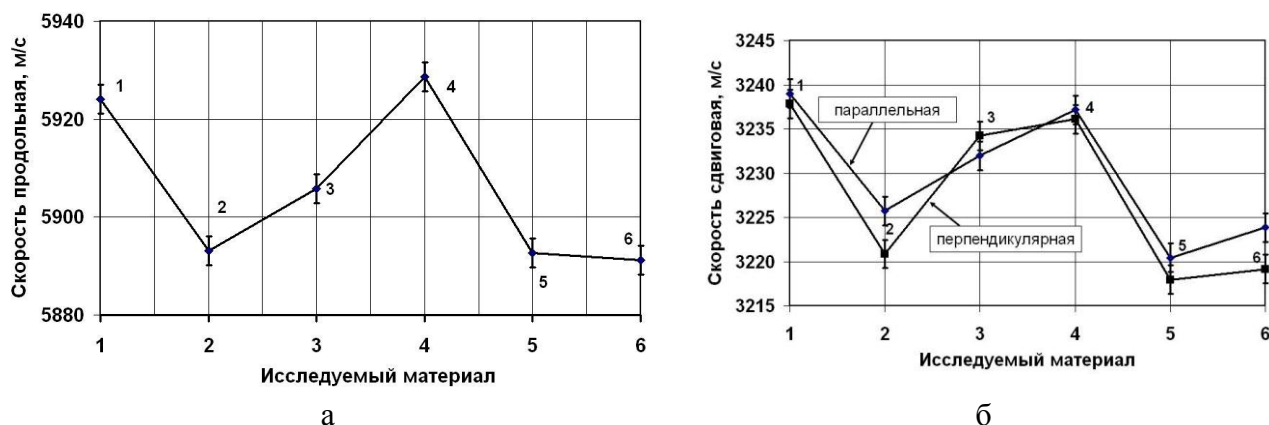


**Рис. 5. Влияние флюенса нейтронов на упругие характеристики:**

а – модуль сдвига; б – модуль Юнга; 1, 2 – Хмельницкая (блок 1, выгрузка 3);  
3, 4 – Кольская АЭС (блоки 1 и 2); 5, 6 – Новovorонежская АЭС (блоки 3 и 4)

Были проведены исследования влияния места вырезки образцов: основной металл, зона термического влияния, сварной шов на параметры упругих волн. Полученные данные показывают, что материал сварного шва и основного металла отличаются по акустическим характеристикам: скорость упругих волн для основного металла выше, чем для шва (рис. 6). Эти различия необходимо учитывать при создании алгоритма и методики контроля материала реактора. Материал из зоны термического влияния занимает промежуточное положение. Следует также отметить, что скорости упругих волн как продольных, так и сдвиговых для металла сварного шва в состоянии поставки (точка 2) и облучения (точки 5, 6) практически

совпадают при изменении химического состава в указанных пределах. Небольшие изменения скорости упругих волн от флюенса нейтронов можно объяснить низким уровнем облучения.



**Рис. 6. Зависимость скорости продольной (а), сдвиговой (б) волн от материала образцов для Хмельницкой АЭС, блок 1:**

1 – поставка (ОМ); 2 – поставка (СШ); 3 – поставка (ЗТВ); 4 – поставка (ОМ);  
5 – облучение  $1,69 \cdot 10^{22}$  (СШ); 6 – облучение  $4,48 \cdot 10^{22}$  (СШ)

### Оценка трещиностойкости металла элементов ядерного реактора

Исследования проводились на двух темплатах, вырезанных из обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР -1000, изготовленной из основной дуговой стали на Краматорском заводе «Энергомашспецсталь». Термообработка обечайки, из которой были вырезаны исследованные темплаты, была проведена по штатной технологии. Для решения методических вопросов, связанных с испытанием облученных образцов, предлагается использовать образцы, изготовленные из искусственно охрупченного металла. В качестве способа искусственного охрупчивания стали марки 15Х2НМФА-А применена специальная термическая обработка. Режим охрупчивающей термообработки определялся следующим образом:

- закалка: нагрев со скоростью не более  $100^\circ\text{C}/\text{ч}$  до температуры  $920 \pm 10^\circ\text{C}$ ; выдержка 6 ч; охлаждение в воде до температуры на поверхности темплата не выше  $100^\circ\text{C}$  (температура воды не выше  $60^\circ\text{C}$ );
- отпуск: нагрев со скоростью не более  $100^\circ\text{C}$  до температуры  $600 \pm 10^\circ\text{C}$ ; выдержка 10 ч; охлаждение на воздухе.

Из темплетов были изготовлены образцы для испытания на растяжение, образцы для испытания на ударный изгиб и образцы для исследования трещиностойкости.

Определение статической трещиностойкости проводилось с использованием компактных образцов внецентренного растяжения (образцы типа 3 по ГОСТ 25.506) толщиной 25 мм. Предварительно на образцах были выращены усталостные трещины. Выращивание проводилось на сервогидравлической машине PSB - 100 производства фирмы ШЕНК АГ (ФРГ). Нагружение проводилось пульсирующей нагрузкой с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0.1$ . Максимальная нагрузка цикла на первом этапе выращивания трещины  $P_{\text{max1}} = 16$  кН. Суммарное число циклов нагружения для каждого образца составляло  $N > 100000$  циклов. Испытания на вязкость разрушения проводились на испытательной машине RMC-100 производства фирмы ШЕНК. В процессе нагружения регистрировались нагрузка и раскрытие берегов надреза образца. Начальная длина трещины (механический надрез + усталостная трещина) измерялась в пяти точках по фронту трещины.

Для оценки возможности контроля характеристик трещиностойкости металла элементов ВВР с помощью разработанной системы проводился эксперимент на образцах из корпус-

ной стали 15Х2НМФАА в двух состояниях: исходном (образцы 4 и 6) и в охрупченном (образцы 3 и 5). Исходному состоянию соответствует величина  $K_{IC} = 250 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; охрупченному -  $K_{IC} = 100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Для выявления акустических характеристик, чувствительных к величине вязкости разрушения, использовались все основные типы упругих волн: объемные продольные волны, объемные сдвиговые волны, релеевские волны. В табл. 5 приведены результаты измерения скоростей объемных волн, распространяющихся перпендикулярно поверхности образцов. Для поверхностных волн измерялось изменение времени распространения на фиксированной (постоянной) базе.

Таблица 5

## Влияние параметров трещиностойкости на параметры упругих волн

№ обр.	4	6	3	5
$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$	250	250	100	100
$C_t$ , м/с	3238	3248	3231	3232
$C_s$ , м/с	3242	3243	3233	3233
$C_L$ , м/с	5923	5924	5903	5904
$T_R$ , нс	1027	1011	1048	1044

Погрешность определения скорости звука, обеспечиваемая системой АСТРОН, не превышает 1 м/с, из чего следует, что различие в акустических параметрах образцов в двух состояниях является весьма значительным.

При разнице в характеристиках  $K_{IC}$ , составляющем 100 МПа $\sqrt{\text{м}}$ , разница в значениях продольных скоростей звука составляет порядка 20 м/с.

Погрешность определения задержки релеевского импульса составляла 3 нс, откуда следует возможность оценки величины  $K_{IC}$  с помощью данного вида измерений с погрешностью порядка 15 МПа $\sqrt{\text{м}}$ .

## Выводы

Приведенные результаты исследований показали, что упругие волны чувствительны к процессам, протекающим в материалах, подвергаемых радиационному облучению. Акустический метод может быть использован в качестве экспресс-метода для оценки необратимых изменений, протекающих в материале конструкции корпуса.

Исследования проведены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П 1097).

## Библиографический список

1. Штромбах, Я.И. Радиационный ресурс металла корпусов действующих ВВЭР / Я.И. Штромбах, Ю.А. Николаев, П.А. Платонов // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 6. С. 460–472.
2. Николаев, А.В. Радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-1000 / А.В. Николаев, Ю.А. Николаев, Ю.Р. Кеворкян // Атомная энергия. 2001. Т. 90. Вып. 5. С. 271–276.
3. Неразрушающий контроль: справочник; под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 3. – 864 с.
4. Васильев, В.Г. Акустический метод контроля состояния корпусов ВВЭР / В.Г. Васильев, А.Л. Углов, А.А. Хлыбов // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 1. С. 31–35.
5. Хлыбов, А.А. Определение физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 12. С. 46–49.

6. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно-программных средствах для ее реализации / Ф.М. Митенков [и др.] // Проблемы машиноведения и надежности машин. 1998. №3. С. 3–9.

*Дата поступления*

*в редакцию 31.01.2013*

**A.A. Khlybov<sup>1</sup>, A.L. Uglov<sup>2</sup>**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC Research centre control and diagnostic systems<sup>2</sup>

**DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTIC  
OF THE SAMPLE MATERIAL EXPOSED TO RADIATION**

The results of investigation by the acoustic inspection method of 15H2MFA, 15H2MNFA steel exposed to radiation. According to results of the investigation, the correlation between mechanical and acoustic properties of material has been established. It is shown elastic waves can be used in estimation problem of current state of vessel material of reactor.

*Key words:* nondestructive testing, elastic waves, diagnostic parameter.



УДК 621.73.019

В.С. Малов<sup>1</sup>, В.А. Васильев<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 14X17H2

ОАО «Завод «Красное Сормово»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Статья является обобщением результатов системы менеджмента качества продукции, проводимой на ОАО «Завод «Красное Сормово» по анализу типовых дефектов, образующихся при изготовлении поковок и штамповок из стали 14X17H2. Описывает наиболее характерные их виды и пути их устранения в условиях действующего производства.

*Ключевые слова:* микрошлиф, макрошлиф,  $\delta$ -феррит, дефект, сорбит, заготовка.

Сталь 14X17H2 (ЭИ268) по ГОСТ 5632-72 мартенситно-ферритного класса, коррозионностойкая, жаропрочная, применяется преимущественно как коррозионностойкая, обладает высокими прочностными и пластическими свойствами в сочетании с высокой ударной вязкостью.

Основным назначением её является изготовление рабочих лопаток, дисков, втулок и других крепёжных деталей, работающих в условиях пониженных температур. Наиболее широкое применение получила в химической, авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности.

В соответствии с ГОСТом 5632-72 сталь 14X17H2 имеет химический состав, представленный в табл. 1.

Таблица 1

## Химический состав стали 14X17H2

Содержание элементов, %						
C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
0,11-0,17	≤0,8	≤0,8	16,0-18,0	1,5-2,5	≤0,025	≤0,03

Температура критических точек  $A_{c1}=730-740^{\circ}\text{C}$  и  $A_{c3}=845^{\circ}\text{C}$ .

Сталь 14X17H2 является весьма сложной в технологическом отношении, особенно, при изготовлении поковок. Наличие в структуре данной стали больших количеств  $\delta$ -феррита оказывает вредное влияние на ход технологических процессов и качество поковок: ухудшает деформированность стали при ковке и резко снижает свойства пластичности (особенно ударной вязкости) при испытании поковок в тангенциальном или поперечном направлении, повышает анизотропность механических свойств.

Вследствие низкой прочности феррит, деформируясь, способен релаксировать часть напряжений, возникающих на различных этапах и операциях производства поковок, снижая тем самым величину остаточных внутренних напряжений. Поэтому при полном отсутствии в структуре стали ферритной составляющей осложняется изготовление поковок, особенно типа валов, из-за склонности их к образованию продольных (чаще всего осевых) трещин, возникающих вследствие больших фазовых напряжений при мартенситном превращении аустенита на операциях охлаждения.

При чисто мартенситной структуре наблюдается и более глубокое развитие осевых дефектов слитка интер- и транскристаллитных трещин, пористости и других несплошностей

металла. Таким образом, содержание  $\delta$ -феррита в структуре стали 14X17H2 является основным фактором, определяющим технологические свойства.

Для лучшей деформируемости стали 14X17H2 следует создавать более равномерную деформацию в объёме тела, исключая локализацию напряжений, обеспечивающую минимальное значение напряжений. С этой целью применяют малые единичные обжатия, частые подогревы деформируемой заготовки и др.

Изготовление поковок с заданными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью – основные задачи, поставленные перед УГМО ПСТ ОАО «Завод «Красное Сормово». Опыт изготовления поковок и штамповок из этой марки стали позволяет выявить основные дефекты, возникающие в процессековки или штамповки.

Дефекты в поковках возникают по причине:

- плохого качества заготовки;
- неправильного ее нагрева;
- неправильного режимаковки;
- неправильных приемовковки;
- неравномерного охлаждения заготовки послековки.

Качество исходного металла определяет и качество готовойковки; применяя дляковки металл плохого качества, нельзя получить хорошее изделие. Передковкой необходимо знать качество металла, поэтому он передковкой подвергается химическим и механическим испытаниям. Если после испытания металл не будет соответствовать заданным ТУ, предъявленным к данному изделию, он бракуется или используется для другого изделия, ТУ которого удовлетворяет.

Металл хорошего качества, соответствующий всем ТУ для данного изделия, может быть испорчен или вследствие неравномерного нагрева, или неправильного режимаковки, если (например,ковка оканчивается при слишком высокой или слишком низкой температуре), или неправильного применения приемов приковке.

При неравномерном охлаждении поковок в металле возникают внутренние напряжения, приводящие к короблению изделия и трещинам. При сильно окислительной атмосфере в печах наружные слои металла обезуглероживаются, механические свойства металла частично снижаются, и этот порок трудно устранить. В этом случае поковку из легированной стали целесообразнее использовать на менее ответственные изделия. Основные из перечисленных недостатков можно разделить на две основные группы:

- а) пороки неустранимые;
- б) пороки, вредное влияние которых можно ослабить или устранить совсем.

К неустранимым порокам относятся: глубокие трещины, рванины, раковины, пережог, обезуглероживание. Такие изделия бракуются. К устранимым порокам относятся мелкие трещины, перегрев металла, крупнозернистость структуры, возникающие в металле внутренние напряжения и коробление.

Выделим наиболее характерные и проследим причины их возникновения. Анализ дефектов заготовок, изготовленных на заводе в течение последних 20 лет, позволил выделить основные:

- ковочный крест;
- раскованное загрязнение;
- центральная пористость;
- заков.

**Методика исследования.** Для анализа дефектов выбирались наиболее часто встречающиесяковки деталей. Из деталей изготавливали поперечные макрошлифы, из которых вырезали и изготавливали микрошлифы, затем их подвергали глубокому травлению. Проводили исследование микрошлифа до и после травления. Микроструктуру изучали на металлографическом микроскопе МИМ-8М.

## Основные дефекты кованных заготовок

### Ковочный крест

Этот дефект представляет собой разрывы в осевой области поковки. Для исследований использовались заготовки деталей «Шток». Химический состав представлен в табл. 2. Данный дефект проиллюстрирован на photographs микрошлифов и макрошлифов поковки типа «Втулка» на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 2

Химический состав стали, %

№ плавков	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
1	0,16	0,59	0,54	0,014	0,020	17,11	2,13	0,12
2	0,14	0,64	0,39	0,024	0,011	17,47	2,15	0,12

Заготовки деталей проходили термическую обработку по режимам:

- закалка при температуре 1000 °С, выдержка в течение 2 ч, охлаждение в масле;
- отпуск при температуре 690 °С, выдержка в течение 8 ч, охлаждение на воздухе

Структура металла после проведения термической обработки : сорбит и δ-феррит, загрязнённость неметаллическими включениями балл 2 шкалы ОТ по ГОСТ 1770-78.

*Причина возникновения:* неправильное проведение пластической деформации – возникновение высоких обжатий по сечению при следующих друг за другом ударах по металлу, взятому с одного нагрева, т.е. когда скорость деформации больше скорости разупрочнения при деформации, что приводит к возникновению горячего наклёпа.



Рис. 1. Вид шлифа после травления, x100

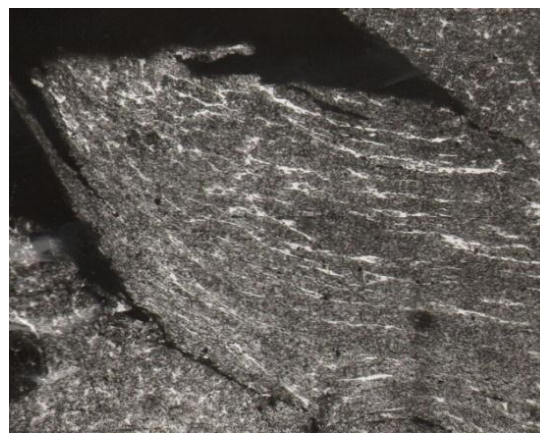


Рис. 2. Вид дефекта на макрошлифе, x100

### Центральная пористость

Представляет собой сетку, состоящую из большого количества пор, расположенных в центральной зоне, расходящуюся от центра к краям поковки.

Для исследований использовались заготовки детали «Ползун». Химический состав детали представлен в табл. 3. Данный дефект проиллюстрирован на photographs микрошлифов на рис. 3 и рис. 4.

Таблица 3

Химический состав стали, %

№ плавков	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
3	0,14	0,49	0,16	0,028	0,008	17,33	2,17	0,11

Заготовка детали проходила термическую обработку по режимам:

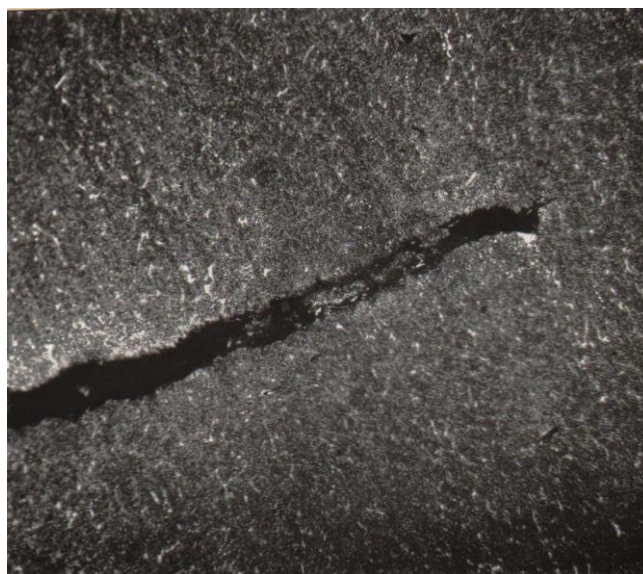
- закалка при температуре 980°C, выдержка в течение 3 ч, охлаждение в масле;
- отпуск при температуре 660°C, выдержка в течение 8 ч, охлаждение на воздухе.

Структура металла после проведения термической обработки сорбит, загрязнённость неметаллическими включениями балл 4 шкалы ОТ по ГОСТ 1770-78.

*Причина возникновения:* образовалась при протяжке слитка под действием растягивающих напряжений, обусловленных жесткой схемой деформации и высокой суммарной степенью укова.



**Рис. 3.** Микроструктура нетравленого шлифа в районе трещины, x100



**Рис. 4.** Микроструктура травленого шлифа, x100

### **Раскованное загрязнение**

Представляет собой извилистую линию, расположенную перпендикулярно к направлению вытяжки и имеющую небольшую глубину залегания. Проявляется в месте резкого изменения поперечного сечения.

Для исследований использовалась заготовка детали «Шток». Химический состав заготовки детали представлен в табл. 4. Данный дефект проиллюстрирован на фотографии дефекта и микрошлифа на рис. 5 и рис. 6.



Рис. 5. Внешний вид дефекта, 1:1



Рис. 6. Внешний вид дефекта на микрошлифе, x70

Таблица 4

## Химический состав стали, %

№ плавков	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
4	0,144	0,54	0,45	0,022	0,001	16,15	2,25	0,11

Заготовка детали проходила термическую обработку по режимам:

- закалка при температуре 990°C, выдержка в течение 2 ч, охлаждение в масле;
- отпуск при температуре 650°C, выдержка в течение 4 ч, охлаждение на воздухе;
- дополнительный отпуск при температуре 650°C, выдержка в течение 4 ч, охлаждение на воздухе.

Структура металла после проведения термической обработки: отпущенный мартенсит и  $\delta$ -феррит, загрязнённость неметаллическими включениями балл 2 шкалы ОТ по ГОСТ 1770-78

*Причина возникновения:* образовались в результате неправильной осадки или обжатия при ковке. Слишком большая деформация за единичное обжатие.

**Заков**

Дефект представляет собой складки металла, образующиеся обычно на особо опасных в отношении дефектов участках изделия типа бобышек, выступов, галтелей, резких переходов поперечного сечения и т.п.

Для исследований использовалась заготовка детали «Шток». Химический состав заготовки детали представлен в табл. 5.

Таблица 5

## Химический состав стали, %

№ плавков	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
5	0,16	0,58	0,60	0,014	0,024	17,46	2,10	0,24

Заготовка детали проходила термическую обработку по режимам:

- закалка при температуре 990°C, выдержка в течение 2 ч, охлаждение в масле;
- отпуск при температуре 660°C, выдержка в течение 3 ч, охлаждение на воздухе.

Структура после проведения термической обработки: сорбит+  $\delta$ -феррит.

Пороки на изделиях, изготовленные методом свободнойковки или штамповки, устраняются следующими способами:

- мелкие трещины и раковины вырубается пневматическими зубилами в холодном состоянии или специальными топорами в процессековки;
- поверхностные трещины устраняются и обезуглероженный слой снимается с ответственныхпоковок обдиркой на специальных станках;
- для улучшения механических свойств металла, с целью устранения внутренних напряжений в изделиях, последние подвергаются термической обработке — отжигу или нормализации.

**Выводы**

1. Приведены основные дефекты кованых заготовок, причины возникновения дефектов и способы их устранения. При назначении режима нагрева под ковку необходимо учитывать конкретный химический состав заготовки.



2. Разработаны режимы термической обработки поковок в зависимости от конкретного содержания основных элементов для данной марки стали: углерода, хрома и никеля с последующей отработкой времени выдержки в печи в зависимости от сечения слитка или заготовки.

#### Библиографический список

1. **Бородулин, Г.М.** Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Metallurgy, 1973. – 320 с.
2. **Ульянин, Е.А.** Коррозионные стали и сплавы: справочник / Е.А. Ульянин. – М.: Metallurgy, 1980. – 208 с.
3. **Паршин, А.М.** Структура, прочность и пластичность нержавеющей сталей и сплавов, применяемых в судостроении / А.М. Паршин. – Л.: Судостроение, 1972. – 288 с.
4. **Генерсон, И.Г.** Поковки из специальных сталей / И.Г. Генерсон. – М.: Metallurgy, 1971. – 204 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2013*

**V.S. Malov<sup>1</sup>, V.A. Vasilyev<sup>2</sup>**

#### RESEARCH OF DEFECTS OF FORGED BILLET FROM THE STEEL 14Cr17N2

Open Society «Shipbuilding yard «Krasnoe Sormovo»<sup>1</sup>,  
The Nizhniy Novgorod state technical university n.a. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** Studying of 14Cr17N2 steel defects arising upon pressure treatment during industrial stock materials manufacture in response to marine engineering.

**Reserch:** is based on quality control system studying of product manufactured of given steel grade at the shipyard within over 10 years period. Classification execution and the defects received summarizing.

**Findings:** The further modification conducting of technological processes in shipyard and in other companies yielding the analogue products. The given steel grade forged pieces and press forgings quality increase.

**Research limitations :** This research is a base point for the further study of pressure treatment influence and deformation of structure and mechanical properties of duplex steels.

**Novelty:** Perfection execution of manufacturing techniques, deep studying of arising defects of details microstructure.

*Key words:* microsection, macrosection,  $\delta$ -ferrite, defect, sorbite, billet.

УДК 621.74.002.64:669.13

Ю.А. Зиновьев<sup>1</sup>, И.О. Леушин<sup>1</sup>, А.М. Тимофеев<sup>2</sup>, В.Д. Швецов<sup>1</sup>, Г.И. Белявский<sup>1</sup>**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТРАНСПОРТА  
В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И СИБИРИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «ГАЗ»<sup>2</sup>

Рассмотрено воздействие комплексного модификатора и микродобавок бора на свойства отливок из высокопрочного чугуна, в частности, их влияние на значения ударной вязкости в области отрицательных рабочих температур. Установлено оптимальное количество вводимого бора, находящееся в пределах 0,005-0,007 %, которое позволило, используя гибкость и универсальность технической схемы внутриформенного модифицирования, решить проблему обеспечения необходимого уровня хладостойкости литых заготовок из высокопрочного чугуна.

*Ключевые слова:* хладостойкость, ударная вязкость, высокопрочный чугун, бор, микролегирование бором, внутриформенное модифицирование.

Явление хладноломкости, т.е. хрупкого разрушения, связанного с действием низких температур, впервые стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог во второй половине XX в. После замены пудлингового способа производства бессемеровским и мартеновским было отмечено, что рельсы, изготовленные из литейного металла, внезапно разрушались при понижении температуры. Уже тогда были признаны актуальность проблемы хладноломкости металлов, необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

В первой половине XX в. значительно возросло число крупных аварий железнодорожных мостов, морских судов, резервуаров для хранения нефти, магистральных газопроводов. Аварии обычно происходили в зимнее время года при совместном действии низкой температуры, ветра, штормовой погоды. Анализ разрушений показал, что в большинстве случаев они начинались в дефектных местах.

Особую актуальность проблема хладноломкости приобрела в связи с освоением Сибири и Крайнего Севера. Площадь территории страны, расположенная севернее изотермы января с температурой  $-20^{\circ}\text{C}$ , составляет около 52 % всей территории РФ. Такие районы, как Сибирь, Заполярье, Якутия, Дальний Восток характеризуются большими запасами полезных ископаемых и являются перспективными в промышленном отношении. Эффективность работы оборудования и транспорта в зимнее время в этих районах резко снижается. Анализ работы автохозяйств зоны с суровым климатом показал, что срок службы автомобилей в этой зоне по сравнению с Европейской частью РФ сокращается в два раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25 % парка машин. Поток отказов (по сравнению с летним периодом) деталей тракторов и бульдозеров увеличивается в зимнее время в 2-6 раз, деталей экскаваторов – в 5-7 раз. Особенно опасным является период пуска машин в работу после остановки. При низких температурах происходит разрушение сварных рам железнодорожных вагонов и ответственных литых деталей корпусов автосцепки. На промыслах Сибири частота отказов буровых установок зимой возрастает по сравнению с летним периодом более чем в два раза. При температурах ниже  $-35^{\circ}\text{C}$  во избежание крупных поломок приходится останавливать мощные экскаваторы, буровые установки, некоторые строительные машины, хотя регламентом работы северных горнодобывающих предприятий предусмотрена круглогодичная эксплуатация карьеров. Это приводит к резкому снижению производительности карьеров в зимнее время (до 15–20 %).



Как показывают результаты исследователей данной проблемы [1], приоритетной задачей в такой ситуации выступает обеспечение достаточного уровня ударной вязкости материала отливки. В настоящей статье представлено решение указанной проблемы применительно к литым заготовкам деталей запорной арматуры и изделий железнодорожного назначения из высокопрочного чугуна, изготавливаемым в массовом порядке на металлургическом производстве ОАО «ГАЗ» и предназначенным для эксплуатации в условиях Крайнего Севера при рабочих температурах до  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Известны различные способы повышения ударной вязкости, начиная от обработки жидкого расплава разными химическими элементами (Ti, Ba, Mo, Zr [2–4]) и заканчивая термической обработкой (например, отжиг – нагрев до  $760^{\circ}\text{C}$ , выдержка 6 ч, охлаждение с печью [5]).

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  $680\text{--}800^{\circ}\text{C}$ ) [6]. Достигаемая при этом ударная вязкость для высокопрочного чугуна составляет КСУ  $150\text{--}170\text{ кДж/м}^2$ , что, по данным работы [1], не является достаточной.

Авторам работы [7] удалось обойтись без термообработки и обеспечить ударную вязкость чугуна порядка  $310\text{--}350\text{ кДж/м}^2$  при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Однако при снижении температуры наблюдалось резкое падение (более чем в два раза) ударной вязкости до  $150$  и  $130\text{ кДж/м}^2$  при температуре  $-40$  и  $-60^{\circ}\text{C}$  соответственно.

В условиях металлургического производства ОАО «ГАЗ» основным технологическим процессам, 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  $-40^{\circ}\text{C}$ .

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 производственников как эффективный микролегирующий элемент. Так, в работах [8–10] 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: 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 % РЗМ, 0,8–1,2 % Са, 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 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 ГОСТ 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 [11], 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 [12].

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 % (это совпадает с данными работы [13]). 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 %, что соответствует рекомендациям работы [14].

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.

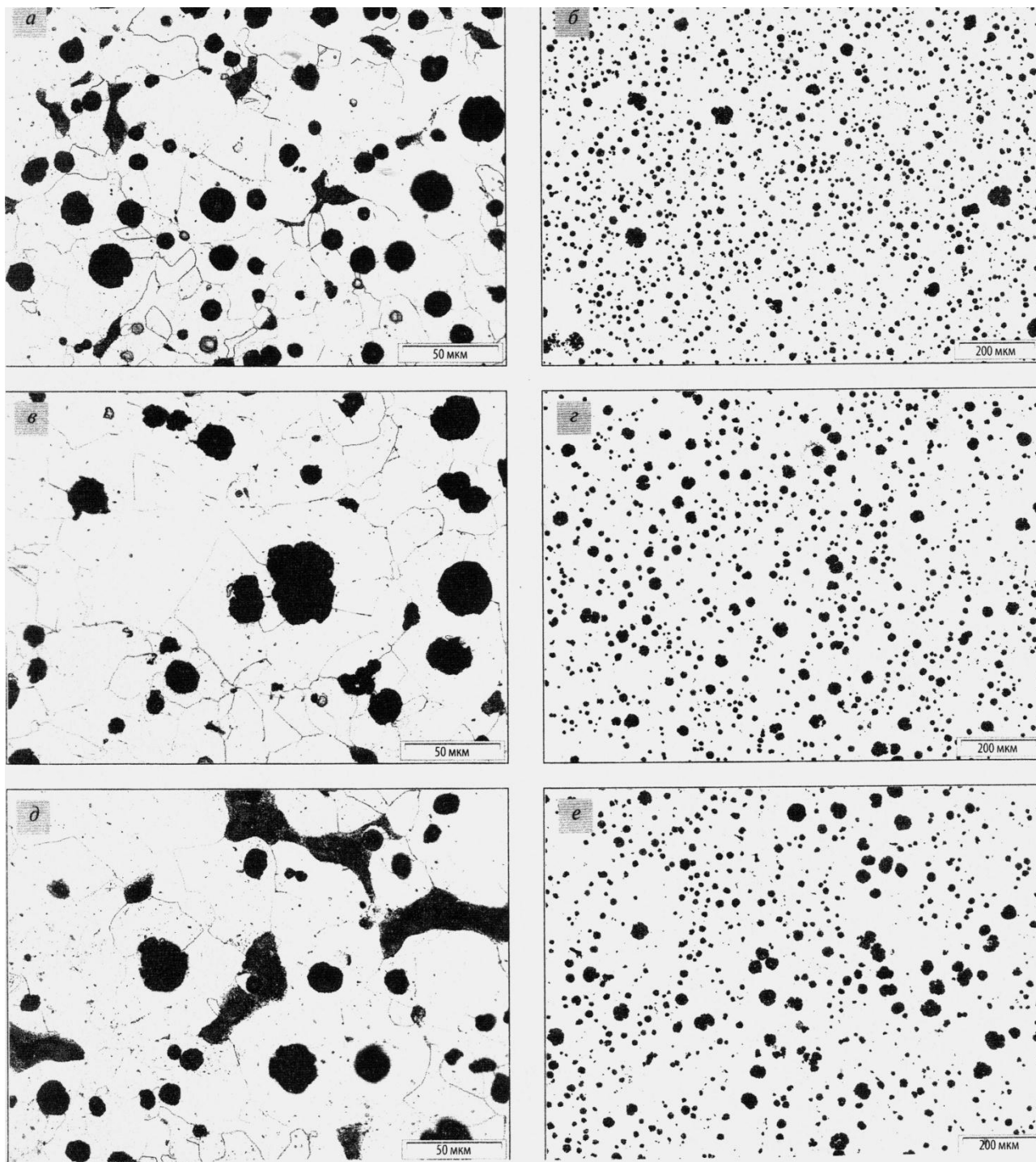
На рис. 1 представлены микроструктуры опытных отливок, полученных при изменении содержания добавок бора от 0,003 до 0,01 % (содержание комплексного модификатора фиксировалось на уровне 0,8-1,2 %).

Характеристики микроструктуры ВЧШГ в зависимости от содержания бора, согласно ГОСТ 3443-87, приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Микроструктура образцов

Содержание бора	Структура (согласно ГОСТу 3443-87)
≤ 0,003 %	ШГф4,5-ШГд15-45-ШГр1-ШГ10-Пт1-П6(Ф94)
0,005-0,007 %	ШГф4,5-ШГд15-45-ШГр1-ШГ10-Пт1-П0(Ф100)
≥ 0,01 %	ШГф4,5-ШГд15-45-ШГр1-ШГ10-Пт1-П20(Ф80)



**Рис. 1. Структура ВЧШГ при содержании бора  $\leq 0,003$  %:**  
*а* – металлическая основа (x500); *б* – графит (x100); **при содержании бора 0,005-0,0007 %:**  
*в* – металлическая основа (x500); *з* – графит (x100); **при содержании бора  $\geq 0,01$  %:**  
*д* – металлическая основа (x500), *е* – графит (x100)

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 % (рис. 1, *в*), при более высоком содержании бора количество феррита снижалось более, чем на 20 % (рис. 1, *д*).

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 (рис. 1, б и 1, з); при повышении содержания бора (> 0,01 %) количество крупных глобул графита увеличивается, однако распределение их носит неравномерный характер (рис. 1, е).

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 модификатора 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 +20 °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. **Шебастинов, М.П.** Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М.П. Шебастинов, Ю.Е. Абраменко, Н.И. Бех. – М.: Машиностроение, 1988. – 216 с.
2. 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.
3. Пат. 2267542 РФ: С22 С37 / 10. Чугун, 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.
4. 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.
5. Повышение хладостойкости высокопрочного чугуна / Н.Н. Александров [и др.] // Литейное производство. 1981. № 1. С. 4-5.
6. **Шерман, А.Д.** Чугун: справ. изд. / А.Д. Шерман, А.А. Жуков. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
7. **Яковлев, М.И.** Хладостойкий чугун с шаровидным графитом / М.И. Яковлев, Е.С. Петров, А.Д. Андреев // Литейное производство. 2001. № 3. С. 6-7.
8. **Аникеев, В.В.** О модифицировании стальных отливок // Литейное производство. 2010. № 4. С. 6-10.
9. **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.
10. **Лякишев, Н.П.** Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
11. **Гуляев, А.П.** Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
12. **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.
13. **Гиршович, Н.Г.** Справочник по чугунному литью / Н.Г. Гиршович. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.

14. Пат. 2138578 РФ: С22 С37 / 10. Чугун / В.И. Крестьянов, Е.А. Вестфальский, С.С. Бакума, Э.В. Степанцов; заявитель и патентообладатель ООО «Ассоциация металлургов и инвесторов». - № 98122904/02; заявл. 18.12.98; опубл. 20.02.03. Бюл. № 5.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2013*

**Yu.A. Zinoviev<sup>1</sup>, I.O. Leushin<sup>1</sup>, A.M. Tumofeev<sup>2</sup>, V.B. Shvetsov<sup>1</sup>, G.I. Beliavsky<sup>1</sup>**

**INCREASING THE EFFICIENCY OF TRANSPORTATION MEANS' OPERATION  
IN THE FAR NORTH AND SIBERIA**

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
GAZ Corporation, Nizhny Novgorod<sup>2</sup>

This paper addresses the impact of a complex inoculants – as well as boron (B) microadditions – on the quality of high-strength iron castings, particularly, their influence on the impact strength values in the area of negative working temperatures. Determined is the optimum amount of the boron (B) introduced, as lying within the range of 0,005-0,007 %; this allowed, while using the flexibility and versatility of the problem of assuring the required level of high-strength iron castings' cold resistance.

*Key words:* cold resistance, impact strength, high-strength iron, boron (B) microalloying, in-mold inoculation.

## ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.193.8

В.Р. Карташов<sup>1</sup>, М.В. Челнокова<sup>1</sup>, А.А. Калинина<sup>1</sup>,  
Т.Н. Соколова<sup>1</sup>, С.Ю. Радостин<sup>2</sup>, А.А. Москвичев<sup>2</sup>

### ГЕНЕРАЦИЯ $O_2^-$ МИКРООРГАНИЗМАМИ И ЕГО РОЛЬ В БИОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский филиал Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН<sup>2</sup>

Установлена способность микроорганизмов, в частности некоторых видов бактерий и микромицетов, вызывать коррозию цинка. Показана роль на начальной стадии процесса супероксидного анион-радикала  $O_2^-$ , выделяемого в окружающую среду микроорганизмами в процессе их жизнедеятельности.

*Ключевые слова:* супероксидный анион-радикал, бактериальная коррозия металлов, микромицетная коррозия металлов, активные формы кислорода, нитросиний тетразолий.

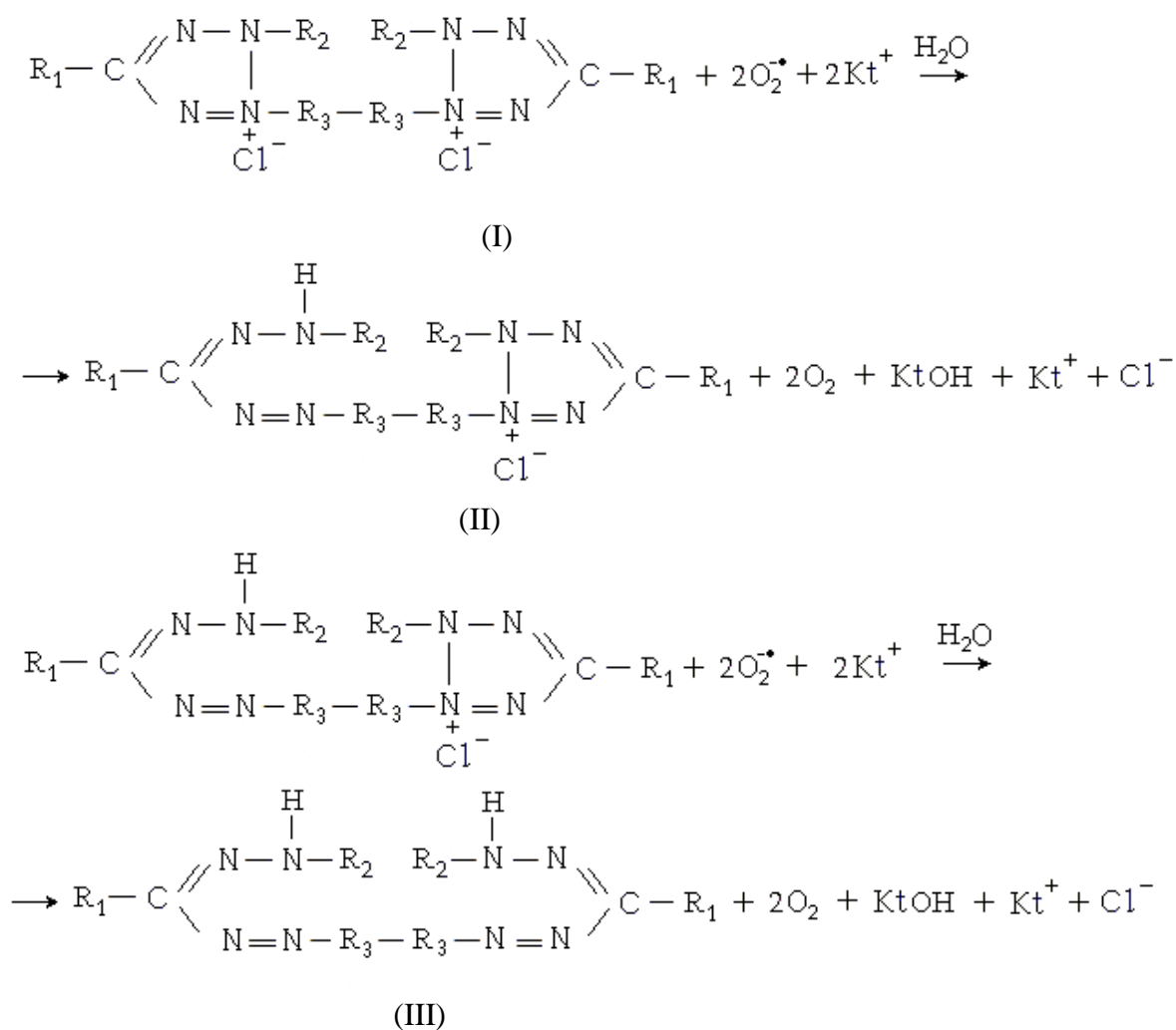
Исследование динамики коррозии ряда металлов при воздействии на них микроскопических грибов и бактерий-органотрофов позволило выявить нам ранее не описанные явления [1-5]. Наиболее важное из них состоит в том, что на начальном этапе, спустя 3 – 5 суток с начала экспозиции, на торцах металлов происходит накопление прозрачной жидкости (экссудата) с рН 8...11. Качественный микрохимический анализ экссудата [6] показал присутствие в нем ионов  $Na^+$  и  $K^+$  (вероятно, как противоионов  $OH^-$ ), которыми микроорганизмы обмениваются с внешней средой, а также  $H_2O_2$  [7]. На основании этих данных нами было сделано предположение, что отмеченные особенности могут быть обусловлены участием в коррозионном процессе супероксидного анион-радикала  $O_2^-$ , образующегося при жизнедеятельности микроорганизмов. Хотя образование  $O_2^-$  характерно для всех форм жизни [8], его роль в биокоррозии металлов ранее не обсуждалась.

В настоящей работе приводятся данные, которые показывают, что  $O_2^-$ , генерируемый микромицетами и бактериями, способен переходить в окружающую среду и принимать участие в реакциях на поверхности металла.

Для регистрации внеклеточного  $O_2^-$  использовали нитросиний тетразолий ( $HCT^{2+}$ ), который широко применяется для этих целей в разнообразных химических и биохимических исследованиях, образуя при этом моно- и диформааны, характеризующиеся максимумами поглощения при 530 и 560 нм соответственно (схема 1) [9].

На семисуточный газон микроскопических грибов наносили в виде нерастекающейся капли 0,01 М водный раствор  $HCT^{2+}$  в количестве 0,5 мл и оставляли в оптимальных условиях роста микромицетов. Через некоторое время в месте контакта раствора  $HCT^{2+}$  с мицелием наблюдали появление синей окраски, вызванное осаждением на поверхность плохо растворимых в воде моно- и диформаанов. Продукты восстановления  $HCT^{2+}$  экстрагировали хлороформом, после чего анализировали спектрофотометрическим методом (рис. 1). В качестве контроля использовали раствор  $HCT^{2+}$  с добавлением супероксиддисмутазы (СОД, 15 ед. акт.), которая очень быстро ( $1,9 \times 10^9 M^{-1}c^{-1}$ ) с абсолютной специфичностью разлагает  $O_2^-$  до  $H_2O_2$  и  $O_2$  [10].

Схема 1



где  $\text{R}_1 = \text{C}_6\text{H}_5$ ;  $\text{R}_2 = p\text{-NO}_2\text{C}_6\text{H}_4$ ;  $\text{R}_3 = m\text{-CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4$ ,  $\text{Kt}^+$ —противоионы.

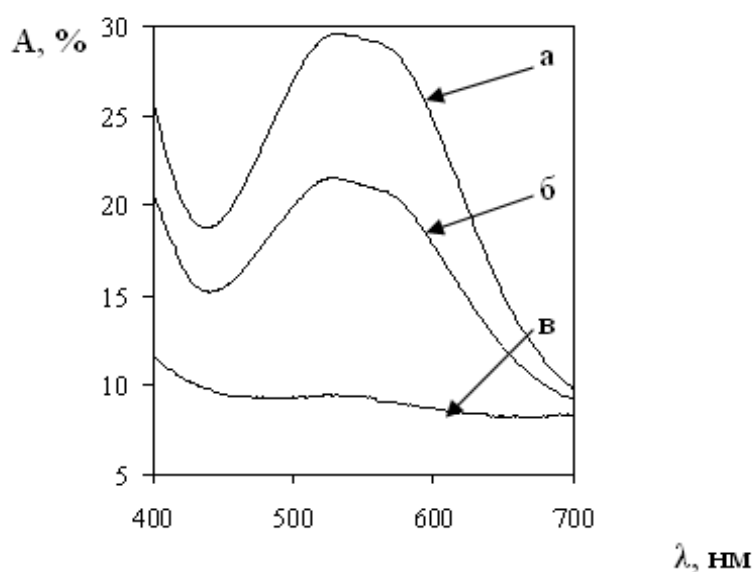
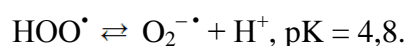


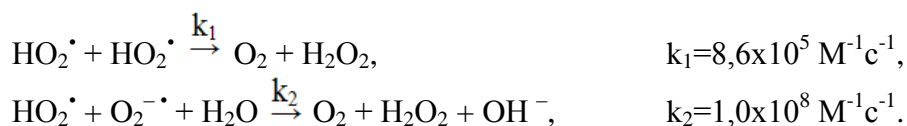
Рис. 1. Спектры поглощения продуктов восстановления  $\text{NCT}^{2+}$ , десорбированных с поверхности мицелия микромицетов после трех сут. экспозиции: а – *Alt. alternata*; б – *P. ochro-chloron*; в – *Alt. alternata* с СОД через 6 ч

Возможность генерации  $O_2^-$  бактериями исследовалась при использовании их суспензии с количеством 930 млн клеток *Escherichia coli* 321-5 и 2200 млн клеток *Pseudomonas aeruginosa* 969 в 1 мл. К 2 мл бактериальной суспензии добавляли 0,5 мл 0,01 М НСТ<sup>2+</sup>, в контрольном опыте сначала добавляли 0,15 мл СОД (15 ед. акт.), а затем НСТ<sup>2+</sup>. После 15-минутной инкубации в опытах с НСТ<sup>2+</sup> наблюдали появление синей окраски разной интенсивности. В контрольных опытах водная суспензия бактерий не окрашивалась. Полученные данные показывают, что  $O_2^-$ , образующийся при жизнедеятельности микроорганизмов, через транспортные каналы [11] может переходить во внеклеточную среду.

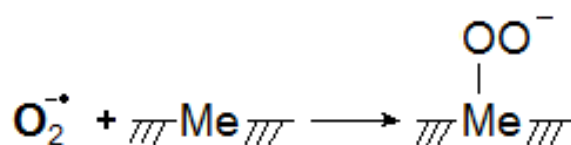
В настоящее время установлено, что супероксидный анион-радикал является основанием Бренстеда, которое находится в равновесии с гидропероксидным радикалом – сопряженной ему кислотой [12]:



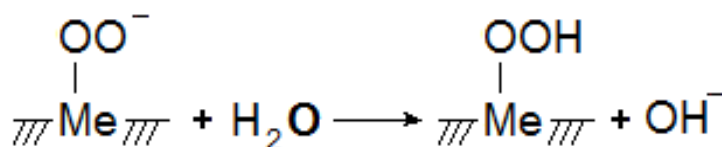
Гидропероксидный радикал и  $O_2^{-\bullet}$  быстро превращаются в  $H_2O_2$  и  $OH^-$  в результате двух параллельно протекающих реакций [13]:



На отдельных участках поверхности металла, покрытой оксидной пленкой, могут адсорбироваться ионы  $OH^-$  с противоионами и  $H_2O_2$ . С участием воды, извлекаемой из питательной среды, на этих участках постепенно формируется эксудат с основными свойствами (рис. 2, а, б). При накоплении значительного количества  $OH^-$  происходит разрушение оксидной пленки. В условиях высокого рН, в соответствии с константой кислотности  $HO_2^{\bullet}$ , главным реагентом становится  $O_2^{-\bullet}$ , который, после разрушения оксидной пленки, способен непосредственно хемосорбироваться на поверхности металла. При взаимодействии с водой соединение (I) переходит в поверхностный продукт (II):



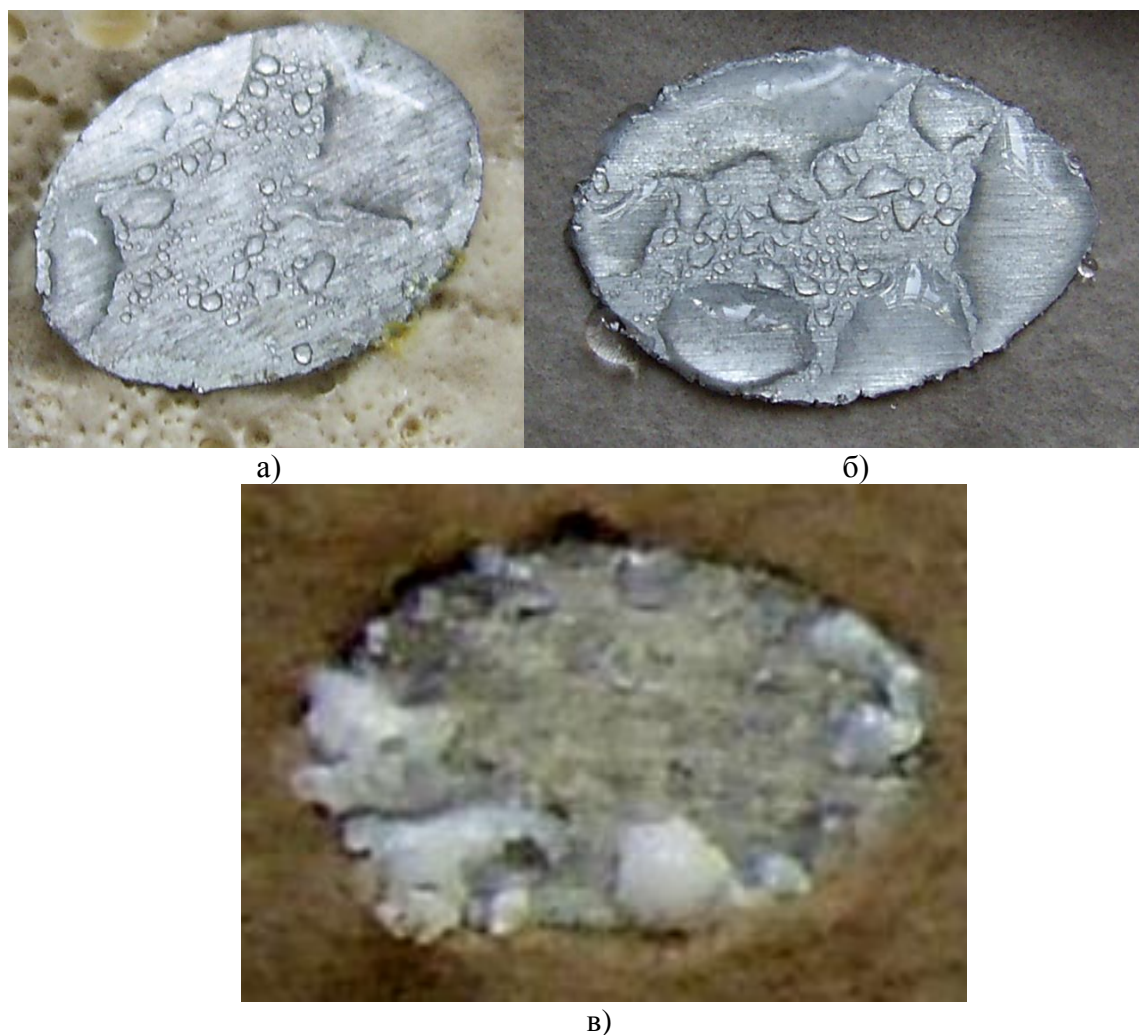
(I)



(II)

На этой стадии продолжается накопление эксудата, а рН достигает своего максимального значения. Поверхностное соединение (II) в силу его окислительных свойств со временем превращается в конечные продукты коррозии (оксиды, гидроксиды металлов). На долю последних приходится 50 – 80% от общего количества субстанции, собранной с поверхности металлов (рис. 2, в).





**Рис. 2. Внешний вид поверхности цинка:**

*a* – при воздействии *P. ochro-chloron* на 5-е сутки экспозиции; *б* – при воздействии *Alt. alternata* на 1-е сутки экспозиции; *в* – при воздействием *Alt. alternata* на 60-е сутки экспозиции

Если инициировании биокоррозии действительно происходит при участии  $O_2^-$ , должна наблюдаться определенная связь между свойством микроорганизмов секретировать  $O_2^-$  и степенью коррозионного разрушения. Возможная корреляция такого рода исследовалась нами на примере коррозии цинка под воздействием микромицетов *Alt. alternata* и *P. ochro-chloron*. Из рис. 1 видно, что свойства *Alt. alternata* транспортировать  $O_2^-$  в окружающую среду существенно выше, чем у микромицета *P. ochro-chloron*. С другой стороны, характерные признаки начального этапа коррозии металла под воздействием *Alt. alternata* также выражены значительно сильнее, чем при использовании *P. ochro-chloron*. Если под воздействием последнего спустя 5 суток наблюдаются локальные образования экссудата ( $pH > 8$ ) (рис. 2, *a*), то в случае *Alt. alternata* экссудат покрывает существенно большую поверхность уже через одни сутки (рис. 2, *б*). На завершающих стадиях коррозия металла под воздействием *Alt. alternata* проходит также более глубоко (рис. 2, *в*).

#### Библиографический список

1. О роли активных форм кислорода в инициировании коррозии металлов микроскопическими грибами / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 11. С. 43–48.
2. Коррозия алюминия и его сплавов под воздействием микроскопических грибов / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 9. С. 36–41.
3. Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов под воздействием микроорганизмов / Д.В. Белов [и др.] // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. № 6. С. 60–64.

4. Роль супероксидного анион-радикала в бактериальной коррозии цинка / Д.В. Белов [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. 2012. Т. 48. № 3. С. 302–307.
5. Соединения – акцепторы электронов в исследовании биокоррозионных явлений / А.А. Калинина [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 12. С. 29–32.
6. Столяров, К.П. Руководство по микрохимическим методам анализа: учеб. пособие / К.П. Столяров. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1981. – 248 с.
7. **Bailey, R.** Differential Spectrophotometric Determination of Hydrogen Peroxide Using 1,10-Phenanthroline and Bathophenanthroline / R. Bailey, D.F. Boltz // Anal. Chem. 1959. V. 31. № 1. P. 117 – 119.
8. **Auchere, F.** What is the ultimate fate of superoxide anion in vivo? / F. Auchere, F. Rusnak // J. Biol. Inorg. Chem. 2002. V. 7. P. 664–667.
9. **Bielski, B.H.J.** Reduction of nitro blue tetrazolium by  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  radicals / B.H.J. Bielski, G. S. Grace, S. Bajuk // J. Phys. Chem. 1980. V. 84. P. 830–833.
10. **Фридович, И.** Свободные радикалы в биологии. Т. 1 / И. Фридович. – М.: Мир, 1979. С. 273–314.
11. **Mao, G.D.** Electron spin resonance study on the permeability of superoxide radicals in lipid bilayers and biological membranes / G.D. Mao, M.J. Poznansky // FEBS Letters. 1992. V. 305. № 3. P. 233–236.
12. **Bielski, B.H.J.** Reevaluation of the spectral and kinetic properties of  $\text{HO}_2$  and  $\text{O}_2^-$  free radicals / B.H.J. Bielski // Photochemistry and Photobiology. 1978. V. 28. P. 645–649.

Дата поступления  
в редакцию 28.11.2012

**V.R. Kartashov<sup>1</sup>, M.V. Chelnokova<sup>1</sup>, A.A. Kalinina<sup>1</sup>, T.N. Sokolova<sup>1</sup>,  
S.J. Radostin<sup>2</sup>, A.A. Moskvichev<sup>2</sup>**

## **$\text{O}_2^-$ GENERATION MICRO-ORGANISMS AND THEIR ROLE IN BIOLOGICAL CORROSION OF METALS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod branch of Institute of mechanical engineering n.a. A.A. Blagonravov<sup>2</sup>

**Purpose:** Explore the possibility of participating in the corrosion process of the superoxide anion radical produced when microorganisms.

**Design / methodology / approach:** A review of literature and previously published data on the possibility of living organisms release of reactive oxygen species, particularly superoxide anion in the environment. Spectrophotometrically installed capacity allocation superoxide anion micromycetes and bacteria.

**Findings:** Installed capacity of microorganisms, particularly certain types of bacteria and micromycetes corrosive zinc. The role of the initial stage of the superoxide anion radical  $\text{O}_2^-$ , released into the environment by microorganisms during their life.

**Research limitations/implications:** Examined some of the factors initiating biological corrosion.

**Originality/value:** A certain connection between the properties of microorganisms secrete superoxide anion and the degree of corrosion damage.

*Key words:* superoxide anion radical, bacterial corrosion of metals, mikromitsetnaya corrosion of metals, reactive oxygen species, NBT.

УДК 620.193.8

А.А. Калинина<sup>1</sup>, А.Н. Москвичев<sup>2</sup>, Е.Н. Разов<sup>2</sup>, С.Ю. Хлопин<sup>1</sup>,  
Т.Н. Соколова<sup>1</sup>, В.Р. Карташов<sup>1</sup>

### ВЛИЯНИЕ АДСОРБИРОВАННЫХ НА ЦИНКЕ ФЕНОЛОВ НА БАКТЕРИАЛЬНУЮ КОРРОЗИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский филиал института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН<sup>2</sup>

Установлено, что на ранних стадиях бактериальной коррозии цинка фенолы, адсорбированные на поверхности металла, оказывают значительное влияние на ход коррозионного процесса. Характер этого влияния зависит как от вида бактерий, так и от структуры фенолов.

*Ключевые слова:* микроорганизмы, бактериальная коррозия, активные формы кислорода (АФК), супероксидный анион, фенольные соединения, цинк.

Ранее нами было показано, что иницирующая роль микромицетов и бактерий в коррозии металлов может быть связана с выделением микроорганизмами в окружающую среду супероксидного аниона [1-3]. Известно, что супероксидный анион  $O_2^-$  взаимодействует с фенолами с высокой скоростью [4-5]. Эти данные дают основание полагать, что фенолы могут оказывать существенное влияние на коррозионный процесс, если в нем принимает участие  $O_2^-$ .

В работах [6, 7] было обнаружено, что при воздействии на цинк ряда микромицетов происходит значительная активация коррозии под влиянием нанесенных на металл фенолов, которая приводит к более глубоким повреждениям металлической поверхности. Нами было показано [8], что активирующее воздействие на коррозию цинка под воздействием бактерии *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub> может оказывать 2,6-ди-*трет*-бутил-4-метилфенол (ионол). Были установлены продукты биотрансформации ионола бактерией *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub> и предложена схема их образования с участием  $O_2^-$ .

В настоящей работе расширен круг как исследуемых бактерий, так и адсорбированных на поверхности цинка фенолов. В качестве тест-организмов использовали музейные штаммы бактерий: *Escherichia coli* 321-5, *Proteus vulgaris* 1212, *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>, *Staphylococcus aureus* 956, *Staphylococcus epidermidis* 1061 (Всероссийская коллекция микроорганизмов, г. Пущино Московской области). Подготовку поверхности образцов цинка, биологические исследования проводили, как описано в работах [1-3,7-9]. В качестве фенолов использовали соединения: фенол (I), 2,6-ди-*трет*-бутил-4-метилфенол (ионол) (II), гидрохинон (III), пирокатехин (IV), 2,5-ди-*трет*-бутил-гидрохинон (V), 3,5-ди-*трет*-бутил-пирокатехин (VI). Соединения (I) – (IV) являлись коммерческими препаратами марки «хч». Вещества (V) – (VI) были получены по известным методикам [9] и имели чистоту не менее 99,0 %.

В качестве растворителей в адсорбционном процессе использовали этиловый спирт при растворении фенола (I), гексан – ионола (II), ацетон – гидрохинона (III) и пирокатехина (IV), диэтиловый эфир – 2,5-ди-*трет*-бутил-гидрохинона (V) и 3,5-ди-*трет*-бутил-пирокатехина (VI). Все растворители подвергали дополнительной очистке и перегонке.

Цинковые образцы выдерживали в 0,01М растворах фенолов в соответствующих растворителях в течение 12 ч, после чего высушивали на воздухе при комнатной температуре и помещали на поверхность плотной питательной среды (мясопептонный агар), предвари-

тельно заселенной суспензией суточных культур бактерий, выращенных в пробирках на скошенном агаре. Культивирование проводили при температуре  $(37 \pm 2)$  °С и влажности воздуха 90%.

Микроскопические исследования поверхности металлов осуществляли на приборе СЭМ (Tescam Vega II, Чехия).

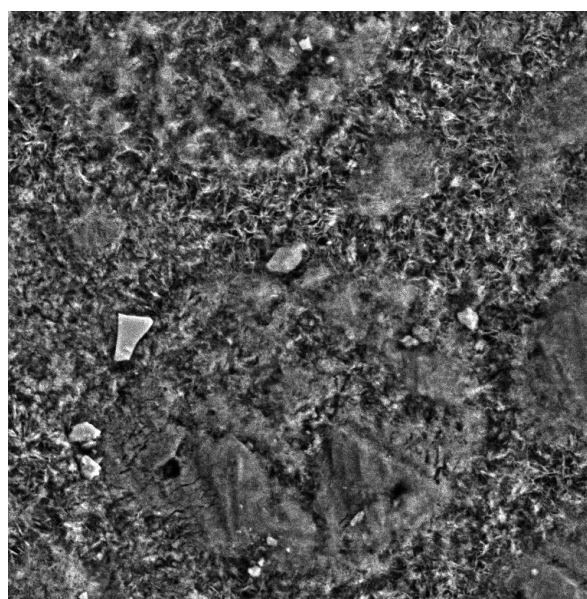
### Результаты и их обсуждение

Известно, что взаимодействие бактерий с поверхностью начинается с формирования на ней биохимической структуры, определяемой как биопленка [10]. Химическая основа биопленки, а также продукты жизнедеятельности бактерий, в том числе  $O_2^-$ , в комплексе являются иницирующими факторами коррозии металлов. О формировании биопленки на поверхности цинка нами сообщалось в работах [11].

Установлено, что фенолы исследуемого нами ряда, входящие в группу биологических регуляторов, оказывают влияние на характер образующейся биопленки. На рис. 1 показано состояние поверхности цинка с адсорбированным ионолом спустя пять суток с начала экспозиции под воздействием бактерий *Escherichia coli* 321-5. Как видно, клетки бактерий находятся в контакте с адсорбированным веществом, экранирующим поверхность металла (рис. 1).



а)

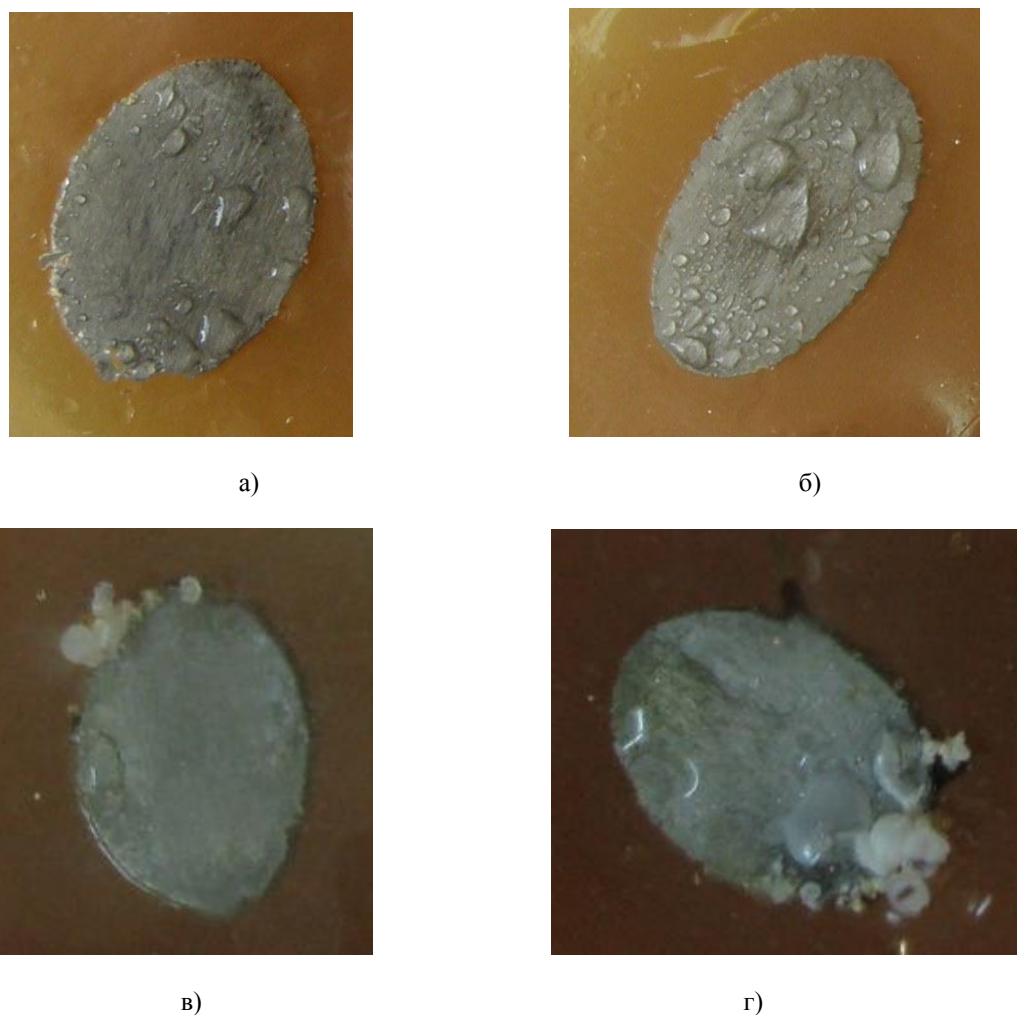


б)

**Рис. 1. Микрофотографии поверхности цинка с адсорбированным ионолом спустя пять суток с начала экспозиции под воздействием бактерий *Escherichia coli* 321-5: а – внешняя сторона; б – сторона, обращенная к питательной среде**

Как отмечалось в работах [8], на ранних стадиях, когда химические вещества биопленки играют главную роль, воздействие бактерий на металл проявляется визуально в образовании экссудата с  $pH > 7$  на поверхности металла. Время появления экссудата, его pH могут быть критериями как для оценки коррозионной активности бактерий в целом, так и выявления факторов, влияющих на коррозию.

Динамику коррозии обработанных фенолами образцов изучали в сравнении с коррозией необработанных (контрольных) образцов. Каждый опыт проводили не менее чем в четырех поверхностях (табл. 1, рис. 2).



**Рис. 2. Внешний вид поверхности цинка:**

*а* – под воздействием *Proteus vulgaris* 1212 через семь суток с начала экспозиции,  $\text{pH} \approx 11$ ;  
*б* – под воздействием *Proteus vulgaris* 1212 через семь суток с начала экспозиции с адсорбированным ионолом (активация); *в* – под воздействием *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub> через 40 суток с начала экспозиции; *г* – при тех же условиях с адсорбированным ионолом.

**Таблица 1**

**Оценка накопления экссудата на поверхности цинка через 5 суток с начала экспозиции**

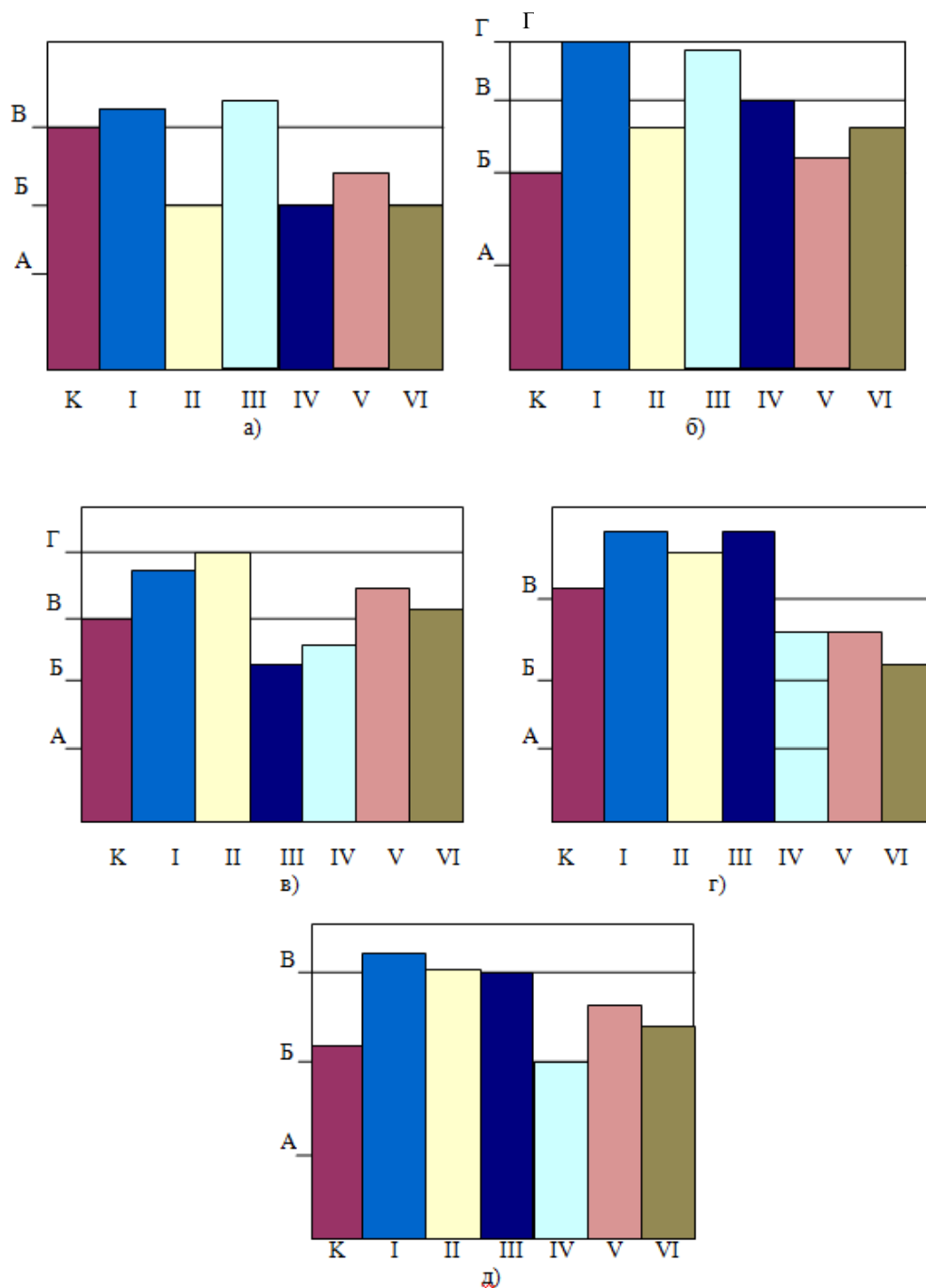
№	Микроорганизмы	Фенолы					
		I	II	III	IV	V	VI
1	<i>Escherichia coli</i> 321-5	++	-	++	-	-	-
2	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> 969 <sub>1</sub>	++	++	++	++	++	++
3	<i>Staphylococcus aureus</i> 956	++	++	-	-	++	++
4	<i>Staphylococcus epidermidis</i> 1061	++	++	++	-	-	-
5	<i>Proteus vulgaris</i> 1212	++	++	++	-	++	++

Примечание: - ингибирование, ++ активация.

В целом влияние на раннюю стадию коррозии адсорбированных на цинке фенолов проявляется в двух вариантах. В одном из них, фенолы усиливают образование экссудата, в другом – ингибируют. Как видно из табл. 1, фенол (I), 2,6-ди-*трет*-бутил-4-метилфенол (ионол) (II) и гидрохинон (III) активируют этот процесс практически для всего ряда исследуемых бактерий; 2,5-ди-*трет*-бутил-гидрохинон (V) и 3,5-ди-*трет*-бутил- пирокатехин (VI)

только в отдельных единичных случаях оказывают ингибирующий эффект, а пирокатехин (IV), за исключением *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>, ингибирует образование экссудата.

Установлена закономерность, чем больше образуется экссудата с  $\text{pH} > 7$  на ранней стадии экспозиции, тем сильнее коррозионное повреждение металла в целом. На рис. 3 представлены гистограммы коррозионного повреждения цинка через 40 суток с начала экспозиции. Для оценки биокоррозионного процесса использовалась разработанная нами балльная шкала (баллы А – Е) [1-3].

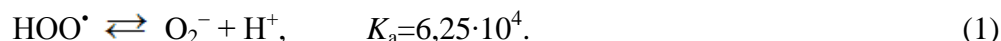


**Рис. 3. Гистограммы динамики коррозии образцов цинка, обработанного фенолами, на 40-е сутки с начала экспозиции под воздействием:**

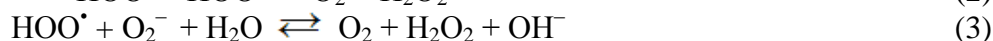
*a* – *Escherichia coli* 321-5; *б* – *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>; *в* – *Staphylococcus aureus* 956; *г* – *Staphylococcus epidermidis* 1061; *д* – *Proteus vulgaris* 1212 (К – контроль)



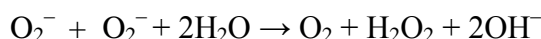
Известно, что в водном растворе  $O_2^-$  существует в виде равновесной смеси гидропероксидного радикала как кислоты Бренстеда и  $O_2^-$  в форме сопряженного основания [5]:



Равновесная смесь очень быстро превращается в устойчивые продукты в результате протекания двух параллельных реакций (2) и (3) с константами скоростей  $8,3 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ сек}^{-1}$  и  $9,7 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ сек}^{-1}$  соответственно:



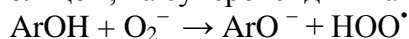
Скорость бимолекулярной реакции между супероксидными анионами



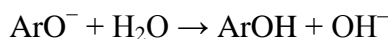
по сравнению со скоростями реакций (2) и (3) мала, и этим взаимодействием как одним из потоков превращения  $O_2^-$  в устойчивые продукты можно пренебречь.

Гидроксильные ионы, как отмечалось в предыдущих работах [1-3, 6, 7], совместно с противоионами и водой питательной среды способны сформировать на отдельных участках поверхности металла объемную жидкую фазу с рН 8-11. При таких рН супероксидный анион является доминирующим компонентом равновесной смеси и может вступать в реакцию с фенольными соединениями, адсорбированными на поверхности цинка.

Критический анализ реакционной способности системы  $O_2^- - OH^-$  с фенольными соединениями приведен в обзоре [5]. В зависимости от структуры фенольного соединения значение константы скорости лежит в пределах  $10^3 - 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . При взаимодействии  $O_2^-$  с одноатомными фенолами происходит перенос протона гидроксильной группы, непосредственно связанной с ароматическим кольцом, на супероксидный анион [4]



Гидропероксидный радикал может далее вступать в реакцию (3). Фенольный анион, будучи сильным основанием Бренстеда, подвергается гидролизу с регенерацией некоторой части исходного фенола:



Эта последовательность превращений может происходить до тех пор, пока рН экссудата не достигнет максимального значения. Фенолятные анионы, по-видимому, подвергаются окислительному разложению.

При взаимодействии  $O_2^-$  с двухатомными фенолами, содержащими гидрохиноновые или пирокатехиновые фрагменты, в начальной стадии образуются семихиноновые соединения и, соответственно, пероксид водорода.

Очевидно, что поверхностная концентрация фенолов (на  $\text{см}^2$ ) выше, чем концентрация  $O_2^-$ , транспортируемого через соответствующие каналы в околочлеточное пространство, по этой причине количество деструкторов –  $OH^-$ ,  $HO\dot{O}$  и  $H_2O_2$ , которые образуются в начальный период процесса по реакциям (2)–(3), должно возрасти, что и приводит к усилению коррозионных разрушений.

Ингибирование коррозии фенолами, вероятно, связаны с особенностями формирования биопленки и влияния фенолов непосредственно на метаболизм бактерий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коррозия алюминия и его сплавов под воздействием микроскопических грибов / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 9. С. 36 – 41.
2. Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов под воздействием микроорганизмов / Д.В. Белов [и др.] // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. № 6. С. 60 – 64.

3. Роль супероксидного анион-радикала в бактериальной коррозии цинка / Д.В. Белов [и др.]. // Прикладная биохимия и микробиология. 2012. Т. 48. № 3. С. 302 – 307.
4. Tsujimoto, Y. Superoxide radical scavenging activity of phenolic compounds / Y. Tsujimoto, H. Hashizume, M. Yamazaki // Int. J. Biochem. 1993. V. 25. № 4. P. 491–494.
5. Reactivity of HO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub><sup>-</sup> Radicals in Aqueous Solution / В.Н.И. Bielski [etc] // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1985. V. 14. P. 1041 – 1100.
6. О роли активных форм кислорода в иницировании коррозии металлов микроскопическими грибами / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 11. С. 43 – 48.
7. Влияние адсорбированных на поверхности фенолов и родственных им соединений на биологическую коррозию цинка / Д.В. Белов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 2. С. 258-263.
8. Бактериальная коррозия цинка и ее активация ионолом / Д.В. Белов [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6-1. С. 127-131.
9. Взаимодействие пространственно экранированных фенолов и хинонов с органическими радикалами / И.П. Едимечева [и др.] // Журнал общей химии. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 632 – 635.
10. Little, B. J., Lee, J. S. Microbiologically Influenced Corrosion / B. J. Little, J. S. Lee – ISBN 978-0-471-77276-7. John Wiley & Sons. Inc. Hoboken. NJ. 2007. Hardcover. 279 p.
11. Соединения – акцепторы электронов в исследовании биокоррозионных явлений / А.А. Калинина [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 12. С. 29-32.

Дата поступления  
в редакцию 28.11.2012

A.A. Kalinina<sup>1</sup>, A.N. Moskvichev<sup>2</sup>, E.N. Razov<sup>2</sup>, S.Y. Khlopin<sup>1</sup>,  
T.N. Sokolova<sup>1</sup>, V.R. Kartashov<sup>1</sup>

## EFFECT OF PHENOL ADSORBED ON ZINC ON BACTERIAL CORROSION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod branch of Institute of mechanical engineering n.a. A.A. Blagonravov<sup>2</sup>

**Purpose:** Study the effect of adsorbed on zinc phenols to bacterial corrosion.

**Design / methodology / approach:** Was conducted a literature review of previously published evidence of interaction of superoxide anion with phenols. SEM was investigated change in the state of sample surfaces with adsorbed phenol under the influence of bacteria.

**Findings:** Found that in the early stages of bacterial corrosion of zinc phenol adsorbed on the metal surface, have a significant influence on the corrosion process. The nature of this effect depends on the type of bacteria, and the structure of phenols.

**Research limitations/implications:** These studies are aimed at identifying the main factors that may trigger biological corrosion, which will facilitate the search for new inhibitors of biological corrosion.

**Originality/value:** Established regularities of biological corrosion, depending on the strain of microorganism and adsorbed on the surface of the metal compounds.

*Key words:* microorganisms, bacterial corrosion, reactive oxygen species (ROS), superoxide anion, phenolic compounds, zinc.



## ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 339

Ф.Ф. Юрлов<sup>1</sup>, В.Ю. Грачев<sup>2</sup>

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Нижегородский институт технологии и организации производства<sup>2</sup>

Выбор эффективных решений является одной из важнейших задач стратегического планирования. При решении указанной задачи широкое применение имеет портфельный анализ, при котором используется, как правило, двухмерные матрицы эффективности. В статье рассматриваются возможности применения многокритериального подхода, учитывающего набора экономических, инновационных, социальных и иных показателей.

*Ключевые слова:* портфельный анализ, многокритериальный выбор показателей эффективности, стратегические решения.

При стратегическом планировании и управлении СПУ одной из важных проблем является проблема выбора эффективности решений по совокупности показателей. Один из распространенных подходов к решению данной проблемы – портфельный анализ. При использовании данного подхода эффективным средством определения стратегических позиций различных видов деятельности хозяйствующих субъектов (предприятий и организаций) выступает подход, базирующийся на матричном анализе портфеля. При этом матрица портфеля представляет собой двухмерный график, позволяющий оценивать экономическое состояние анализируемых объектов и стратегий их развития. В данном случае используются два показателя эффективности принимаемых решений.

В качестве наиболее распространенных показателей выступают: доля предприятия на рынке, темпы роста рынка, долговременная привлекательность отрасли, прибыльность отрасли и др.

Рассмотрение проблемы применения матричного портфельного анализа позволяет определять особенности и ограничения, возникающие при его использовании. В качестве указанных ограничений отметим следующие:

- использование только экономических показателей;
- применение двух показателей при формировании матриц портфеля.

В общем случае, при выборе эффективных стратегических решений возникает необходимость применения не только экономических показателей, но и показателей, имеющих иное содержание. К таким показателям можно отнести: социальные, экономические, технические и иные показатели. В последнее время в связи с созданием инновационной экономики в нашей стране требуется принятие инновационных решений. Следовательно, актуальной является задача определения инновационных показателей при оценке эффективности стратегий.

Таким образом, при выборе эффективных стратегических решений приходится учитывать различные группы показателей: экономические, инновационные, социальные и др. При этом задачи, связанные с оценкой эффективности стратегических решений, существенно

усложняются. Это обусловлено наличием противоречивых критериев (показателей), характеризующихся тем, что при улучшении какого-либо показателя другие могут ухудшаться.

В данных ситуациях возникает необходимость согласования решений, которые соответствуют каждому из критериев (показателей). С этой целью могут быть использованы различные средства: организационные, технологические, финансовые, нормативные акты и т.п.

Исходя из изложенного, при использовании портфельного анализа требуется развитие теории и практики многокритериального выбора стратегий.

В настоящей статье предлагается общая процедура оценки эффективности стратегических решений и выбора наиболее предпочтительных стратегий.

Сущность предлагаемой процедуры заключается в следующем.

1. Определяются цели стратегического планирования и управления СПУ:

$$Ц_c = \{Ц_{ci}\}, Ц_c = \overline{\{Ц_{ci}\}}, i = \overline{1, n}.$$

В качестве целей СПУ могут выступать: увеличение доли рынка; рост прибыли предприятия; снижение относительных удельных затрат по сравнению с конкурентами; устранение угроз со стороны конкурентов, повышение инновационной активности и т.п.

2. Формулирование средств достижения целей СПУ:

$$X_c = \{X_{cj}\}, j = \overline{1, J}.$$

Средства достижения целей  $X_{cj}$  представляют: диверсификация производства, реструктуризация предприятий, внедрение прогрессивных технологий, повышение качества продукции (товаров и услуг), инновационные решения и др.

3. Выбор критериев (показателей) эффективности стратегических решений

$$K_c = \{K_{cm}\}, m = \overline{1, M}.$$

К показателям  $K_{cm}$  относятся: доля рынка, темпы роста, относительные удельные затраты (по сравнению с конкурентами), уровень доходов работающих, экологические, инновационные и другие показатели.

4. Разбиение множества показателей на группы:

$$K_I, K_{II}, \dots, K_N.$$

В качестве указанных групп показателей могут выступать: экономические, технические, социальные, экологические, инновационные.

5. Устанавливается соответствие между средствами достижения целей (альтернативами), которые являются управляемыми факторами, и каждым из показателей групп. Формально зависимости групп показателей от управляемых факторов запишем в виде

$$K_I = f(X_c), K_{II} = \varphi(X_c), \dots, K_N = \lambda(X_c).$$

При наличии двух показателей в каждой группе составляются двумерные матрицы эффективности.

6. Выбираются принципы выбора эффективных решений:

$$X_1, X_2, \dots, X_n.$$

В качестве указанных принципов выступают принципы: Парето, формирование комплексных показателей, выделение главного показателя и др.

7. Определяются эффективные решения при использовании каждой группы показателей:

$$X_I^0, X_{II}^0, \dots, X_N^0.$$

8. Осуществляется проверка согласованности эффективных решений каждой группы. Рассматриваются следующие возможные ситуации:

а) эффективные решения, относящиеся к указанным группам, совпадают. Условия совпадения решений записываются в виде

$$X_I^0 = X_{II}^0 = \dots = X_N^0;$$

б) эффективные решения анализируемых групп не совпадают:

$$X_I^0 \neq X_{II}^0 \neq \dots \neq X_N^0;$$

в) наблюдается частичное совпадение эффективных решений.

При этом будут справедливы условия:

$$X_I^0 = X_{II}^0 = \dots = X_M^0,$$

$$X_{M+1}^0 \neq X_{M+2}^0 \neq \dots \neq X_N^0$$

9. Производится согласование эффективных решений групп, при сравнении которых решения не совпадают.

В качестве способов согласования могут быть использованы: законодательные акты, внесение изменений в нормативы, финансовые ресурсы, экономико-математические методы и т.п.

10. Осуществляется окончательный выбор эффективных решений, учитывающий различные группы показателей: экономические, технические, социальные и др.

*Пример сравнительной оценки эффективности СПУ по двум группам показателей, каждая группа которых содержит два показателя.*

Предположим, что для выбора эффективных решений при СПУ используются две группы показателей: экономические и социальные. Каждая группа включает два показателя. Использование только двух показателей определялось удобством и наглядностью анализа.

В качестве экономических показателей выступают: прибыль  $\Pi$  и инвестиции  $J$ . Социальные показатели представляют: уровень доходов  $У_d$  занятость населения  $З_n$  (в том или ином регионе).

Цель анализа – повышение эффективности и конкурентоспособности выбранного объекта (предприятия, организации, отрасли и т.п.). Для достижения указанной цели применяется набор альтернатив  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Эти альтернативы представляют:

$X_1$  – снижение издержек производства;

$X_2$  – рост объемов производства;

$X_3$  – модернизация оборудования;

$X_4$  – применение нового оборудования;

$X_5$  – реорганизация производства путем создания бизнес-единиц;

$X_6$  – диверсификация производства.

На рис.1 представлен график эффективности, отражающий зависимость экономических показателей  $\Pi$  и  $J$  от выбранных альтернатив  $X_1 \div X_6$ . На рис. 1 стрелками показано направление улучшения показателей  $\Pi$  и  $J$ .

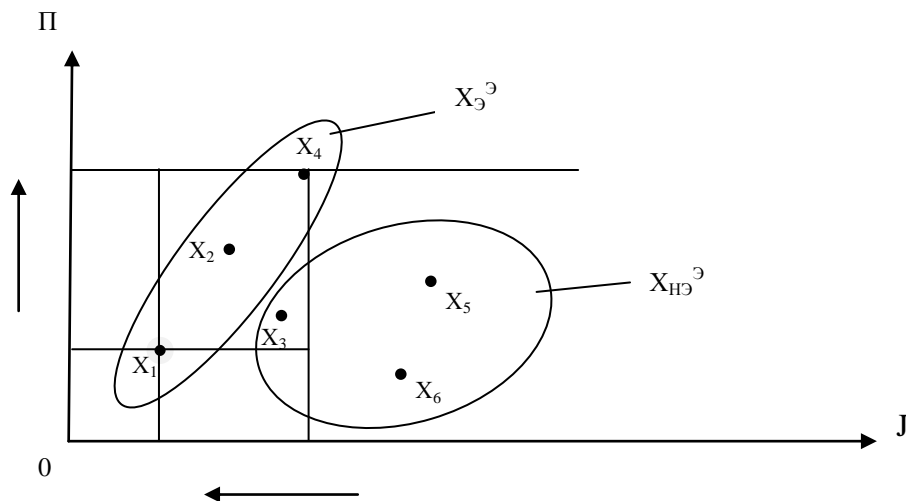


Рис. 1

На первом этапе анализа определяются граничные точки  $X_1$  и  $X_4$ , которые включаются в множество эффективных решений. Точки, не принадлежащие выделенному прямоугольнику, исключаются из рассмотрения. К таким точкам относятся  $X_5$  и  $X_6$ . Они являются неэффективными, так как доминируются точками, принадлежащими прямоугольнику. На втором этапе анализа производится сравнение точек  $X_2$  и  $X_3$ , принадлежащих прямоугольнику. Точка  $X_3$  уступает точке  $X_2$ , поэтому исключается из рассмотрения на втором этапе анализа. Таким образом, общее множество альтернатив, включающее точки  $X_1 \div X_6$  разбивается на два подмножества: подмножество эффективных альтернатив  $X_{Э}^{\ominus}$  и подмножество неэффективных альтернатив  $X_{НЭ}^{\ominus}$ .

Из рис. 1 следует, что эффективное множество альтернатив экономических показателей  $X_{Э}^{\ominus}$  включает альтернативы  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_4$ . Альтернативы  $X_3$ ,  $X_5$  и  $X_6$  входят в неэффективное множество  $X_{НЭ}^{\ominus}$ .

На рис. 2 изображен график эффективности, определяемой с помощью социальных показателей  $Y_d$  и  $Z_n$ . В данном случае показатели уровня доходов  $Y_d$  и занятости населения максимизируются.

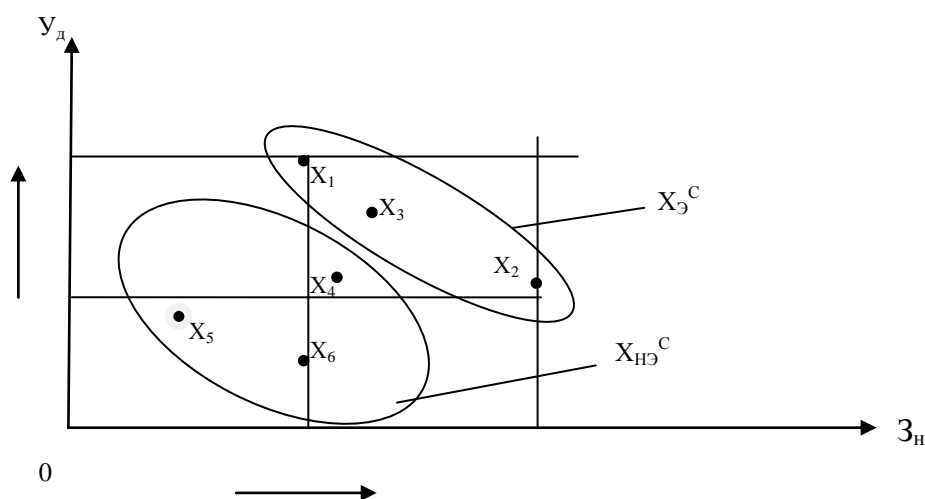


Рис. 2

В соответствии с рис. 2 на первом этапе анализа определяются граничные точки  $X_1$  и  $X_2$ , которые включаются в эффективное множество решений. Точки, не принадлежащие прямоугольнику ( $X_5, X_6$ ), исключаются из рассмотрения как неэффективные. На втором этапе анализа производится сравнение точек  $X_3$  и  $X_4$ , принадлежащих прямоугольнику. Точка  $X_4$  уступает точке  $X_3$  по обоим показателям, поэтому исключается из рассмотрения на втором этапе анализа. В результате анализируемое множество альтернатив разбивается на два подмножества: подмножество эффективных решений и подмножество неэффективных решений.

На рис. 2 обозначено  $X_{Э}^C$  – эффективное социальное решение; а  $X_{НЭ}^C$  – неэффективное социальное решение. Эффективное социальное решение включает альтернативы  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ . К неэффективному социальному решению относятся альтернативы  $X_4$ ,  $X_5$  и  $X_6$ . Результирующее эффективное решение определяется путем анализа эффективных экономического и социального решений. Это осуществляется определением альтернатив, принадлежащих  $X_{Э}^{\ominus}$  и  $X_{Э}^C$ . Такими альтернативами являются альтернативы  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ .

**Библиографический список**

1. **Шапкин, Е.И.** Эффективная стратегия при планировании и управлении в машиностроении / Е.И. Шапкин, Ф.Ф.Юрлов. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2008.
2. Методы и модели в экономике / Ф.Ф.Юрлов [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010.

*Дата поступления  
в редакцию 12.12.2012*

**F.F. Yurlov<sup>1</sup>, V.U. Grachov<sup>2</sup>**

**EVALUATING THE EFFECTIVENESS AND CHOICE OF PREFERRED STRATEGIC DECISIONS BASED ON MULTI-CRITERIA APPROACH**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod institute of technology and organization of production<sup>2</sup>

Finding effective solutions is one of the most important tasks of strategic planning. In solving this problem has wide application portfolio analysis, which is generally used, two-dimensional matrix of efficiency.

This article discusses the possibility of using multi-criteria approach, including a set of economic, innovation, social and other indicators.

*Key words:* portfolio analysis, multi-criteria selection, performance indicators, strategic decisions.

УДК 331.101.3

В.Н. Старцева

## ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОТИВАЦИИ ПЕРСОНАЛА КАК НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА МЕНЕДЖМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель:** Рассмотреть внедрение инновационных технологий мотивации персонала как проблему современного менеджмента с научной и практической точек зрения.

**Методология:** Концепция управления человеческими ресурсами, теория интеллектуального капитала, концепции организационного развития и обучающейся организации.

**Результаты и область их применения:** Будут обоснованы необходимость, возможности и преимущества внедрения инновационных технологий мотивации персонала в практику управления человеческими ресурсами современных организаций. Результатом исследования являются конкретные причины отказа организаций от внедрения инновационных технологий мотивации персонала.

**Выводы:** Разработанный и апробированный инструментарий диагностики процесса внедрения инновационных технологий мотивации персонала может быть использован в системах стратегического и оперативного управления компаниями, изучаться в системах корпоративного обучения сотрудников, а также применяться в управленческом консультировании для совершенствования систем мотивации в отечественных компаниях.

*Ключевые слова:* инновационные технологии; мотивация; персонал; процесс внедрения; система управления; диагностика причин отказа.

В современной литературе существует множество определений понятия «инновация». Разные авторы (Л.М. Гохберг, С.Д. Ильенкова, В.М. Матиашвили, Н. Мончеев, Э. Мэнсфилд, Ф. Никсон, И. Перлаки, Э. Роджерс, Б.Твисс, Р. Фостер, В.Д. Хартман, И. Шумпетер, С.Ю. Ягудин) интерпретируют его в зависимости от объекта и предмета своего исследования. Одни учёные (Л.М. Гохберг, С.Д. Ильенкова, С.Ю. Ягудин) трактуют термин как превращение потенциального, научно-технического прогресса в реальный, воплощающийся в новых продуктах и технологиях. Другие (Б. Твисс) определяют инновацию как процесс, в котором изобретение или идея приобретает экономическое содержание.

По мнению Б. Санто, инновация – это такой общественно-технико-экономический процесс, который через практическое применение изобретений приводит к созданию новых, лучших по своим свойствам изделий, технологий, и в случае, если инновация ориентирована на экономическую выгоду, прибыль, её появление может принести на рынке добавочный доход.

Ф. Никсон трактует инновацию как совокупность технических, производственных и коммерческих мероприятий, приводящих к появлению на рынке новых и улучшенных промышленных процессов и оборудования.

П. Друкер определяет инновацию как разработку и внедрение нового, ранее не существовавшего, с помощью которого старые, известные элементы придают новые очертания экономике данного бизнеса.

В.М. Матиашвили полагает целесообразным «разводить» два понятия «инновация» и «инвенция». По его мнению, «инновация» – это новое, имеющее конкретную, ситуативную «привязку» (новое для конкретного человека, организации, общества), но не являющееся новым для других людей, организаций, обществ. В отличие от «инновации», понятие «инвенция» отражает новое, обладающее качеством всеобщности. Это новое уникально, оно создаётся впервые, не применялось и не использовалось никем и нигде ранее[4, с.7].

По мнению, В.П. Баранчевой, В.Н. Гунина, С.Ю. Ляпиной, В.А. Устинова, инновация означает нововведение как результат практического (или научно-технического) освоения более эффективного ассортимента продукции, обновленных средств производства и услуг, а

также научно-технических, технологических, организационно-экономических и управленческих принципов, открытий и явлений.

С.Д. Ильенкова, Л.М. Гохберг, С.Ю. Ягудин под инновацией понимают конечный результат инновационной деятельности, воплощенный в виде нового или усовершенствованного продукта, внедрённого на рынке; нового или усовершенствованного технологического процесса; нового подхода к социальным услугам.

Накопленный теоретический массив позволяет ответить на вопрос о сущностных характеристиках видового понятия «управленческая инновация». С нашей точки зрения, *управленческая инновация* – это организационно-управленческий инструмент достижения организационных целей, который характеризуется следующими сущностными чертами. Он должен:

- обладать новизной (быть новым) для конкретной организационной системы, в которой он реализуется;
- удовлетворять организационные и личные потребности работников и соответствовать возможностям организации и персонала;
- максимизировать прибыль (стоимость) компании;
- способствовать достижению ключевых организационных целей.

На основе этих сущностных характеристик можно дать определение понятия «*инновационные технологии мотивации персонала*». Это система *новых для конкретной организации* инструментов, побуждающих работников к эффективной трудовой деятельности, направляющая её на достижение целей организации, обеспечивающая удовлетворённость персонала своим трудом. Внедрение таких технологий всегда сопровождается значительными трудностями.

В исследованиях К. Астапова; А.В. Баранцева, В.В. Куляминой, В.А. Омельченки, О.Л. Петренки; А.В. Гугелева; И.Г. Дежиной; В.Г. Медынского, Л.Г. Шаршуковой; А.А. Мешкова; А.И. Пригожина; В.М. Салтыкова; А.А. Трифиловой; М. Хучека рассматриваются проблемы, связанные с различными аспектами внедрения инноваций и поствнедренческого этапа их функционирования.

В инноватике (науке об инновациях) в рамках жизненного цикла инновации справедливо выделяются несколько основных стадий:

- 1) зарождение (осознание потребности, поиск, разработка соответствующего новшества);
- 2) освоение (эксперимент, внедрение на объекте, осуществление необходимых изменений);
- 3) диффузия (тиражирование, распространение нововведения);
- 4) рутинизация (реализация инновации в стабильных, постоянно функционирующих объектах).

Близкая интерпретация инновационного цикла предложена американскими авторами (D. Henton, J. Melville, K. Walesh):

- 1) Initiation (инициация, зарождение);
- 2) Incubation (апробация, эксперимент);
- 3) Implementation (реализация);
- 4) Improvement (совершенствование, развитие).

Все фазы инновационного цикла эти авторы объединяют общим понятием «процесс внедрения».

Анализ работ в области социологии управления, а также практического опыта инновационных компаний позволили сформулировать *4 этапа процесса внедрения* инновационных технологий мотивации персонала в организациях.

*1-й этап.* Непосредственному практическому внедрению инновационных технологий в организации должен предшествовать комплекс работ по анализу её подготовленности и восприимчивости к изменениям [2, с. 173]. При этом цель заключается не только в том, чтобы выявить, обладает ли организация достаточными финансовыми, материальными и трудовыми ресурсами, психологической готовностью для внедрения этих технологий мотивации к труду, но и выяснить основные организационные, психологические барьеры и препятствия к внедрению инноваций, а также степень заинтересованности высшего руководства компании

в новых технологиях мотивации работников. Конечный результат этого этапа — разработка специальной программы внедрения инновационных технологий мотивации персонала с непосредственным участием руководителей компании.

*2-й этап.* Распределение ответственности между руководителями и специалистами за выполнение каждого внедренческого мероприятия (установить контроль, определить структуру отчетности о ходе внедрения, определение затрат на проведение работ).

Поэтому одним из условий успешного внедрения инновационных технологий мотивации персонала является распространение в организации информации об их достоинствах и возможностях новых мотивационных технологий, выявление и открытый разговор об их возможных недостатках.

А.В. Гугелев [1, с. 288-289] утверждает, что руководители и главные специалисты — это основные инициаторы и организаторы процесса внедрения инноваций, принимающие решение о том, должно ли внедряться данное нововведение или нет. Они руководят процессом внедрения в целом, контролируют качество внедрения инновационных технологий, определяют момент окончания процесса внедрения, рассчитывают экономический эффект. Рядовые сотрудники при внедрении обычно являются исполнителями, поскольку этот процесс требует квалифицированной, творческой (нестандартной) деятельности, для выполнения которой обычно выбирают высококвалифицированных сотрудников, имеющих опыт работы и проявляющих интерес к нововведению.

Для работы в новых условиях потребуется подготовка кадров. При этом можно выделить два подхода: обучение теоретическим и практическим навыкам работы по-новому до начала внедрения инновационных технологий мотивации персонала и переподготовка кадров в ходе его осуществления.

Внедрение инновационных технологий мотивации персонала неизбежно приведет к перестройке системы управления; при этом, как правило, меняются значимость выполняемых работ, численность работников, кадровый состав, их полномочия и ответственность. Пересмотру, прежде всего, будет подлежать штатное расписание и внутренние структуры базовых подразделений, в которых будут внедряться инновационные технологии мотивации персонала. Важные роли будут играть разработка новых должностных инструкций для нетиповых должностей (особенно руководящих) и пересмотр старых.

*3-й этап.* Для успешного внедрения инновационных технологий мотивации персонала необходимо создание целевой группы, которая будет координировать и направлять весь процесс в соответствии с утвержденным графиком.

Организационные перестройки неизбежно приведут к пребыванию организации в промежуточном состоянии, когда старые технологии управления уже не действуют, а новые еще не освоены. Целесообразно создавать две специальные группы, одна из которых будет обеспечивать работу в новых условиях, а другая — бесперебойное выполнение текущих операций организации.

*4-й этап.* Основную роль в осуществлении контроля за внедрением инновационных технологий мотивации персонала будет играть выбор показателей, позволяющих судить об уровне и динамике изменений [3, с. 47] Выбор показателей важен при постановке целей внедрения. Традиционные методы контроля отчетности следует дополнять обратной связью, используя социологическое исследование мнений работников относительно внедрения инноваций. Это обеспечит более достоверную информацию для оценки качества внедрения инновационных технологий мотивации персонала, а также приблизит их к потребностям и возможностям организации.

Чтобы проанализировать достигнутые успехи и разработать мероприятия, направленные на функционирование инновационных технологий мотивации персонала, руководству компании следует регулярно проводить их оценку, выявлять сильные и слабые стороны механизма внедрения инноваций, вырабатывать меры по их дальнейшему совершенствованию.



А.И. Пригожин выделяет два метода внедрения инновационных технологий:

1) «программируемое внедрение», которое подразумевает приспособление организации к внедряемому нововведению;

2) «адаптивное внедрение» (нововведение изменяется под конкретную организацию).

Основными причинами сопротивления внедрению инноваций, по мнению А.И. Пригожина, являются:

1) метод «кусочного внедрения» (внедряется только один компонент нововведения, остальные элементы «замораживаются»);

2) метод «вечного эксперимента» (апробация нововведения в одном конкретном подразделении, затем в другом и т.д.);

3) метод «отчётного внедрения» (нововведение реализовано только в документах, а в реальности инновация не внедрена);

4) метод «параллельного внедрения» («старые» технологии не заменяются «новыми», а продолжают функционировать с ними параллельно).

Инновационные технологии социального и управленческого типа – наименее затратные с финансовой точки зрения. Но именно они, чаще всего, сталкиваются с инертностью и самой консервативной сферой организации – характерами, привычками, ценностями. Поэтому с управленческой точки зрения обходятся компаниям весьма «дорого» (стрессы, конфликты, потеря стабильности и т.д.).

Далее целесообразно проанализировать причины, по которым организации не внедряют инновационные технологии мотивации персонала.

Для проведения анализа было опрошено 117 руководителей высшего, среднего и низшего управленческого уровня предприятий г. Нижнего Новгорода и Нижегородской области, работающих в 13 сферах деятельности, таких как производство, транспортные услуги, связь и телекоммуникации, страхование, финансовый (банковский) сектор, сельское хозяйство, образование, научная деятельность, торговая деятельность, строительство, медицинские и консультационные услуги и государственное управление.

Детальная информация относительно свойства общей выборки исследования приведена в табл. 1.

Таблица 1

Свойства общей выборки эмпирического исследования

№	Категория руководителей	Руководители высшего звена	Руководители среднего звена	Руководители низшего звена	Итого:
	Сфера деятельности предприятия				
1	Производство	6	25	23	54
2	Транспортные услуги	2	1	1	4
3	Связь и телекоммуникации	2	7	10	19
4	Страхование	1	0	0	1
5	Финансовый (банковский) сектор	0	2	0	2
6	Сельское хозяйство	1	0	0	1
7	Образование	0	2	1	3
8	Научная деятельность	6	9	3	18
9	Торговая деятельность	4	3	0	7
10	Строительство	3	0	1	4
11	Медицинские услуги	0	1	0	1
12	Консультационные услуги	0	1	0	1
13	Государственное управление	1	1	0	2
	Итого:	26	52	39	117

Опросный лист состоял из формулировок 31 причины, по которым организации не внедряют в данный момент инновационные технологии мотивации персонала. Руководителям предлагалось оценить данные формулировки по значимости по следующей шкале:

- 1) низкая значимость причины;
- 2) значимость ниже среднего;
- 3) средняя значимость причины;
- 4) значимость причины выше среднего;
- 5) высокая значимость причины.

Далее представлены краткие выводы относительно результатов опроса по каждой категории руководителей.

*а) Результаты опроса менеджеров высшего уровня (26 чел.) и краткие выводы.*

Руководителями высшего звена к причинам, по которым организации в настоящее время не внедряют инновационные технологии мотивации персонала, имеющим высокую значимость отнесли 10 причин. К наиболее значимым руководители высшего звена отнесли следующие:

- отсутствие (нехватка) у руководителей знаний об инновационных технологиях мотивации персонала (58%);
- убежденность руководителей в том, что более всего сотрудников мотивируют на достижение результатов заработная плата и премия (бонус) (42%);
- недостаточная ориентированность руководителей организации на социальные интересы и повышение мотивации персонала (мотивация самого руководителя находится не на высоком уровне) (40%).

Среди них нет причин, действие которых нельзя минимизировать или устранить во все. Методами, с помощью которых целесообразно снизить значимость данных причин либо устранить их, являются: повышение квалификации руководителей высшего звена и сотрудников в области эффективного управления современными организациями, человеческими ресурсами; наделение сотрудника HR-службы полномочиями по поиску и внедрению новых технологий мотивации; глубокий анализ причин возникновения в компании организационных проблем и несоответствия качества продукции национальным и мировым стандартам.

Среди причин, имеющих значимость выше среднего, важной и трудноустранимой является: *отсутствие (недостаточность) финансовых средств для реализации новых современных технологий мотивации.*

Причины, отмеченные руководителями как имеющие среднюю степень значимости, позволяют сделать вывод о том, что, с точки зрения менеджеров высшего звена, большинство российских компаний готовы к внедрению инновационных технологий мотивации персонала. Но этот процесс внедрения требует предварительной серьезной целенаправленной подготовки.

Причины, которым был присвоен ранг низкой значимости, указывают на то, что руководители высшего звена готовы предоставлять сотрудникам гибкий график работы, понимают значимость управления талантами, эффективной корпоративной культуры, оценки сотрудников, командной работы, хороших отношений с непосредственным руководителем и обучения за счёт средств предприятия, а также важность использования моральных технологий мотивации персонала. Главный вывод заключается в том, что руководители высшего звена отрицают неэффективность внедрения инновационных технологий мотивации и относят их к инвестиционным вложениям в персонал и развитие всей организации в целом.

*б) Результаты опроса менеджеров среднего уровня (52 чел.) и краткие выводы.*

К наиболее значимым причинам руководители среднего звена отнесли следующие:

- наличие в организации других, более важных объектов для инвестирования финансовых средств (31%);
- использование компанией устаревших технологий управления, которые были эффективны в «старые» добрые времена (29%);
- отсутствие (недостаточность) финансовых средств для реализации новых современных технологий мотивации (27%).

Руководители среднего звена самой главной причиной считают *отсутствие (недостаточность) финансовых средств для внедрения новых современных технологий мотивации в компании*. В указанном случае может быть дана только одна рекомендация – необходимо посчитать, во сколько организации обходится неадекватная мотивация персонала и низкий уровень удовлетворённости сотрудников, и сравнить с затратами, необходимыми для внедрения инновационных технологий мотивации.

Причины, имеющие значимость выше среднего, среднюю и ниже среднего могут быть минимизированы через обучение руководителей, повышение их квалификации и изучение опыта отечественных и зарубежных компаний.

Причины, которые руководители среднего звена отнесли к причинам, имеющим низкую значимость, указывают на то, что серьёзных препятствий к внедрению инновационных технологий мотивации персонала в российских компаниях в настоящее время нет.

*в) Результаты опроса менеджеров низшего уровня (39 чел.) и краткие выводы.*

К наиболее значимым причинам руководители низшего звена отнесли следующие:

- наличие в организации других, более важных объектов для инвестирования финансовых средств (38%);
- обучение за счёт компании (семинары, тренинги, второе высшее, MBA) повышает вероятность того, что сотрудник уволится из организации (36%);
- внедрение инновационных технологий мотивации не влияет на уровень качества производимой продукции и оказываемых услуг (36%).

Причины, имеющие значимость выше среднего, могут быть устранены с помощью системы корпоративного обучения, использования управленческой технологии «бенчмаркинг», совершенствования существующей системы мотивации сотрудников и использования инновационных технологий таким образом, чтобы они окупались в краткосрочные и среднесрочные периоды.

Отсутствие (нехватку) в компании финансовых средств, нежелание руководителей изменять привычный стиль управления, нехватку знаний у руководителей относительно современных методов управления и т.д. менеджеры среднего звена отнесли к причинам, имеющим среднюю значимость. Их действие также может быть минимизировано через обучение руководителей и формирование эффективной корпоративной культуры, способствующей реализации намеченных организационных изменений.

Анализ причин, имеющих, по мнению руководителей низшего звена, низкую значимость указывает на то, что такие инновационные для многих российских компаний технологии, как командообразование, управление карьерой, управление талантами, делегирование полномочий и моральные формы мотивации легко реализуемы.

Соответственно основные условия и факторы, препятствующие внедрению инновационных технологий мотивации, таковы:

- недостаточный уровень профессионализма и компетенции руководителей компаний;
- отсутствие (нехватка) финансовых средств на внедрение таких технологий;
- уменьшающиеся в условиях кризиса возможности для привлечения инвестиций;

- отсутствие чётко сформулированных видения, миссии и «предметных» целей компании;
- специфическая (нерыночная) корпоративная культура;
- превалирование авторитарического стиля руководства;
- коррумпированность части высшего руководства компаний;
- сопротивление части сотрудников организаций внедрению инновационных технологий мотивации;
- ориентация на управленческие принципы и технологии индустриальной экономики.

К основным условиям и факторам, способствующим внедрению инновационных технологий мотивации персонала, можно отнести:

- новые социальные, организационные и личные потребности, связанные с глобализацией и вхождением высокотехнологичного бизнеса в поле нового технологического уклада;
- растущий уровень образованности и профессионализма руководителей многих российских компаний в области организационного управления;
- потребность собственников и руководителей обеспечить выживание и развитие компании в кризисной ситуации;
- ориентация управленческих принципов и технологий на потребности и возможности нового технологического уклада;
- растущее осознание руководителями того, что только с помощью внедрения инновационных управленческих технологий можно стать и оставаться конкурентоспособной компанией;
- интерес и поддержка внедрения инновационных технологий мотивации со стороны сотрудников организаций;
- ориентация руководителей на демократический стиль управления;
- формирование в компаниях психологического климата и корпоративной культуры, способствующих внедрению инновационных технологий мотивации персонала;
- внимание со стороны руководства к новым социальным потребностям сотрудников;
- отождествление работников организации с «интеллектуальным капиталом» компании.

Главными целями руководителей современных отечественных компаний являются:

- увеличение силы воздействия факторов, способствующих внедрению инновационных технологий мотивации персонала;
- сокращение силы воздействия факторов, препятствующих внедрению инновационных технологий.

После анализа данных причин, условий и факторов был сделан вывод о том, что, в отличие от внедрения технологических инноваций, внедрение организационно-управленческих инноваций тормозится не столько объективными обстоятельствами, сколько субъективными внутренними факторами. Большинство из них можно устранить (минимизировать) при помощи обновления руководящего состава компании, а также обучения и повышения управленческих компетенции руководителей всех звеньев управления. Следовательно, непреодолимых внутренних препятствий для внедрения инновационных технологий мотивации персонала в российских компаниях в настоящее время практически не существует.

#### Библиографический список

1. Гугелев, А.В. Инновационный менеджмент / А.В. Гугелев. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2008. – 336 с.
2. Джой-Меттьюз, Д. Развитие человеческих ресурсов: [пер. с англ.] / Д. Джой-Меттьюз, Д. Меггинсон, М. Сюрте. – М.: Эксмо, 2009. – 432 с.

3. **Краснова, Н.В.** Развитие персонала компании / Н.В. Краснова. – М.: Московская финансово-промышленная академия, 2011. – 96 с.
4. **Матиашвили, В.М.** Управление организационными изменениями / В.М. Матиашвили. – Н. Новгород: НГТУ, 2011. – 45 с.

*Дата поступления  
в редакцию 12.12.2012*

**V.N. Startseva**

## **INTRODUCTION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF MOTIVATION OF THE PERSONNEL AS A SCIENTIFIC AND PRACTICAL PROBLEM OF MANAGEMENT**

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

**Purpose:** To consider the introduction of innovative technologies of motivation of the personnel as modern management issues from a scientific and practical points of view.

**Methodology:** The concept of human resources management, the theory of intellectual capital, the concept of organizational development and the concept of a learning organization.

**The results and their application area:** In this article, will be justified necessity, opportunities and benefits of implementation of innovative technologies motivation of the personnel in the practice of human resource management of modern organizations. The result of the research are the specific reasons for the refusal organizations from the introduction of innovative technologies of personnel motivation.

**Conclusions:** Developed and proven tools of diagnostics of the process of introduction of innovative technologies of personnel motivation can be used in the systems of the operational and strategic management of companies, used in systems of corporate training of employees, and also can be used in management consulting to improve the systems of motivation in local companies.

*Key words:* innovative technologies; motivation; the staff; the process of implementation; control system; diagnostics of the reasons of the refusal.

УДК 334.012.23

А.С. Узбекова<sup>1</sup>, К.И. Колесов<sup>1</sup>, Н.А. Шибанов<sup>2</sup>

## ПРОБЛЕМАТИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПОСТРОЕНИЯ КЛАСТЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Общество с ограниченной ответственностью «Центр деловой информации», г. Н. Новгород<sup>2</sup>

**Цель:** Выявление и поиск решений основных проблем, возникающих в ходе построения кластерных образований и их функционирования.

**Методология:** В ходе работы авторами выявлены основные проблемы, возникающие на различных стадиях построения кластерных образований. Исследованы сложности идентификации кластерных образований, учёта их рисков и их участников, количественной оценки синергетического эффекта кластера.

**Результаты:** Популярность кластеров как инструмента для решения отраслевых и региональных экономических проблем растёт, однако для полномасштабного и эффективного применения кластеров необходимо решить ряд задач как теоретического, так и практического характера. Недостаточным остаётся учёт отрицательных эффектов от организации кластеров, учёт рисков, с которыми сталкиваются как участники кластера отдельно, так и кластерное образование в целом, и интересов заинтересованных сторон.

**Выводы:** Решение обозначенных в статье проблем позволит повысить эффективность применения кластеров предприятий Нижегородской области.

*Ключевые слова:* кластер, кластерное образование, риск, синергия, лицо, принимающее решение, эффективность.

### Введение

Процессы глубокой трансформации экономической и политической жизни России обусловили смену типа экономической системы, а также форм хозяйственных отношений между экономическими субъектами. Последовательные попытки построения экономической модели, адекватной постоянно появляющимся новым вызовам и угрозам, предпринимаемые субъектами российской экономики, всё чаще стали приводить к заимствованиям результатов зарубежной экономической мысли.

Одним из механизмов организации и управления как отдельными хозяйственными образованиями, так и экономикой в целом является так называемый кластерный подход.

Являясь инструментом консолидации имеющихся преимуществ хозяйствующих субъектов, кластерный подход был призван разрешить сразу несколько проблем российской экономики. Это и выравнивание диспропорции регионального экономического развития, и придание дополнительного импульса развитию инновационному сектору системы. Кроме того, всё активнее стали пересматриваться взгляды на роль государственной власти в управлении экономикой страны. Изучение российской практики управления регионами свидетельствует об отсутствии устоявшегося подхода к развитию как отдельных территорий, так и хозяйственных образований, находящихся на таких территориях. На смену идее о приоритете рыночного саморегулирования экономики по этой причине стала приходить идея усиления роли государства в части инициирования механизмов рыночной инфраструктуры и развития конкуренции.

В настоящее время кластерная форма организации выступает в качестве одного из приоритетов промышленной политики, проводимой как на национальном, так и на региональном уровнях. Опыт развития зарубежных стран изобилует примерами высоких результатов, которых удалось добиться благодаря применению кластерного подхода. При этом и исследователи указанного опыта, и представители органов власти зачастую игнорируют необ-

ходимость принимать во внимание специфику российских подходов к хозяйствованию и высокую неопределённость российских макроэкономических условий. Кроме того, существует ряд трудностей, сопряжённых как с организацией кластеров, так и с процессом их функционирования: идентификация кластерных образований, учёт рисков кластерных образований и их участников, количественная оценка синергетического эффекта кластера.

### Идентификация кластерных образований

Само по себе понятие «кластер» (или «кластерное образование») традиционно применялось исследователями различных областей научного знания для описания некой группы объектов той или иной степени однородности, близости. В плоскости экономического знания понятие «кластер» по-прежнему является многозначным. Различия трактовок обусловлены как целями, для которых используется термин, так, очевидно, и национальными особенностями.

М. Портер, общепризнанный родоначальник теории кластерных образований, и вслед за ним иные авторы изначально отмечали простые, тривиальные проявления взаимодействий объектов в кластере. Необходимым и достаточным условием создания кластера являлось появление отношений «поставщик-клиент» или подобных им. Рассуждения такого рода наглядно прослеживаются в первоначальном определении кластера, сформулированном Портером: «промышленный кластер — ряд отраслей, взаимодействующих как покупатель-поставщик или поставщик-покупатель, а также посредством общих технологий, общих каналов закупок или распределения, общих трудовых объединений» [3].

Также отмечался фактор географической близости объектов кластера. Переработанный тем же Портером вариант термина стал звучать как «кластер – это группа географически соседствующих взаимосвязанных компаний (поставщики, производители и др.) и связанных с ними организаций (образовательные заведения, органы государственного управления, инфраструктурные компании), действующих в определенной сфере и взаимодополняющих друг друга» [3].

Проблематика построения кластеров нашла своё отражение и в работах, посвящённых региональной экономике и развитию региональных экономических систем. Одной из тенденций развития современного мирового хозяйства является регионализация. Экономическое пространство хозяйственной системы рассматривается как однородная внешняя среда для деятельности экономических субъектов и проявления экономических явлений. Кластер при этом обладает или может обладать свойствами, отличными от таковых условий, что содержит в себе определённый парадокс.

Принимая во внимание сказанное, следует отметить, что при всём обилии трактовок понятия «кластер» и существующем интуитивном понимании природы кластеров, однозначного алгоритма идентификации кластера не существует. Как отличить кластер от группы предприятий? Являются ли металлургический комбинат и несколько потребителей его продукции (например, автомобильных заводов) кластером? На эти простые на первый взгляд вопросы не так-то легко найти единственно верные ответы.

Безусловно, ситуация осложнена и фактическим отсутствием нормативной базы, регулирующей вопросы, связанные с функционированием кластеров. Методические рекомендации по реализации кластерной политики в субъектах Российской Федерации и Распоряжение Правительства России от 17 ноября 2008 г. N 1662-р, посвящённое Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, остаются теми немногими документами, хотя бы как-то касающимися вопросов кластерной политики государства.

Принято выделить следующие черты кластеров, позволяющие идентифицировать их как самостоятельные объединения объектов: синергетический эффект, специализация, наличие нормативно заданных параметров кластера.

Синергетический эффект как «совместное, содружественное, взаимозависимое дей-

ствие двух или нескольких сил, агентов, факторов в каком-либо одном направлении; кратный эффект, полученный в результате слияния отдельных частей в единую систему» [10], является одним из наиболее характерных признаков, присущих кластеру. И наоборот, отсутствие у группы объектов синергии часто выделяется как аргумент того, что перед исследователем не кластер, а простая группа объектов. Вместе с тем, следует обратить внимание на то, что на определённых этапах существования кластера синергетический эффект может не проявляться или проявляться в виде антисинергии. Поэтому однозначная идентификация кластера лишь на основании этого признака затруднительна.

Специализация — один из первых выявленных признаков кластера, постепенно теряющих свою значимость. Мультиспециализация объектов отдельных кластеров, трансграничность самих кластеров и иные, имевшие место, метаморфозы ныне не позволяют однозначно проследить причинно-следственные связи на уровне «специализация — кластер».

Нормативно заданные параметры кластера в настоящий момент являются наиболее рельефным признаком, позволяющим однозначно проводить тест на наличие кластера. Предприятия фактически «назначаются» в кластер решением заинтересованных лиц (представителей бизнеса или государственной власти), определяются границы кластера, порядок внутренних и внешних его связей. Для исследователя в такой ситуации отсутствует необходимость каким-либо иным образом идентифицировать кластер.

Существуют и иные признаки кластера, часть из которых является спорными: производственно-технологическая взаимосвязь компаний, формирующих кластер; территориально-производственная общность взаимосвязей; наличие развитой инфраструктуры, обеспечивающей трансфер знаний и технологий, гибкость состава и структуры.

### **Учёт рисков кластерных образований и их участников**

Ещё одним важным аспектом организации и функционирования кластеров можно назвать оценку рисков. При этом речь идёт как о рисках самого кластера, так и рисках объектов, составляющих кластер, и объектов, не вступивших в кластер.

При изучении рисков кластерных образований стоит рассматривать следующие виды рисков: ценовой, риск ликвидности, валютный, структурный, процентный, кредитный, риск банкротства и снижения финансовой устойчивости, а также иные виды финансовых рисков.

Кластер как совокупность взаимовлияющих процессов существует под перманентным воздействием факторов внешней среды и внутренних сил. Процесс управления предприятием сводится к общеизвестному многошаговому процессу. Управление есть воздействие с целью уменьшения или ликвидации различий между категориями «то, что есть» и «то, что должно быть». Оценка обеих этих категорий базируется на вычислении неких параметров, само вычисление производится с помощью набора специальных методик. Правильно выбрать методику расчётов и учесть все её недостатки и ограничения — необходимое условие для выбора корректного управленческого решения.

В части оценки рисков кластеров существует необходимость расчета рисков участников кластера до и после вступления в кластер, совокупных рисков всего кластера по состоянию на определённый момент времени, влияния существования кластера на совокупный риск регионального хозяйства.

В теории и практике современного риск-менеджмента принято использовать концепцию портфельных инвестиций. При этом фактически кластер может быть рассмотрен как портфель и, как следствие, инструментарий портфельной теории может быть применён для оценки рисков кластеров. И если в рамках портфельной теории инвестирования лицо, принимающее решение, оперирует так называемой диверсификацией, добиваясь снижения общего риска портфеля, то в ходе кластеризации аналогичную роль сможет играть уже упомянутая выше синергия. Проводя столь концептуальные параллели, исследователь получит в своё распоряжение разработанный инструментарий, имеющий хорошо известные ограничения и допущения.



Среди целевых установок, которые существуют перед создателями любого кластера, должна быть и установка по снижению рисков каждого из участников кластера. При этом в данный момент весьма редким является даже простое упоминание этапа риск-менеджмента как части алгоритма построения кластеров. Хотя он, этот этап, безусловно, должен быть в такой алгоритм включён. В этой связи следует внедрить проведение исследования на предмет установления динамики рисков предприятий, их сравнения в состояниях «до кластера» и «после кластера». На основании таких исследований группа рассмотренных предприятий кластера может быть поделена на условные подгруппы в зависимости от изменчивости показателей рисков таких предприятий. Будут выделены предприятия как с положительной, так и с отрицательной динамикой указанных показателей. Для последних из указанных предприятий, возможно, стоит принять решение об отказе вступления в кластер или выходе из него. Таким образом, будет решена проблема оценки негативных влияний кластеров на отдельные предприятия.

Подавляющее большинство исследователей в своих работах уделяют особое внимание положительным последствиям, которые способно повлечь за собой внедрение кластеров. Кластерный подход прочно занял место среди инструментов реформирования и модернизации систем хозяйствования различного уровня. Так, например, Сташевская Г.Н. в своей научной работе указывает: «Кластерные образования обеспечивают своим участникам ряд серьезных конкурентных преимуществ: устойчивую систему распространения новых знаний, технологий, продукции; возможность внутренней специализации и стандартизации, минимизации затрат на внедрение инноваций; облегчают доступ к капиталу, выход на межрегиональные и международные рынки...» [8].

Может быть выделен перечень возможных негативных результатов построения кластеров: мультиплицирование рисков участников кластера, неэффективное перераспределение ресурсов внутри, отсутствие целеполагания, административное давление, проблема внутренней зависимости участников и иные.

Трудности оценки негативных последствий возникают из-за невозможности моделирования последствий для участников кластера до его создания. Ретроспективный сценарный анализ «что, если...» не всегда предполагает однозначные ответы, по причине чего исследователь лишён базы для оценки эффективности работы кластера.

### **Количественная оценка синергетического эффекта кластера**

Как отмечалось выше, подавляющее большинство существующих исследований в области организации кластеров фактически не опирается на приведённый тезис о принципиальной возможности наличия отрицательной синергии. При этом причиной подобной ориентации механизмов исследования может быть игнорирование того факта, что в рамках кластерного образования принципиально важными являются не только и не столько сочетания потенциалов, сколько их согласованное поведение и внутренние связи.

В рамках кластера могут быть выделены следующие, находящие своё проявление формы синергии: синергия масштаба, синергия труда, синергия продаж, оперативная синергия, синергия инвестиций, синергия среды, синергия менеджмента.

Невозможность или затруднительность количественной оценки синергии, игнорирование этого этапа исследования могут приводить к выдвижению априорных гипотез, не имеющих подтверждения, к управленческим ошибкам на основе таких гипотез. Речь, в частности, может идти об уже упоминавшихся безоговорочно признаваемых положительных последствиях создания любого (или почти любого) кластера.

Ряд исследователей при этом выдвигают принципиально иную логику построения понятийного аппарата: кластером признаётся лишь такое объединение объектов, которое обес-

печивает положительный синергетический эффект. Такое искусственное сужение термина «кластер» способно приводить к значительным методическим и управленческим последствиям. Более правильным видится определение некоторых границ количественной оценки синергии, назначение правил таковой оценки, разграничение кластеров с положительной и отрицательной синергией.

Если говорить о методических аспектах количественной оценки синергии в рамках кластерного образования, то возможно принципиально выделить следующие направления оценки.

Во-первых, оценка может быть проведена путём сравнения результирующих показателей деятельности кластера и показателей группы предприятий в состоянии «без кластера». Это могут быть как абсолютные, так и относительные показатели. В частности, это может быть сокращение удельных затрат либо увеличение показателей прибыли при заданном уровне инвестиций.

Во-вторых, зачастую организация кластера преследует политические цели, связанные с поддержанием предприятий, относимых к определённым видам экономической деятельности либо определённой территории. В таких случаях предприятия кластера могут получать субсидии из бюджетов различного уровня либо инвестиционные вливания на льготных условиях, налоговые льготы. В таком случае по формальному признаку указанные внешние воздействия системы также можно отнести к дополнительному эффекту существования кластера.

Безусловно, большой интерес вызывают оценки первого типа. Их методическая трудность заключена в выборе адекватного метода прогнозирования состояния предприятий «без кластера».

### Выводы

Таким образом, при всей политической привлекательности кластер сам по себе, очевидно, не способен стать абсолютно эффективным средством выхода российской экономики из депрессивного состояния. Популистское применение кластеров, их «назначение» в качестве «спасительных» методов ведения хозяйства может лишь усугубить положение.

Также весьма спорной является и практика импорта опыта применения кластеров без корректив в соответствии с условиями внешней среды.

Исследование, проведённое по данным финансово-хозяйственной деятельности предприятий атомной отрасли Нижегородской области, подтвердило приведённые выше тезисы. Выявленные положительные и отрицательные эффекты кластеризации могут быть использованы для корректирования политики управления отраслью.

### Библиографический список

1. **Бородина, Е.А.** Роль экономических кластеров в повышении конкурентоспособности регионов РФ: дисс. ...канд. эконом. наук / Е.А. Бородина. – Волгоград. 2008. – 195 с.
2. **Волкова, Н.Н.** Промышленные кластеры / Н.Н. Волкова, Т.В. Сахно. – Полтава: АСМИ, 2005. – 282 с.
3. **Портер, М.** Международная конкуренция / М. Портер. – М.: Международные отношения, 1993. – 896 с.
4. **Пятинкин, С.Ф.** Развитие кластеров: сущность, актуальные подходы, зарубежный опыт / С.Ф.Пятинкин, Т.П. Быкова. – Минск: Тесей, 2008. – 72 с.
5. **Соколенко, С.И.** Производственные системы глобализации: Сети. Альянсы. Партнёрства. Кластеры / С.И. Соколенко. – Киев: Логос, 2002. – 646 с.
6. **Сташевская, Г.Н.** Формирование механизма развития инновационного кластера на базе профильного технопарка: дисс. ... канд. эконом. наук / Г.Н. Сташевская. – СПб., 2009. – 176 с.
7. **Узбекова, А.С.** Анализ современного российского корпоративного законодательства. Проблемы и их решение // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96). С. 347.

8. **Хасанов, Р.Х.** Синергетический эффект кластера // Менеджмент в России и за рубежом. 2008. №3. С. 24-32.
9. **Цихан, Т.В.** Кластерная теория экономического развития // Теория и практика управления. 2003. №5. С. 74-81.

*Дата поступления  
в редакцию 12.12.2012*

**A.S. Uzbekova<sup>1</sup>, K.I. Kolesov<sup>1</sup>, N.A. Shibano<sup>2</sup>**

## **THE PROBLEMS OF IDENTIFICATION AND FORMATION OF COMPANY'S CLUSTER FOUNDATIONS IN NIZHNY NOVGOROD REGION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Limited Liability Company «Center of business information», N. Novgorod<sup>2</sup>

**Target:** Solving main problems while constructing and operating cluster foundations.

**Methodology:** In research progress the author has detected main problems arising during different stages of formation cluster foundations. The complexity of identification of cluster foundations with its risks, its participants risks and quantification of its synergy effect were analyzed.

**Results:** Popularity of cluster foundations as an instrument for solving a whole industry's and regional economical problems is growing up. However for a full-scale and effective use it is necessary to fix some methodical difficulties. Recognition of negative effects while constructing cluster foundations, its risks and interests of stakeholders remains insufficient.

**Conclusion:** The solution of article's identified problems can help increasing the efficiency of using company's cluster foundations in Nizhny Novgorod region.

*Key words:* cluster, cluster foundation, risk, synergy, decision-maker, efficiency.

УДК 338.45

С.Н. Яшин, Т.И. Ермакова, Н.А. Мурашова

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВЫПУСКНИКОВ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В ИННОВАЦИОННОМ РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье отмечается, что при переходе к инновационному развитию повышение качества рабочей силы становится как предпосылкой, так и фактором формирования современной конкурентоспособной национальной экономики. Рассмотрены некоторые аспекты конкурентоспособности работника и факторы ее повышения. Предложены меры по совершенствованию высшего профессионального образования.

*Ключевые слова:* конкурентоспособный работник, инновационное развитие, квалифицированная рабочая сила, образование, повышение квалификации.

Экономическое развитие нашей страны на современном этапе связывают с переходом экономики на инновационную социально-ориентированную модель развития [1]. Учитывая тот факт, что инновация представляет собой материализованный результат, полученный от вложения капитала в новую технику или технологию, в новые формы организации производства, обслуживания, управления и т.п., следовательно, необходимо сформировать экономику лидерства и инноваций. В рейтинге Doing Business, Россия, хотя и поднялась на четыре позиции, все еще занимаем 120-е место. По оценке Банка России в 2011 г. отток капитала из России составил 80 млрд долларов. А это, по сути, качество инвестиционного климата [7].

Инновации являются прямым результатом интеллектуальной деятельности, умственного труда. В современной экономике роль инноваций значительно возросла. Без применения инноваций практически невозможно создать конкурентоспособную продукцию, имеющую высокую степень наукоемкости и новизны. Таким образом, в рыночной экономике инновации представляют собой эффективное средство конкурентной борьбы, так как ведут к созданию новых потребностей, к снижению себестоимости продукции, к притоку инвестиций, к повышению имиджа (рейтинга) производителя новых продуктов, к открытию и захвату новых рынков, в том числе и внешних. Согласно Концепции долгосрочного развития Российской Федерации на период до 2020 г., Россия к 2020 г. должна занять 5-10% на рынках высокотехнологичных и интеллектуальных услуг по 5-7 позициям, повышение в два раза доли высокотехнологичного сектора в ВВП (с 10,9 до 17-20%), увеличение в пять-шесть раз доли инновационной продукции в выпуске промышленности, в четыре-пять раз – доли инновационно активных предприятий (с 9,4 до 40-50%) [1].

По оценке ИМЭМО РАН, производительность труда в российской экономике составляет 27% от уровня США и 42% от уровня Германии и Японии [3]. Это означает, что по эффективности наша экономика находится примерно на уровне западноевропейских стран 1960-х годов и Южной Кореи начала 1990-х годов. Низкие показатели производительности российских предприятий и компаний объясняются разными причинами. Главные из них: технологическая отсталость, устаревшее оборудование (в среднем 83% износа) и низкая квалификация кадров. Однако исследования, проведенные Центром по исследованию динамично развивающихся рынков «Эрнст энд Янг», показали:

- доля грамотного населения в России приближается к 100%;
- 75% выпускников средних школ продолжают обучение в вузах;
- Россия является одним из мировых лидеров в области подготовки специалистов по

точным и инженерным наукам, доля которых значительно выше среднего показателя для стран членов ОЭСР [7].

Президент Российского союза промышленников и предпринимателей Александр Шохин отмечает, что, согласно мнению иностранных инвесторов, в России достаточно кадров нужной квалификации, в то время как позиция российских предпринимателей прямо противоположна [7]. Расходы на высшее образование возросли более чем в три раза по сравнению с 2005 г., достигнув в 2011 г. 390 млрд руб. (приблизительно 14,5 млрд долл. США). Вместе с этим, расходы на образование остаются низкими по сравнению со странами-членами ОЭСР. В этой связи вопрос об обновлении программы университетского образования для обеспечения более полного соответствия требованиям рыночной экономики является весьма актуальным [7]. Следовательно, решить эту проблему можно только за счет кардинальной модернизации техники и технологий, кадровой, управляющей и инфраструктурной базы.

Только инновационное развитие позволит нашей стране сохранить уже завоеванные в конкурентной борьбе позиции на мировом рынке и, возможно, занять какие-то новые ниши. Это в условиях экономики, стремящейся уйти от сырьевой специализации, имеет немаловажное значение. Поэтому одной из важнейших задач и одновременно предпосылок инновационного развития является формирование современной конкурентоспособной национальной экономики, способной на равных взаимодействовать с другими центрами силы в мировой экономике – США, ЕС, Китаем.

Под конкурентоспособностью обычно понимают способность какого-то товара или экономического агента выдержать сравнение с аналогичными товарами или агентами, а также превзойти конкурентов по определенным параметрам в данных экономических условиях. Конкурентоспособность страны можно определить как способность достичь более высокого по сравнению с другими странами темпа экономического роста на основе более высокого уровня производительности экономических ресурсов (факторов производства).

За 2000-2010 годы наша страна практически удвоила подушевой ВВП в валютном выражении и сократила разрыв с уровнем производительности труда в США (с 75% до 60%), но отстала от стран-лидеров по уровню накопления инновационного потенциала [8]. Согласно данным исследовательского центра Heritage Foundation, рейтинг экономической свободы России составил на 12 января 2012 г. 50,5 баллов из 100 (при среднем показателе в мире 59,5 балла). Следует отметить, что государства, получившие оценку ниже 50 баллов, рассматриваются центром уже как «несвободные». Наша страна находится на 144-м месте, замыкая список «преимущественно несвободных» экономик, и отставая не только от Китая - 138-е место, но и от Бразилии и Индии, занимающих соответственно 99-е и 133-е место в рейтинге экономической свободы [8].

Экономическая свобода – не единственный критерий экономического успеха, однако, и в других, более комплексных рейтингах, в частности рейтингах Международного института управленческого развития (*IMD*) и Всемирного экономического форума (*WEF*), положение России далеко не соответствует ее базовому потенциалу. Россия, обладающая большим объемом внутреннего рынка природных ресурсов (все это есть у Бразилии, Китая, Южной Африки), а также качественной рабочей силы, должна была бы занимать более высокое положение [8].

Согласно исследованию *IMD*, в 2011 г. Россия занимала 49-е (из 59 стран) место в рейтинге конкурентоспособности стран мира. В 2001-м страна занимала 43-е место – такое же, как и в 2011-м без учета новых стран, вошедших в рейтинг. Индия и Китай в тот же период не только находились выше, но и показывали лучшую динамику. Так, Индия поднялась на 10 позиций (32-е место в 2011 г.), Китай – на 7 (19-е место). Лишь Бразилия оказывалась в рейтинге ниже России, и то два раза (в 2004 г. и 2007 г.) и опустилась за 11 лет на четыре позиции до 44 места. Оценки социальной и институциональной среды – компонент эффективности государства по *IMD* – это достаточность защиты личной безопасности и частной собственности, честность судебной системы, политическая стабильность, прозрачность госу-

дарственной политики, отсутствие бюрократии и коррупции для России ниже, чем для Бразилии, Индии или Китая. Бизнес-среда, ведение бизнеса в стране остается крайне трудным делом, а законодательная поддержка создания фирм за 10 лет улучшилась незначительно. Утечка «мозгов» в России препятствует конкурентоспособности экономики гораздо сильнее, чем в других странах БРИК, а по способности привлекать иностранных специалистов страна опустилась с первой на последнюю позицию по сравнению с остальными быстроразвивающимися странами [8].

Согласно рейтингу Всемирного экономического форума (*WEF*) за 2011-2012 годы, наша страна занимает 66-е место из 142-х. Россия оказалась позади не только развитых, но и многих развивающихся стран (других членов БРИК). За период с 2005 г., когда методология расчета индекса глобальной конкурентоспособности *WEF* значительно изменилась, Россия, находившаяся среди стран БРИК на 3-м месте (после Индии и Китая), ухудшила свое положение по отношению к Бразилии и переместилась на последнюю позицию. За это время Китай, наоборот, вошел в тридцатку наиболее конкурентоспособных стран. Индекс глобальной конкурентоспособности России последние три года находится на неизменном уровне 4,2 (из 7) балла. Согласно оценкам *WEF*, соответствие базовым макроэкономическим требованиям и эффективность бизнес-среды в России за прошедшие семь лет немного улучшились. Наилучшую динамику показали уровень развития инфраструктуры и технологический уровень (+0,8 балла до значений 4,5 и 3,7 соответственно). Показатели здоровья, начального образования, высшего образования и профессиональной подготовки снизились. Ухудшился и уровень совершенства бизнеса, в частности конкурентоспособность компаний и инновационный потенциал. Особенно низкие оценки страны в 2011 г. наблюдались по показателям уровня развития институтов и финансовых рынков, эффективности товарных рынков и организации бизнеса [8]. Следовательно, российская экономика зачастую примитивна и неэффективна (разрыв в оплате труда внутри российских компаний неразумен, а государство еще хуже исполняет свои функции и нуждается в глубоком реформировании).

При этом Россия по уровню среднедушевого ВВП заметно (от 1,5 до 5 раз) выше партнеров по БРИК, это означает, что их институты ей не подходят. По уровню почасовой производительности труда Россия тоже выше (в 2-5 раз), а вот эффективность зарплат («зарплатотдача») в стране в два раза ниже [8]. Следовательно, удержать уровень жизни в России от падения нельзя без стремительной модернизации. Однако этого, опираясь на пенсионеров, синих воротничков и сырьевую техноструктуру, не осуществить, следовательно, необходимы высококвалифицированные кадры.

Рассмотрим более подробно этот аспект данной проблемы – увеличение производительности через повышение качества рабочей силы, которая в условиях формирования «экономики знаний» становится основополагающим фактором инновационного экономического развития. Следует отметить, что в большинстве стран уже признано, что человеческий потенциал составляет главное национальное богатство. Именно от качества рабочей силы, человеческого потенциала зависят темпы научно-технического прогресса, эффективность национального производства, его конкурентоспособность на мировом рынке.

Наша страна вступила в ВТО и интегрируется в мировую экономику. Для повышения конкурентоспособности российской экономики необходимо формирование конкурентоспособного работника, который был бы способен участвовать в современных технологических процессах, причем, прежде всего, в реальном секторе экономики.

Повышение конкурентоспособности экономики на основе воспроизводства качественного трудового потенциала страны является двойственным процессом, так как, с одной стороны, этот процесс зависит от экономики, а с другой – сам влияет на нее.

Высшее образование сегодня значительно отличается от высшего образования предыдущих периодов, что влечет за собой ряд изменений как в содержании, так и в организации обучения. Прогресс не возможен без изменений, следовательно, современные технические нововведения – первопричина изменений технологических процессов, изменений в управле-

нии этими процессами и в подготовке специалистов. Однако сегодня масштабы и скорость изменений столь высоки, что разработана система управления изменениями, а скорость устаревания знаний растет. В итоге, по окончании освоения образовательной программы в учебном заведении студенты должны обновить свои профессиональные знания. В этой связи необходимо непрерывное «пожизненное» обучение. А изменения экономической обстановки в стране сказываются на необходимости периодической профессиональной переориентации специалистов на разных этапах их карьеры. Следовательно, учебное заведение не просто должно передать студентам определенный объем знаний, оно должно научить поиску и анализу необходимой информации, а также процессу получения знаний.

Образовательное учреждение сегодня должно предоставлять образовательные программы, отвечающие потребностям и нуждам потребителей (студентов и слушателей, будущих работодателей, рекрутинговых агентств, абитуриентов, государственных органов образования, общества в целом), а не согласно ресурсам, которыми оно обеспечено.

Сегодня, когда спрос на квалифицированные кадры всех уровней – от рабочего до специалиста с высшим образованием – значительно возросла потребность в воссоздании на качественно ином уровне системы образования, отвечающей требованиям рынка труда и общественным отношениям.

Особенно важно рассматривать систему образования как последовательный инновационный процесс общей и профессиональной подготовки в учебных заведениях различных уровней (школа, техникум, вуз и т.д.), и как процесс обучения человека на протяжении всей жизни, с целью повышения его профессиональных и личностных качеств до уровня, отвечающего требованиям текущего момента времени. Поскольку мотором инновационной деятельности являются творческие, высокопрофессиональные в соответствующей области деятельности личности как особый тип творческих личностей.

Противоположность инновационной и традиционной личностей четко представлена на основе их характеристик в табл. 1, которую построил Эверетт Хаген [4].

Посеяв мотивацию достижения, пожнешь урожай экономического роста, потому что в поведенческом аспекте эта мотивация связана с мобильностью, направленной вверх, долгими часами работы, желанием накопить капитал, предпринимательской активностью.

Инновационность экономики складывается из технико-технологических, структурных, институциональных и других составляющих. Эти компоненты инновационности могут реализоваться самими работниками, чей уровень профессионализма, адаптивных способностей соответствует общественным потребностям. Хотя возросший технико-технологический уровень производства, трудосберегающие технологии, совершенствующиеся информационные системы служат ориентирами для развития работников.

Повышение качества рабочей силы, ее конкурентоспособности может осуществляться, во-первых, если существует общественная потребность в этом, во-вторых, если люди стремятся участвовать в производительной деятельности и соответственно расти профессионально, и, в-третьих, если государство может принимать участие в процессе качественного совершенствования рабочей силы и ее использования.

Что касается государства, то основным направлением государственной политики в образовании становится распространение на эту сферу рыночных отношений. Так, целью политики модернизации образования в среднесрочной перспективе в федеральной целевой программе развития образования названо обеспечение конкурентоспособности России на мировом уровне, а ее достижение может быть обеспечено за счет оптимального соотношения затрат и качества в сфере образования и науки. В рамках данной программы решаются программы ориентации системы образования на рынок труда (но не на потребности населения), перехода на нормативное финансирование образовательных учреждений (приближение финансирования по форме к оплате образовательных услуг – модель «образование как товар»). Таким образом, в основу модернизации образования закладываются, прежде всего, экономические подходы.

Таблица 1

**Важнейшие характеристики инновационной и традиционной личностей**

Важнейшие характеристики	Инновационная личность	Традиционная личность
Отношение к действительности	Отношение к миру характеризуется любознательностью и стремлением управлять (манипулировать) им, с целью воздействия на различные явления и их контроля	Согласие с образцами жизни, диктуемыми традицией и авторитетами
Понимание роли индивида в мире	Принятие на себя ответственности за плохие стороны жизни, сопряженное с потоком лучших решений и попытками внести изменения	Покорность, послушание, стремление избегать ответственности и потребность в зависимости
Стиль лидерства	Откровенность и терпимость к подчиненным, одобрительное отношение к их оригинальности и стремление к новациям	Твердость (жесткость, непреклонность), возвышенные надежды и строгие требования к подчиненным

При рассмотрении первой составляющей процесса следует обратить внимание на тенденции, характерные для мировой экономики в настоящее время, когда постоянно совершенствуется технико-технологическая база производства и повышается квалификация работников. Ключевые для инновационной экономики личностные качества – мобильность, желание обучаться в течение всей жизни, склонность к предпринимательству и принятию риска – также не являются пока характерными особенностями хотя бы значимой части населения страны. В России, по данным Росстата, участие населения (в возрастной группе 25-64 лет) в непрерывном образовании в 2008 г. составило 24,8%. При этом в странах с высокой инновационной активностью этот показатель намного выше: Великобритания – 37,6%, Германия – 41,9%, Финляндия – 77,3% [1].

В экономически развитых странах большинство работников занято умственным трудом (численность работников, занятых преимущественно умственным трудом, за последние 20 лет увеличилась примерно на 10%). Эти изменения происходят вслед за международным движением капитала, когда транснациональные корпорации из экономически развитых стран, используя относительную дешевизну рабочей силы, размещают трудоемкие производства в развивающихся странах. В развитых странах соответственно снижается потребность в менее квалифицированной рабочей силе и растет спрос на высококвалифицированную. Так, в США постоянно ощущается нехватка сотен тысяч квалифицированных специалистов и рабочих.

Подготовка высококвалифицированной рабочей силы требует больших капиталовложений и времени. Кроме подготовки собственных квалифицированных кадров, США используют квалифицированных работников из других экономически развитых стран, размещая там высокотехнологичные производства, необходимые для американской экономики, и переводят в развивающиеся страны производства, для которых не нужны высококвалифицированные работники. Довольно широко используются так называемые «домашние офисы» за рубежом США, т. е. осуществляется виртуальный импорт рабочей силы [5].

По некоторым оценкам, чистый выигрыш для США от привлечения в страну одного квалифицированного специалиста составляет в зависимости от профессии от 230 до 650 тыс. долл. экономии на подготовке собственных кадров.

По данным Британского королевского общества, опубликованным в марте 2011 г., по количеству научных публикаций в 2004-2008 гг. Китай поднялся на 2-е место и уступает



только США. (В момент образования КНР в 1949 г. доля неграмотного населения в Китае достигала 80%). Как признают сами китайцы, в реформе системы образования наиболее важным является то, что образование и наука оставались и остаются подчиненными задачам развития экономики. В начале 1980-х годов китайское правительство изменило систему среднего образования, перепрофилировав часть средних школ в профессиональные учебные заведения или в сельскохозяйственные профучилища. В результате доля выпускников таких училищ по отношению к числу оканчивающих среднюю школу второй ступени выросла с 4,1% в 1979 г. до 42,9% в 2009 г. Из 45 000 научных институтов и центров, работающих ныне в КНР, 82,1% НИИ специализируются на инженерно-технических исследованиях и только 3,9% – на гуманитарных и философских. Научные исследования все более активно финансируются бизнесом. Если в 1991 г. 28,5% всех ассигнований на научные исследования и конструкторские разработки осуществлялись за счет бизнеса, то в 2009 г. эта доля выросла до 71,7%. В среднем, начиная с 1990 г., ежегодный рост расходов на НИОКР составил 22%. Абсолютные цифры впечатляют еще больше: в том же 2009 г. только малые и средние негосударственные предприятия выделили на эти цели 285,2 млрд юаней (43,2 млрд долл.) [5].

Наша страна также нуждается в квалифицированных работниках, однако пути решения данной проблемы еще намечаются. В прошлом веке А. Маршалл заметил: «Ничто так не будет способствовать быстрому росту материального богатства, как совершенствование нашего школьного образования, особенно средней школы, при условии, что оно будет сочетаться с введением широкой системы стипендий, которая позволила бы умному сыну рабочего человека последовательно переходить из школы одной ступени в другую, пока он не овладеет самыми лучшими теоретическими и практическими познаниями, какие может дать наша эпоха» [6]. Практика развитых стран это подтверждает.

Но подготовленные в России высококвалифицированные специалисты не всегда могут найти интересующую их работу по специальности. Часть работников уезжает из страны, так, экономический ущерб от миграции ученых составляет около 25 млрд долл. Страны, принимающие российских ученых, получают ощутимую выгоду. Например, по оценкам специалистов, наши мигранты обеспечивают около 1/4 американского хай-тека, что равно примерно 10% мирового рынка [7]. Широко стали известны имена российских ученых – лауреатов Нобелевской премии, ныне работающих в Великобритании и прославившихся открытием графена. Нехватку низкоквалифицированного труда наша страна восполняет во многом миграцией из стран СНГ и некоторых развивающихся стран. Тем самым Россия теряет в конкуренции с развитыми и развивающимися странами.

В нашей стране с начала перехода к рыночным условиям идет процесс изменения форм занятости, что отражается на образовательном уровне в соответствии со статусом работника.

На малых предприятиях (кроме постоянно работающих) работает персонал, привлекаемый на условиях совместительства по договорам гражданско-правового характера. Малые предприятия, представляющие собой новый частный сектор, привлекают до 15 % занятых в экономике, примерно 1/3 из них – это вторичная занятость, дополнение к основной работе. Можно предположить, что эта категория работников – профессионально подготовленные и экономически активные люди, чье качество рабочей силы дает им возможность ориентироваться в конъюнктуре рынка труда.

Одной из характеристик экономической активности населения является численность лиц, работающих не по найму. По сравнению с постсоветскими республиками и европейскими странами с переходной экономикой (в 2004 г. в Казахстане численность лиц, работающих не по найму, составляла примерно 38 %, в Армении – 52%, в Молдове – 36%, в Восточной Европе – около 40%) в нашей стране эта доля составила в том же году около 6% занятых. Для лиц, работающих не по найму, характерен более низкий уровень профессионального образования по сравнению с занятыми в целом, и особенно в сравнении с работающими по найму [3]. Представляется, что это положение объясняется структурой и содержанием тру-

довой деятельности работающих не по найму. Среди работающих не по найму преобладают самозанятые, ведущие мелкую торговлю, занимающиеся ремонтом квартир, транспортных средств, оказанием бытовых услуг и подобными видами деятельности. Такого рода деятельность не требует высокого уровня профессионального образования, позволяя обходиться личными трудовыми навыками.

Выполняя важные социально-экономические функции на данном этапе развития экономики нашей страны (поддержание занятости и получение доходов частью населения), данная форма трудовой активности не является технологически прогрессивной. Эта занятость обеспечивает высокую индивидуализацию при общении с потребителями, чего не может дать индустриальная занятость, но сама она может только поддержать достигнутое качество и эффективность труда.

До последнего времени наблюдается рост числа высших учебных заведений в РФ, в настоящее время насчитывается 1100 вузов и 2000 филиалов вузов. Таким образом, несмотря на снижение количества выпускников средних школ за последние 10 лет (почти в два раза), количество студентов вузов выросло за то же время в 1,5 раза. С одной стороны, налицо продолжающаяся так называемая «демографическая яма», с другой – рост лиц, желающих получить высшее образование. Одновременно в 1,3 раза уменьшилось количество вновь подготовленных квалифицированных рабочих. Следовательно, в России формально происходит довольно успешное развитие образования, это свидетельствует о том, что высшее образование является одним из динамично развивающихся секторов экономики (табл. 2).

Таблица 2

## Данные по системе образования России

	2000 г.	2005 г.	2010 г.
Численность получивших аттестат о среднем (полном) общем образовании, тыс.чел.	458	1466	789
Число образовательных учреждений начального профессионального образования (НПО), ед.	3893	3392	2356
Число образовательных учреждений среднего профессионального образования (СПО), ед.	2 703	2 905	2 850
Число образовательных учреждений высшего профессионального образования (ВПО), ед.	965	1 068	1 115
Численность обучающихся в учреждениях НПО, тыс.чел	1679	1 509	1 007
Численность обучающихся в учреждениях СПО, тыс. чел	2 361	2591	2 126
Численность обучающихся в учреждениях ВПО, тыс.чел	4741	7064	7419
Подготовлено в системе НПО квалифицированных рабочих, тыс. чел	763	703	581
Выпущено специалистов учреждениями СПО, тыс.чел.	579	684	572
Выпущено специалистов ВПО, тыс. чел.	635	1151	1468

Свидетельством этого является количество студентов высших учебных заведений нашей страны. В 1990-1991 гг. в вузах обучалось 2 824,5 тыс. студентов, в 2003-2004 гг. - 5 555,4 тыс. студентов, в 2005-2006 гг. – 7064 тыс. студентов, в 2009-2010 гг. – 7419 тыс. студентов. Доля населения без образования и с начальным общим образованием составляет в России менее 2 % (один из самых низких показателей среди стран Организации экономического сотрудничества и развития – ОЭСР). По охвату общим образованием населения в возрасте от 7 до 17 лет (99,8%) Россия превосходит большинство стран ОЭСР. Россия входит в число мировых лидеров по численности студентов программ третичного образования. Этот

результат обеспечен более высокой долей среднего профессионального образования, в то время как по уровню населения с высшим образованием Россия соответствует средним значениям по странам ОЭСР.

В настоящее время все развитые государства мира реализуют программы формирования систем непрерывного образования (обучения на протяжении всей жизни – *lifelong learning*). Ведущие страны Евросоюза смогли обеспечить массовое участие взрослого населения в программах обучения и тренингах либо устойчивую положительную динамику в этой сфере. Доля экономически активного населения развитых европейских стран, участвующего в непрерывном образовании, достигает 60-70%. В Российской Федерации доля экономически активного населения, участвующего в непрерывном образовании, в настоящее время не превышает 22,4%.

Развитие экономики предъявляет новые требования к структуре и качеству подготовки специалистов и рабочих кадров. Необходимы целенаправленные усилия для преодоления диспропорций. Повышение качества пришло в противоречие с расширением доступности профессионального образования – в колледжи и вузы поступают десятки тысяч выпускников школ с низкими баллами ЕГЭ. Очевидна тенденция расширения конкуренции между традиционными организациями профессионального образования и новыми системами корпоративной подготовки (корпоративные университеты, тренинговые компании, системы внутрифирменной подготовки кадров).

Кроме того, в образовательной структуре с начала 1990-х годов проявились следующие тенденции: во-первых, это сокращение удельного веса тех, кто не имеет профессионального образования. Данная тенденция свидетельствует о востребованности нашего экономического роста уровню формального образования. Второй тенденцией является возрастающая поляризация тех, кто имеет профессиональное образование. Увеличение удельного веса работающих с высшим образованием говорит о росте спроса на новые для нас «рыночные» профессии – менеджеры, юристы, экономисты различных специальностей. Возросли требования к имеющим образование работникам вследствие изменения содержания их деятельности в условиях рыночной экономики.

Однако коренных преобразований в структуре российской экономики за годы рыночной трансформации не произошло. Физический и моральный износ основных фондов привел к снижению сложности технологических операций и среднего уровня квалификации рабочей силы. В производственной сфере произошла консервация низкоквалифицированного труда, доля которого в промышленности, по оценкам, составляет 20-40% [7]. В связи с этим замечен рост удельного веса занятых с начальным профессиональным образованием и некоторое снижение удельного веса имеющих среднее профессиональное образование.

Работодателю нужен квалифицированный работник, способный выполнять определенные функции. Сегодня, диплом об образовании – не главное, но для оценки уровня квалификации нужны определенные, порой немалые, затраты. Поэтому доверяются формальному документу, удостоверяющему квалификацию.

Необходимо восстановить систему начального и среднего профессионального образования, а также серьезно разрушенные связи между образованием и народным хозяйством. Возможно, как считают некоторые специалисты, следует возродить систему распределения выпускников вузов и техникумов.

Известно, что отечественные вузы дают разный уровень подготовки своим выпускникам. Ориентированные изначально на высокую заработную плату, а чаще – на получение материальных и нематериальных льгот, они стремятся получить диплом о высшем образовании с наименьшими затратами труда. Поэтому вузы не равноценны по качеству своей работы, но даже откровенно слабые делают «наборы» из тех молодых людей, кто желает не приращения своего «человеческого капитала», а только «хорошей должности».

К сожалению, даже с нашими ведущими вузами дело обстоит не самым лучшим образом. Согласно международному рейтингу вузов QSWorldUniversityRanking (2011 г.) ведущие

российские вузы – МГУ и СПбГУ – не попали в первую сотню списка, опустившись на несколько позиций по сравнению с прошлым годом. Московский государственный университет (МГУ) занял 112-е место, а Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ) – 251-е место из трехсот. В предыдущем году в рейтинге было 500 позиций. Российских вузов в рейтинге за 2010 г. было больше: МГУ занимал 93-е место, СПбГУ – 210-е место, Новосибирский госуниверситет – 375-е место, Томский госуниверситет и Высшая школа экономики (ГУ ВШЭ) тогда оказались в пятой сотне списка [7]. Даже в Шанхайском рейтинге вузов за 2011 г. МГУ занял лишь 77-е место, а СПбГУ – только 301-е из 500 университетов мирах [7].

На повышение качества рабочей силы, на формирование конкурентоспособного работника и, в итоге, на выход на инновационный путь развития в целях повышения жизненного уровня направлено совершенствование системы образования, в частности обсуждаемая реформа образования и новый закон «Об образовании».

Еще один аспект проблемы состоит в том, что не все могут найти работу в соответствии с полученной специальностью. В 2010 г. из 1589,9 тыс. безработных, официально зарегистрированных в органах занятости, 26,2% не имели опыта работы, в то время как лица с высшим образованием среди безработных составили 14,8% [2]. Это указывает на то, что затраты на обучение велики, а результат отрицательный.

Довольно давно у нас в стране пропагандируется переход из производства в бизнес, создание самостоятельных фирм. Как правило, вновь организованные фирмы действуют в непроизводственной сфере и являются малыми предприятиями. В производственной сфере, исключая экспортно-ориентированные секторы с высоким уровнем оплаты труда, остро нехватка квалифицированных специалистов с уровнем подготовки, отвечающим современным требованиям.

Произошло изменение представления о работнике. Работник трактуется сегодня как высококвалифицированный специалист, имеющий широкие рамки личной компетенции, желающий постоянно подтверждать ее, обладающий высокой самооценкой, системой мотивации высших потребностей, выходящей за пределы удовлетворения физических потребностей и потребностей в самосохранении. Он должен обладать не только специальными знаниями, но и комплексом универсальных знаний. Такое представление о работнике позволяет иначе использовать принцип разделения труда, наделяя его полномочиями и ответственностью не только за часть процесса в рамках специализированных частных задач, а за весь процесс, включающий комбинированные универсальные задачи процесса в целом. Благодаря этому появляется возможность ответить на все вопросы и решить все проблемы, важные для клиента. Если один человек, менеджер клиентов (*case worker*, или *case manager*), не может справиться со всеми работами процесса, организуется группа, команда (*case team*) с аналогичными полномочиями и ответственностью. Работники сами принимают решения, причем принятие решений вводится в их функциональные обязанности. Такой подход распространяется как на управленцев, так и на рабочих. Однако серьезной проблемой является также подготовка квалифицированных рабочих, способных осваивать новые технологии и производства.

В плановой экономике существовала единая сеть государственных учебных заведений по подготовке, переподготовке и повышению квалификации рабочих кадров. В настоящий момент эта сеть уже не существует.

В ходе реформирования экономики сократилась численность рабочих и их удельный вес в общей численности промышленно-производственного персонала. Еще больше сократилась доля квалифицированных рабочих. Так, в 1990 г. в системе начального профессионального образования было подготовлено 1 млн 272 тыс. квалифицированных рабочих, в 2004 г. – в 1,7 раза меньше, в 2000 г. – 763 тыс., в 2005 г. – 703 тыс., в 2010 г. – 581 тыс., т. е. уже в 2,2 раза меньше, чем в 1990 г.

Директор Центра исследований постиндустриального общества В. Иноземцев указывает, что «в 1990-е и 2000-е годы российская система образования отличилась стабильным

перепроизводством не вполне необходимых экономике специалистов и увенчанных учеными степенями «научных работников», а экономика – очевидным недопотреблением научных кадров и новых технологий. Именно этот разрыв между потребностями народного хозяйства и потенциалом образовательной и научной систем приводит к тому, что последние работают в своего рода вакууме» [4].

Следовательно, можно сделать следующие выводы: реформирование системы образования должно быть подчинено целям развития экономики, осуществляться с учетом передового международного опыта и служить развитию научных исследований и разработок и укреплению связей с учеными других стран.

В настоящее время в большей мере, чем прежде, конкурентоспособность работника формируется в процессе трудовой деятельности. Сохранение и развитие квалификации и профессиональных навыков в значительной мере определяются качеством доступных рабочих мест и тем, в какой мере эти рабочие места дают не только достойный уровень заработной платы, но и реализацию потенциала занятых на них работников, их профессионального роста. В нашей стране еще в период централизованной экономики низкая цена труда не служила стимулом к замещению труда капиталом, не стимулировала роста производительности труда.

Опыт развитых стран показывает, что при прочих равных условиях продуктивность труда и доходы возрастают с увеличением затрат на общее и специальное образование. Так, в США самая высокая заработная плата у тех, кто закончил аспирантуру; следующая ступень – заработки после окончания университета; далее идут заработки работников с незаконченным высшим образованием; еще ниже – заработки после окончания средней школы; меньше всех получают те, кто имеет лишь начальное образование. Указанная зависимость характерна как для мужчин, так и для женщин [6].

В настоящее время важнейшим условием повышения конкурентоспособности наших работников является справедливая оплата труда. Необходимо, чтобы заработная плата создавала заинтересованность работников в росте производительности труда, повышении качества продукции и росте ее конкурентоспособности на мировом рынке. Вместе с тем, необходимо, чтобы издержки производства продукции не превышали уровня издержек производства зарубежных фирм, производящих аналогичную продукцию. То есть доля заработной платы в себестоимости отечественных товаров должна быть сопоставима с долей заработной платы в цене продукции за рубежом.

Качество образования зависит и от состояния кадрового потенциала на всех его уровнях. Выражен возрастной и гендерный дисбаланс в общем образовании: доля учителей пенсионного возраста составляет 18%, доля педагогов-мужчин – чуть более 12%. Медленно происходит обновление педагогического корпуса. Доля учителей российских школ в возрасте до 30 лет составляет 13%. Важным фактором, определяющим привлекательность педагогической профессии, является уровень заработной платы. Повышение заработной платы педагогов стало одной из целей, реализуемых с 2011 г. проектов модернизации региональных систем общего образования (далее – проекты модернизации). По данным мониторинга модернизации региональных систем общего образования, к концу 2011 г. средний уровень заработной платы учителей доведен до среднего значения по экономике региона или превышен в 69 субъектах Российской Федерации, а численность молодых учителей увеличилась на 10%. Эта тенденция должна получить развитие.

Международный опыт свидетельствует о том, что высокоразвитые системы образования концентрируют сегодня внимание на развитии профессиональных компетенций учителя. Система аттестации и оплаты труда педагогов должна быть ориентирована на повышение качества преподавания, на непрерывное профессиональное развитие. Обновление профессиональных компетенций и повышение уровня подготовки управленческого и педагогического корпуса требуют большей мобильности и гибкости системы повышения квалификации.

В сфере профессионального образования в последние годы происходит увеличение численности преподавателей в возрасте до 30 лет и снижение данного показателя для возрастных категорий 40-49 и 50-59 лет. Вместе с тем, возрастная структура в профессиональном образовании по-прежнему остается далекой от оптимальной. Одной из причин является низкая заработная плата педагогических и научно-педагогических работников учреждений профессионального образования – 85% к средней по экономике страны. В это время в развитых странах заработная плата научно-педагогических работников составляет 200-220% к средней по экономике государства. В системе профессионального образования недостаточно развиты механизмы обновления и повышения квалификации управленческих и преподавательских кадров [6].

Эффективность развитие общества напрямую зависит от степени обеспеченности талантливыми, профессионально подготовленными высококвалифицированными специалистами. Сегодня в России наблюдается спад востребованности знаний специалистов с высшим профессиональным образованием, это обусловлено низкой социальной ценностью образования, так как оно не дает соответствующей отдачи, а требует больших временных, материальных и эмоциональных затрат. Потому ряд молодых людей предпочитают серьезному базовому образованию различного рода краткосрочные курсы, дающие возможность в короткое время приобрести специальность, позволяющую получать приличный доход.

В соответствии с изложенным, одной из главных задач модернизации российского высшего профессионального образования является его адаптация к современным условиям, соответствие интересов личности обучающегося тем требованиям, которые предъявляются к специалистам в настоящее время. Актуальной проблемой современных высших учебных заведений является подготовка профессионалов, способных к проведению аналитико-проектных исследований. Таким образом, образовательные программы профессиональных учебных заведений должны создавать человека, сочетающего профессиональный кругозор с глубокими интеллектуальными возможностями.

Одним из последних решений Президента, Правительства и Законодательного Собрания РФ является иерархия вузов (верхний уровень – МГУ и СПбГУ, затем – семь федеральных (среди которых - Уральский, формируемый на базе УГТУ-УПИ) и 14 научно-исследовательских университетов). Их миссия – обеспечение формирования человеческого и научно-технического потенциала сбалансированного обновления традиционных и развития постиндустриальных отраслей экономики.

Реформирование системы образования и экономики направлено на формирование человеческого потенциала за счет миграции молодых специалистов из других стран в Россию. Однако отсутствие системы оценки потребностей отраслей экономики России, а также системы распределения выпускников даже из бюджетных потоков не учитывает востребованности инженерных специальностей на рынке труда с определёнными квалификационными требованиями.

Другой аспект конкуренции Российской экономики на мировом уровне – систематическое обновление производственной базы и повышение производительности труда. Использование высокотехнологичного оборудования в промышленном производстве предъявляет высокие требования к квалификации специалистов, работающих на этом оборудовании. В России инженерная школа всегда развивалась исходя из потребностей производства и использовала две степени подготовки специалистов – инженеры и техники. Выпускники системы СПО, получившие дипломы техников, техников-технологов, в сравнении с выпускниками системы ВПО, получившими дипломы бакалавров, имеют явное преимущество, поскольку их место по уровню занимаемой должности в системе производственных отношений определено. Для выпускника со степенью бакалавра, окончившего технический вуз, сложно определить должность в штатном расписании, поскольку невозможно определить его квалификационную нишу между техником и инженером.

Сегодня необходимо совершенствовать двухуровневую систему образования, в част-

ности, для инженерных специальностей содержание подготовки бакалавра необходимо подтянуть до уровня требований к специалисту на уровне продвинутого машиностроительного производства. При этом в обучении необходимо сделать акцент на формирование производственных навыков. Содержание подготовки магистра направлено на усиление связи с производством и НИИ. Организация подобного взаимодействия вуза и предприятия определяется дефицитом или отсутствием передовых производств мирового или европейского уровня в России. Так как для развития промышленного производства в России необходимо системы профессиональным образованием, НПО, СПО, ВПО сделать производственно-ориентированной. Принимая во внимание тот факт, что система управления экономикой в России построена по отраслевому принципу, следовательно, именно отрасль должна формировать госзаказ на подготовку кадров и отвечать за обеспечение выпускников рабочими местами, понимая, в каких регионах какие виды производств будут развиваться, а также какие смежные специальности и профессии при этом будут необходимы. Образовательные учреждения должны стать в некотором смысле частью производственной системы отрасли. Тогда образовательная система будет четко понимать, для каких отраслей, какого уровня подготовки нужны специалисты (бакалавры, специалисты, магистры) и отвечать за качество их подготовки. А промышленная система будет создавать механизмы привлечения и закрепления кадров.

Современные реалии отражают новое видение человеческих ресурсов (человеческого капитала), от которых зависит не только развитие постиндустриальных отраслей экономики, но безопасность и устойчивость развития всего общества.

#### Библиографический список

1. Концепции долгосрочного развития Российской Федерации на период до 2020 года. – М.: Минэкономразвития России, 2010.
2. Россия в цифрах. 2011: крат. стат. сб. – М.: Росстат, 2011.
3. **Зиганшина, Н.** МГУ выпал из сотни // Газета ру. 05.09.2011. <http://www.gazeta.ru/sociai/2011>
4. **Инозещев, В.** Слово и дело: Злокачественное образование // Ведомости. 2011. № 185 (2951).
5. **Сюн, Цинянь.** Слово и дело: как мы учились учиться // Ведомости. 2011. № 186 (2952).
6. Государственная программа Российской Федерации «Развитие образования» на 2013-2020 годы (проект). – М.: Минэкономразвития, 2010.
7. Исследование инвестиционной привлекательности России. – М.: Эрнст энд Янг (СНГ) Б.В., 2012.
8. Материалы экономического форума в Давосе// <http://www.forbes.ru/sites/default>

*Дата поступления  
в редакцию 12.12.2012*

**S. N.Yashin, T.I.Ermakova, N. A. Murashova**

#### **SOME ASPECTS OF INCREASE OF COMPETITIVENESS OF GRADUATES OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN INNOVATIVE DEVELOPMENT OF RUSSIA'S ECONOMY**

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

In article it is noted that upon transition to innovative development improvement of quality of labor becomes both the precondition, and a factor of formation of modern competitive national economy. Some aspects of competitiveness of the worker and factors of her increase are considered. Measures for higher education improvement are offered.

*Key words:* The competitive worker, the innovative development, the qualified labor, education, professional development.

## СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 37.015.31

Н.Ф. Агаев

### ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТОВ

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Целью исследования является изучение эмоционально-личностной сферы студентов в образовательном пространстве вуза. Предмет исследования – педагогические условия образовательного пространства вуза, направленные на формирование эмоциональной устойчивости и повышение качества жизни студентов. Рассмотрена роль физической культуры как ведущего компонента структуры педагогических условий профилактики нарушений в эмоционально-личностной сфере студентов в образовательном пространстве вуза.

*Ключевые слова:* эмоциональная устойчивость, студенчество, синдром эмоционального выгорания, эмоциональная устойчивость.

Студенческая молодежь – специфическая группа населения, имеющая отличия в образе жизни, свои ценностные установки, эталоны поведения, мотивы деятельности. Студенты относятся к социальному слою населения повышенного риска, подверженному кумулятивному эффекту воздействия стресс-факторов процесса обучения и влияния выбранной профессии на личность. К числу факторов риска российские ученые Е.А. Ямбург, Э.Н. Вайнер, Н.К. Иванова, А.М. Куликов относят перегрузку учебными занятиями, авторитарный стиль взаимоотношений преподавателей и студентов, недостаточный учет индивидуальных особенностей в обучении и воспитании, гиподинамию и др. Физическое состояние, уровень физической подготовленности молодежи не позволяют ей эффективно противостоять неблагоприятным условиям внешней среды и трудностям, связанным с изменениями социально-политического и экономического устройства общества. Уровень психофизической культуры молодежи за время обучения в вузе снижается, что обусловлено и резким ростом информационных и эмоциональных нагрузок, приводящих к значительному ухудшению психического самочувствия человека, повышенной тревожности, отчужденности, и низким уровнем технологической оснащенности студентов, позволяющей им преодолевать стрессовые ситуации. При этом вне воспитательного влияния оказывается сфера эмоционально-ценностных запросов молодежи, не востребована должным образом инициатива молодежи в достижении личного успеха, не найдены адекватные формы выражения привлекательности здорового образа жизни. При этом молодые люди, встречаясь с какой-то сложностью, не могут полноценно реализовать накопившуюся энергию (вызванную физиологическим механизмом стресса), и тогда эта энергия, по мнению С.А. Бабанова, начинает разрушать самого человека [1]. Как следствие, растёт психическое, эмоциональное напряжение, связанное со стрессом на рабочем месте.

Современное общество движется в направлении гуманизации образовательной среды, к развитию потенциала возможностей каждого человека, при этом на передний план выступают факторы развития личности студентов, интересующихся глубинными смыслами жизни,



себя и своей деятельности. По мнению Е.А. Рождественской, успех в профессиональной деятельности зависит не только и не столько от сформированных профессиональных навыков, сколько от развития общепсихологической культуры специалиста [2]. Таким образом, зрелость эмоционально-личностной сферы студента становится одним из главных факторов подготовки будущего специалиста и качества его жизни. Однако уровни взаимодействия между эмоционально-личностной, мотивационной сферами и качеством жизни студентов в образовательном пространстве вуза еще не достаточно изучены, что позволило обозначить основную проблему исследования – изучение эмоционально-личностной сферы студентов в образовательном пространстве вуза.

Эмоциональная устойчивость – наименее формируемое и развиваемое качество личности [3]. Эмоциональная устойчивость является одним из проявлений адаптационных способностей личности. Значение эмоций в осуществлении различных видов деятельности и их определяющее воздействие на формирование способов ее организации и воспитание социально значимых черт личности подчеркивается многими исследователями (Л.И. Божович, П.В. Симонов, Г. Х. Шингаров и др.). Эмоциональная устойчивость является интегральным свойством психики, выражающимся в способности преодолевать состояние излишнего эмоционального возбуждения при выполнении сложной деятельности. Она определяется как неподверженность эмоциональных состояний и процессов деструктивным влияниям внутренних и внешних условий. Эмоциональная устойчивость уменьшает отрицательное влияние сильных эмоциональных воздействий, предупреждает крайний стресс, способствует проявлению готовности к действиям в напряженных ситуациях. Эмоциональную устойчивость можно рассматривать как результат функционирования целостной системы саморегуляции организма, интегрально характеризующей особенности деятельности.

Современное студенчество относится к группе населения с повышенным уровнем риска заболеваний в связи с большой психоэмоциональной и умственной нагрузкой, необходимостью адаптации к новым условиям обучения, формированием новых и профессионально-обусловленных межличностных отношений. Мотивация обучения в вузе у студентов связана не только с проблемами профессионального самоопределения, где личностная зрелость является одним из ведущих факторов профессионализма, учебная мотивация определяется активностью и пассивностью учебной деятельности студента, при этом эмоциональный статус не только становится неотъемлемым компонентом деятельности, но и начинает активно выполнять функцию ее регулирования. Необходимым условием успешного обучения в современном вузе является высокий уровень психического компонента качества жизни студента, отражающего его способность оптимально адаптироваться к условиям образовательной среды, адекватно реагируя на основное противоречие современной системы образования – это противоречие между быстрым темпом приращения знаний и ограниченными возможностями их усвоения индивидом.

Эмоциональное выгорание – это «выработанный личностью механизм психологической защиты в форме полного или частичного исключения эмоций в ответ на избранные психотравмирующие воздействия» [4]. Возникновению синдрома эмоционального выгорания способствует молодой возраст, отсутствие жизненного и практического опыта.

Особенности формирования синдрома эмоционального выгорания студентов и его влияние на мотивационную сферу студентов рассматривается нами на основе теории самодетерминации (по Е. Deci и R. Ryan). Самодетерминация выступает не только как потребность, но и как качественная характеристика поведения человека. Под самодетерминацией понимают способность человека выбирать и делать выборы, чувствовать себя, а не подкрепления, стимулы или какие-то иные силы, которые также могут выступать в качестве детерминант его поведения [5].

Самодетерминация является не только способностью, но и потребностью студентов.

Установлено, что эмоциональное выгорание студентов представляет собой приобретенный стереотип эмоционального поведения, процесс постепенной утраты эмоциональной, познавательной и физической энергии, проявляющийся в симптомах эмоционального, умственного истощения, физического утомления, личной отстраненности и снижения удовлетворения исполнением работы.

Важнейшая роль в формировании личности студентов отводится физической культуре. Физическая культура, по утверждению В.К. Бальсевича, представлена всеми компонентами структуры личности, что подтверждается анализом ее функционально-ценностного содержания. В связи с этим она выступает как базовый, фундаментальный слой, интегрирующее звено культуры, содержащее наибольший потенциал воспроизводства личности как целостности. Эффективность физкультурной деятельности определяется потребностно-мотивационным звеном (связанным с формированием их потребностей, интересов, целей, закрепляемых в мотивах, ценностных ориентациях и т.п.) студентов, овладением ими определенным уровнем знаний, умений и навыков.

Разработанные нами педагогические условия повышения эмоциональной устойчивости и профилактики СЭВ у студентов творческих специальностей состоят из трёх уровней: индивидуальный уровень – профилактика клинических проявлений СЭВ, подбор адаптивных форм поведения; межличностный уровень – оптимизация взаимоотношений с однокурсниками, преподавателями и членами семьи; организационный уровень – оптимизация обстановки в вузе, улучшение условий обучения.

Педагогические условия повышения эмоциональной устойчивости личности студентов подразумевают создание благоприятной психологической среды, способствующей профилактике СЭВ. Для преодоления синдрома эмоционального выгорания при включении в практическую деятельность должны быть решены следующие задачи:

- комплексный мониторинг эмоционально-личностной сферы, психосоматического здоровья и социальной адаптации студентов;
- внедрение комплекса образовательно-просветительских программ, направленных на приобретение студентами знаний и навыков, способствующих сохранению и укреплению оптимального психоэмоционального статуса и здоровья;
- внедрение системы мер профилактического и адаптивного характера, связанных с психологической поддержкой студентов и физической реабилитацией.

В основе модели педагогических условий формирования эмоциональной устойчивости личности студентов лежит педагогическая технология повышения психологической грамотности студентов для преодоления синдрома эмоционального выгорания. Педагогическая технология при включении в практическую деятельность содержит составляющие:

- блок самопознания и самоанализа – выявление психологических особенностей студентов, способных провоцировать развитие СЭВ;
- блок коррекции самооотношения – повышение уровня принятия себя, адекватного восприятия своих положительных и отрицательных характеристик, принятие успехов и неудач;
- блок саморегуляции – формирование навыков управления своим функциональным состоянием, работы с эмоциями и переживаниями;
- блок психологической грамотности – овладение знаниями о стрессовых состояниях и путях их преодоления, развитие навыков психологической защиты и адаптации к конкретным ситуациям.

Педагогические условия повышения эмоциональной устойчивости оказывают существенное положительное влияние на психоэмоциональный статус студентов, на их мотивационную сферу и компоненты качества жизни и включают в себя:

- обеспечение «обратной связи» и диалога на профессиональные темы педагога и студентов;
- гуманное отношение к обучающимся, признание их самооценности, креативности;
- индивидуализация обучения;
- обеспечение условий, способствующих саморазвитию, самообучению, самообразованию и креативности;
- создание условий, обеспечивающих активность студента;
- организация коммуникативной и социальной деятельности студентов;
- создание условий, препятствующих возникновению СЭВ.

Реализация педагогических условий по формированию эмоциональной устойчивости личности студентов и профилактики психоземotionalных нарушений опирается на педагогическую технологию, в основе которой лежит концепция Л.В. Филипповой [6] и разработанные на её основе совместно с Д.Г. Сидоровым следующие типы занятий со студентами.

Первый тип занятий соответствует первому этапу социализации – идентификации, целью которой является осознание обучающимся самого себя, своего статуса, занятие равноправного места в группе. Этот тип занятий решает задачу развития ориентировочной основы деятельности путем формирования у студента образа педагогической ситуации и образа цели, их сравнения и выявления различий, а также выработки полной программы действий по устранению этих различий. Достижение данной цели предполагает восприятие и оценку студентом учебной ситуации, а также своих способностей, рассуждения о допустимых результатах, формирование у него позитивного настроения и фиксированной установки. В дидактическом плане цель первого этапа развивающего обучения – формирование установки познавательной активности, готовности к занятиям по индивидуальной программе. В личностном плане целью указанного этапа является достижение высокого уровня адаптированности студента. В соответствии с указанными целям строится диагностика психического склада личности, выявляются адаптивные возможности, прогнозируется ориентация личности в сфере самоопределения и самореализации. Для этого используются адаптированные опросники – шестнадцатифакторный личностный опросник Кеттелла, шкалы (оценки стремления к риску, к достижению успеха, мотивации избегания неудачи). В составе комплексной методики оптимизации психологической включенности личности в новую для нее деятельность используется аутогенная тренировка, цель которой – научить студента мобилизовать свои способности для решения ситуативных задач.

Второй тип занятий соответствует второму этапу социализации – индивидуализации, которая не означает чрезмерной концентрации внимания на отдельной личности. Психологический смысл данного типа занятий заключается в том, чтобы способствовать формированию у обучающихся оценки своих и чужих способностей, расширению представлений личности о своих возможностях. Следовательно, на занятиях данного типа решается задача существенного повышения индивидуальной активности, соревновательности, креативности. Это достигается несколькими путями: превращением обучающихся из объектов в субъекты управления собственным поведением; проблематизацией содержания учебного процесса; организацией группового взаимодействия; осуществлением рефлексивного экспресс-анализа педагогической ситуации.

Психологической составляющей данного этапа развития индивидуальности является реализация внутриличностного потенциала в конкретных условиях деятельности. Индивидуализация – это организуемый преподавателем процесс самореализации личности. Коммуникативное сотрудничество является важным условием индивидуализации, что, по существу, означает реализацию способности правильно понять других, взаимное уважение и доверие, способствующие активизации эмоциональной сферы личности, а также моделирование ин-

терапевтических методик, самостоятельных, индивидуальных и совместных форм работы, обеспечивающих деятельностный аспект.

Полилог как способ взаимораскрытия, взаимоутверждения и взаиморазвития, как активный творческий процесс преодоления «прерывности» общения с опорой на рефлексию формирует у студентов способность к педагогическому взаимодействию как условию эффективного обучения. Поэтому педагогическое обучение, весь коммуникативный фон занятий должен иметь установку на педагогическое сотрудничество, т.е. сотрудничество, которое в значительной мере индивидуализировано, поскольку ориентировано на уникальность и неповторимость каждого субъекта, вызывает субъективную удовлетворенность. По мнению В.А. Янчук, это становится возможным при правильном выборе такой тактики дидактической беседы, которая учитывает личностные особенности студентов, в том числе тип внушаемости личности [7].

Игровой тренинг – третий тип занятий, соответствующий во многом более высокому уровню социализации – персонализации, связан с формированием группового сотрудничества, групповой мобильности и групповой креативности. На этом этапе происходит интеграция личности с макро- и микросредой, в ходе которой складываются индивидуальный стиль деятельности и индивидуальный стиль общения. Тренинг включает организационно-деловую игру и игры, направленные на развитие социальности (кооперирование, взаимодействие, сотрудничество, групповое творчество). Игровой тренинг полезен всем студентам, в особенности тем, которые испытывают заметные трудности в межличностном общении, поскольку предполагает сформированную готовность к деятельности, высокий уровень активности, раскованности, инициативности, сотрудничества. Игровой тренинг ценен и тем, что требует от его участников умения анализировать и определять качества своей деятельности и деятельности других.

Выполнение студентами различных ролей (участник, капитан команды, тренер, судья, организатор соревнований) положительно сказывается на развитии «социальной компетенции» и коммуникативности всех участников, способствует снятию «физической неполноценности» и замене реактивного поведения на рефлексивное. В организационно-деловой игре наибольшее развитие получают процессы экстерниоризации, обеспечивающие переход личности на высший уровень взаимодействия в группе – уровень персонализации. Организационно-деловая игра, психотехнические игры, а также игры на развитие социальности способствуют формированию личностных характеристик: мотивационного уровня личности (уровень «Я»), целевого (уровень притязаний) и смыслового (переживание успеха-неуспеха) – и, следовательно, являются формами гуманистически ориентированного обучения в процессе физического воспитания студентов.

Требование гуманного отношения к обучающемуся, признание его самооценности являются основными требованиями к личностно-ориентированному обучению, в центре которого находится личность обучающегося, а основной задачей – её развитие. Дифференциация обучения достигается за счет выбора системы индивидуальных обучающих воздействий, учитывающих субъективный опыт обучающихся, ориентированных на реальные способности конкретного обучающегося. Требование обеспечения условий, способствующих саморазвитию, самообучению, самообразованию обучающегося означает, что оно направлено на предоставление обучающемуся возможности самостоятельного приобретения знаний; развитие его социальных, творческих, интеллектуальных способностей, на удовлетворение потребностей личности в самопознании, самоопределении, самоуправлении и самореализации.

Требование учета субъективного опыта каждого обучающегося в личностно-ориентированном обучении означает, что необходимо акцентировать внимание на субъективном опыте обучающегося, который необходимо развивать и приумножать. Осуществление самоконтроля, тренировки, самокоррекции пробуждает у студентов новые эмоции, влияющие на

мотивацию. Организация объективного контроля знаний позволяет рационально использовать мышление всех категорий обучающихся, способствует возникновению внутренней потребности в изучении данного материала, что активизирует познавательную деятельность. Познавательная мотивация является основой активности учения, только познавательные мотивы способствуют устойчивой активности обучающегося и повышают эффективность процесса обучения.

На основе показателей, характеризующих социально-психологическую сферу личности студента, его физическую подготовленность и состояние здоровья, составляются индивидуальные программы. Основные задачи программы: внедрение в учебно-воспитательный процесс индивидуально-личностного обучения студентов как фактора сохранности здоровья и профилактики СЭВ; осуществление психолого-педагогического и медицинского контроля за состоянием здоровья студентов в период обучения в вузе; внедрение профилактических медицинских и психологических мероприятий; создание социально-реабилитационных служб здоровья, психологических центров.

Для формирования личности важна технология обучения, позволяющая активно осуществлять психолого-консультационные и психокорректирующие мероприятия, способствующие достижению максимальной эффективности специализированных физкультурных занятий и ориентированные на развитие личности как интегральной индивидуальности. Это возможно при наличии модели социально-психологического обеспечения учебно-развивающегося процесса.

Ю.Н. Емельянов [8], опираясь на концепцию социально-психологического обучения Аргайла, указывает и на задачу формирования рефлексивного сознания: повышение адекватности самовоспитания индивида, гармонизация «Я-образа» и «Я-концепции» и создание концептуального инструментария для рассмотрения проблемы «Я-в ситуации».

В обучающую программу входят манипулятивные игры, игры с комментарием, сюжетно-ролевые игры, направленные на формирование знаний, умений, осознание смысла. Новый смысл, обретенный в процессе реализации обучающей программы, может стать условием дальнейшего культурного и деятельного самоопределения субъекта, осуществляемого посредством выполнения индивидуальных программ (составленных с учетом характера заболевания и физической подготовленности), овладения приемами психической саморегуляции и т.д.

Высокий уровень самоконтроля, творческий стиль деятельности и общения, которые присущи личности с высоким уровнем адаптированности, позволяют ей без посредничества оптимально включиться в новые виды деятельности, а высокий уровень саморегуляции препятствует развитию каких-либо болезненных изменений. Ведущее место в поведенческой установке личности высокооптимального уровня адаптированности занимает фактор социальной ориентации. Центральными элементами этого фактора являются мотивы, признаки широты и уровня направленности личности, а также такие характерологические особенности, как активность и коллективизм. Фактор профессиональной направленности играет меньшую роль. В его состав входят ценности, связанные с профессиональным становлением личности, профессиональные и творческие мотивы, показатели отношения личности к труду, интеллектуальные способности.

Ведущим на данном уровне является фактор коммуникативного опыта, центральными элементами которого выступают признаки коммуникативной компетентности, коммуникативности личности, а также потребности личности в общении, социальном признании. Таким образом, ведущими педагогическими условиями формирования эмоциональной устойчивости личности студентов и профилактики эмоционального выгорания следует признать:

- на организационном уровне: оптимальную организацию учебного процесса, использование специально разработанных типов учебных занятий, организацию консультаций психолога и врачей, мониторинг психоэмоционального статуса студентов, создание благо-

приятной среды обучения и проживания студентов, организация оптимального досуга и летнего отдыха студентов, курсы-тренинги для студентов по саморегуляции на занятиях по физической культуре и вне учебного времени;

- на индивидуальном и межличностном уровне представляется целесообразным: определять краткосрочные и долгосрочные цели (это повышает долгосрочную мотивацию); достигать краткосрочные цели: успех, который повышает степень самомотивации; использовать «технические перерывы», что необходимо для обеспечения психического и физического благополучия (отдых от работы); освоить пути управления стрессом – изменение социального, психологического и организационного окружения
- на рабочем месте: обеспечить большую автономию студента; выстроить «мосты» между учёбой и домом; создать в учебной группе благоприятный социально-психологический климат; обучиться приёмам релаксации, ауторегуляции, самопрограммирования; поддерживать хорошую физическую форму (сбалансированное питание, ограничение употребления алкоголя, отказ от табака, коррекция массы тела).

Кроме этого, следует стараться рассчитывать и обдуманно распределять свои нагрузки; учиться переключаться с одного вида деятельности на другой; проще относиться к конфликтам на учебе; не пытаться быть лучшим всегда и во всем. Помнить, что учеба – это всего лишь часть жизни.

Наиболее эффективным педагогическим условием формирования эмоциональной устойчивости следует признать:

- 1) развитие у студентов активной жизненной позиции (оптимизма, активности, уверенности в своих силах и в стабильности);
- 2) развитие высокого уровня творческого потенциала студентов (креативности личности, креативности подходов к решению поставленных задач);
- 3) развитие активного типа жизненной установки (оптимизма, реализма);
- 4) развитие у студентов образа мыслей и поведения для преодоления стрессовых ситуаций (копинг, юмор, самоуважение).

Таким образом, разработанные и апробированные нами педагогические условия повышения эмоциональной устойчивости оказывают существенное положительное влияние на психоэмоциональный статус студентов, на их мотивационную сферу и компоненты качества жизни. Одним из ведущих компонентов в структуре педагогических условий профилактики нарушений в эмоционально-личностной сфере студентов в образовательном пространстве вуза является физическая культура, которая представлена всеми компонентами структуры личности, что подтверждается анализом ее функционально-ценностного содержания. В связи с этим физическая культура выступает как базовый, фундаментальный слой, интегрирующее звено культуры, содержащее наибольший потенциал воспроизводства личности как целостности.

#### Библиографический список

1. **Бабанов, С.А.** Профессиональные факторы и стресс: синдром эмоционального выгорания [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.t-patient.ru/archive/tp12-09/tp12-09\\_622.html](http://www.t-patient.ru/archive/tp12-09/tp12-09_622.html) (Дата обращения 01.01.2013).
2. **Рождественская, Е.А.** Особенности мотивации обучения в вузе / Е.А. Рождественская, Н.А. Рощина, Е.Н. Кубарев // Вестник ТГПУ. 2005. №1. С. 44-46.
3. **Аболин, Л.М.** Психологические механизмы эмоциональной устойчивости человека / Л.М. Аболин. – Казань, 1987. – 262 с.
4. **Бойко, В.В.** Правила эмоционального поведения / В.В. Бойко. – СПб.: Речь, 1997. – 286 с.
5. **Личностный потенциал: структура и диагностика;** под ред. Д.А. Леонтьева. – М.: Смысл, 2011. – 679 с.

6. **Филиппова, Л.В.** Концепция и технология организации гуманистически ориентированной физкультурно-спортивной деятельности детей и молодежи / Л.В. Филиппова, Ю.А. Лебедев // Спорт, духовные ценности, культура. 1997. Вып. 7. С. 295–308.
7. **Янчук, В.А.** Дифференциальная внушаемость личности и ее возрастная динамика: автореф. дисс... канд. пед. наук / В.А. Янчук. – Минск, 1986. – 26 с.
8. **Емельянов, Ю. Н.** Активное социально-психологическое обучение / Ю. Н. Емельянов. – Л.: ЛГУ, 1985. – 167 с.

*Дата поступления  
в редакцию 22.12.2012*

**N.F. Agaev**

## **PEDAGOGICAL CONDITIONS OF IMPROVING OF EMOTIONAL STABILITY OF STUDENTS' PERSONALITY**

Nizhny Novgorod state university of architecture and civil engineering

**Purpose:** The study of the emotional and personal sphere of students in the university educational environment.

**Design/methodology/approach:** Pedagogical conditions of the university educational environment aimed at forming emotional stability and improving the quality of student life.

**Findings:** Factors affecting the emotional instability and the quality of life of students are the following: low level of students' physical and psychic culture and not enough pedagogically and technologically adapted environment of the university, which form the emotional burnout syndrome during training.

**Research limitations/implications:** The author has examined the role of physical education as the leading component of the structure of pedagogical conditions preventing violations in the emotional-personal sphere of students in the university educational environment.

**Originality/value:** Pedagogical conditions of improving of emotional stability of students' personality, developed on three levels of the university educational environment: individual, interpersonal, and organizational, are based on the student-centered approach to students' activities, they promote students' self-actualization and self-identity, improve the quality of life and respond adequately to the basic contradiction of the modern educational system - the contradiction between the fast rate of knowledge increasing and the individual limited capacity to assimilate it.

*Key words:* emotional stability, studentship, emotional burnout syndrome.

УДК 37.036.5

О.В. Ларина

**АКТИВИЗАЦИЯ ХУДОЖЕСТВЕННО–ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
СТУДЕНТОВ–ДИЗАЙНЕРОВ СРЕДСТВАМИ  
ИНФОРМАЦИОННО–КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**Московская государственная художественно–промышленная академия  
им. С.Г. Строганова (Уральский филиал)

Исследуются особенности художественно-проектной деятельности и проектной культуры дизайнера в целом в условиях информатизации социума. Проанализированы детерминанты проектной культуры, традиционные и сформированные в условиях информатизации социума. Обозначен дискурсивный характер современного дизайн-проектирования. Отмечены четыре основных типа интерпретации дискурса, которые возможно экстраполировать и на проектный дискурс. Выведены основополагающие характеристики и особенности использования ИКТ в дизайн-образовании. Отражены возможности применения в дизайн-педагогической деятельности информационно-коммуникационных технологий в нескольких направлениях: как средства поиска, хранения, систематизации информации, в качестве средств обучения, как средства художественного выражения, в качестве контроля эффективности обучения и проверки принципиальной возможности реализации проекта в конкретной среде. Обозначена необходимость интеграции ИКТ как средств активизации художественного проектирования в психологическую структуру деятельности студентов-дизайнеров.

*Ключевые слова:* информатизация дизайн-образования, дизайн-парадигма, художественно-проектная деятельность, проектная культура, информационно-коммуникационные технологии, проектный дискурс, средства информационных технологий.

Дизайн-образование в информационном обществе, как и система образования в целом, активно трансформируется. Эти изменения базируются на таких монументальных явлениях, как смена дизайн-парадигмы и информатизация образования. Внедрение информационно-коммуникационных технологий выведено на уровень законодательной деятельности государства. Это показатель позитивных сдвигов, осуществляемых в рамках глобальной информатизации общества. Здесь сосредоточен потенциал перспективных преобразований в экономике, политике, культуре, образовании и социальных коммуникациях. В теоретических аспектах использования информационно-коммуникационных технологий в образовании находят отражения идеи неразрывной связи экономики, медиаграмотности, коммуникативности и нового гуманизма.

Теория и практика дизайна как проектно-ориентированная дисциплина вводит коммуникативность в аксиологический базис. Все чаще исследователи отмечают факт превращения дизайна из вида деятельности по обслуживанию коммуникации, в язык коммуникации, который выполняет миссию социально-культурного интегратора общественного взаимодействия. Очевидными становятся параллели, в которых информатизация активизирует процессы коммуникации, дизайн выполняет ту же функцию, но одновременно способен овеществить, материализовать коммуникацию. Актуально и обратное воздействие информационной парадигмы на концептуальные основания теории и практики дизайна. На первый план выходит не совершенствование форм и функций, сколько сокращение избыточного количества продуктов, пересмотр материалов и технологий, формирование новой структуры потребностей. В дизайне появилось экологическое направление, которое связано более с изменением целей и задач дизайна, нежели с чисто внешним проявлением в виде «экологического стиля» [1].

Все изложенные концептуальные реформации отразились и на самом процессе проектирования, и на осмыслении роли и значения проектной культуры. Она приобретает качество мета-структуры, способной аккумулировать в себе проектные инвестиции, и представляющий собой информативно-интеллектуальный блок, готовый в необходимый момент быть



развернутым в реализацию проекта. Параллельно с изменяющимся миром теории и практики дизайна формулируется спектр новых задач, стоящих перед дизайн-образованием в контексте внедрения информационно-коммуникационных технологий:

- формирование у будущего специалиста представлений о художественно-проектной деятельности как творческой деятельности, направленной на создание и формирование социокультурной коммуникации в условиях информационного времени;
- формирование у будущего специалиста представлений об основополагающих детерминантах художественно-проектной деятельности: экологичности, концептуальности, аксиологичности, коммуникативности, семиотичности;
- формирование активного творческого мышления личности будущего специалиста, готовой к саморазвитию и самообразованию в условиях информатизации социума;
- формирование у будущего специалиста навыков информационной навигации, поиска и структурирования информационных потоков;
- преодоление узкопрофессиональных и конвенциональных границ в профессиональном образовании и последующей профессиональной деятельности будущих специалистов;
- формирование у студентов умений планировать многоуровневый и полиаспектный процесс воплощения творческого замысла для каждой конкретной задачи;
- формирование у студентов умений отбирать и обосновывать выбор программных продуктов, средств и технологий из реестра информационно-коммуникационных технологий для реализации творческого замысла каждой конкретной задачи;
- формирование навыков, необходимых знаний и умений для работы с конкретными (в зависимости от специализации) программными продуктами.

Решение перечисленных задач возможно в рамках использования таких педагогических практик, которые способны учитывать сложные многомерные изменения социокультурной ткани общества. Исследуя возможности активизация художественно-проектной деятельности студентов-дизайнеров средствами информационно-коммуникационных технологий, необходимо рассмотреть первый блок понятий, связанных непосредственно с художественным проектированием, и в более широком смысле, с проектной культурой информационного времени.

Активизация художественно-проектной деятельности студентов-дизайнеров в условиях информатизации социума подразумевает трансформацию традиционных значений проектной культуры. Определение проектной культуры дано многими теоретиками и практиками дизайна. Наиболее близким данному исследованию является определение крупнейшего российского исследователя дизайна О.И. Генисаретского, чье исследование концептуализма в проектной культуре являются актуальными для современного дизайна. «Проектная культура - это высший уровень сферы дизайна, надстраивающийся над текущим проектным процессом преобразования и/или воссоздания среды...» [2]. Формирование художественно-проектной компетентности студентов-дизайнеров в контексте смены парадигмы современного дизайна во многом базируется на формировании проектной культуры в целом. К пяти основополагающим детерминантам проектной культуры можно отнести: экологичность, концептуальность, аксиологичность, коммуникативность, семиотичность. Необходимо прояснить значение каждого из детерминантов в процессе формирования художественно-проектной компетентности студентов-дизайнеров.

Экологическая составляющая в педагогическом ракурсе определена необходимостью формирования в сознании студента генетических связей образа и среды как базовых элементов проектирования. Это направленность деятельности студента на осмысление социального контекста и установление родственных семантически-знаковых связей образа и среды в будущем проекте. В то же время информатизация социума актуализирует положение об экологизации потребления, которое означает разумное сокращение и приведение потребления в соответствие нормам экологической этики.

Концептуальность как составной элемент художественно-проектной культуры имеет право быть включенной в образовательный процесс в качестве одного из основополагающих начал проектирования. Являясь отражением творческого сознания, творческой воли, концептуальность может быть выражена в качестве методики и в качестве поэтики или языка практической реализации задуманного. Процессы информатизации трансформируют содержание и обогащают пластический язык выражения концепций, примером могут служить использование медиа-технологий и профессиональных сред проектирования двух-, трехмерной графики и т.д.

Аксиологичность в формировании художественно-проектной компетентности студента-дизайнера также испытывает влияние информатизации социума. Как показано ранее, аксиологический базис современного дизайна ориентируется прежде всего на социокультурные трансформации. В более широком понимании аксиология профессии, заложенная в процессе обучения, – это возможность мыслить социальными категориями, отождествляя деятельность дизайнера не только с оформлением предметного мира, но с проектированием семантических значений овеществленного предметного мира, его межкультурных коммуникаций.

Таким образом, художественно-проектная компетентность студентов-дизайнеров трактуется как производная проектной культуры. Она характеризуется концептуальной составляющей, которая в свою очередь имманентно соопределена профессиональной этике и строится на аксиологическом базисе.

Три основополагающих детерминанты проектной культуры в формировании художественно-проектной компетентности – экологичность, концептуальность и аксиологичность – являются в значительной мере традиционными. Для современного дизайна они актуальны, но в контексте смены парадигмы дизайна необходимо зафиксировать еще четвертую и пятую детерминанты – это коммуникативность и семиотичность.

Как коммуникативная, так и семиотичная составляющие художественно-проектной деятельности – это проявление информационного духа времени. В педагогическом контексте они меняют видение дизайн-проблематики. Характеризуют профессиональный язык дизайна как перформативный, в котором создаваемые объекты дизайна пропорциональны высказываниям, построенным на аксиологическом базисе.

Эти составляющие проектной культуры в педагогическом аспекте во многом реализуют себя через практику дискурса. Понимание проектного дискурса дано О.И. Генисаретским в работе «Проектная культура и концептуализм». Проектный дискурс рассматривается исследователем в его семиотическом значении, в качестве собственно процесса мыслительного и знакового изготовления проекта как текста, выполненного в определенном профессиональном языке проектирования. Языковые средства его очень разнообразны: это и вербальное описание (в сценарных проектах), и решение систем дифференциальных уравнений, когда рассчитываются конструкции, и композиционно-колористический поиск, гармонизирующий пространственные или цветовые массы объекта, и, наконец, создание компьютерной программы и затем решение задачи на компьютере [2]. Для активизации художественно-проектной деятельности в образовательном аспекте особенное значение имеют четыре основных типа интерпретации дискурса, которые возможно экстраполировать и на проектный дискурс:

- 1) *семиотические* трактовки, в которых дискурс дизайн-проектирования рассматривается как знаково-символическое культурное образование;
- 2) *социально-коммуникативные* трактовки, акцентирующие внимание на коммуникативных целях и социальных функциях дизайн-проектирования;
- 3) *постмодернистские* трактовки, представляющие дискурс дизайн-проектирования как сетевое коммуникативное пространство, в котором происходит конструирование и переформатирование реальности;

4) *критический дискурс-анализ*, соединяющий элементы различных трактовок дискурса [3].

Последний из названных типов является наиболее востребованным и актуальным в современном дизайн-проектировании, так как содержит в себе потенциал объединения нескольких взглядов, взаимодополняющих друг друга.

В данном контексте необходимо сформулировать определение *художественно-проектной деятельности* как *творческой, направленной на создание и формообразование социокультурной коммуникации, посредством знаково-символических форм и качественно новых художественных моделей (объектов) предметно-пространственной среды, культурных образцов и субъективно или объективно значимых ценностей информационного пространства.*

Таким образом, активизация художественно-проектной деятельности студентов-дизайнеров посредством информационно-коммуникационных технологий возможна при наличии как традиционных, так и инновационных ее составляющих и определена следующими детерминантами:

- концептуальность дизайн-проектирования, или трансляция проектной культуры дизайнера соответствующей концептуальной смене парадигмы дизайна;
- экологичность дизайн-проектирования в его визуальных, семантических и технологических решениях;
- аксиологичность дизайн-проектирования, его встроенность в систему ценностей дизайнера, его профессиональной этики, комплементарно взаимодействующая с заказчиком проекта посредством прояснения и обоснования выбранных решений;
- коммуникативность дизайн-проектирования, или уровни воздействия на потребителя, закладывается в проект как имманентная характеристика современного проектирования, в котором организация коммуникации между потребителем и продуктом дизайна (визуальной, эмоциональной, интеллектуальной, тактильной, аудиальной и др. или их взаимодействия), является основополагающей ценностью;
- семиотичность дизайн-проектирования, здесь профессиональный язык раскрывается как перформативный, в котором создаваемые объекты дизайна пропорциональны высказываниям, построенным на аксиологическом базисе. Необходимо отметить, что описанные детерминанты дифференцируются в зависимости от структурных компонентов проектной культуры студентов-дизайнеров, таких как: установочный, концептуально-проектировочный, продуктивный.

Второй блок понятий, в котором реализуются возможности активизации художественно-проектной деятельности студентов-дизайнеров, связан непосредственно и с ИКТ. В теоретических исследованиях, посвященных внедрению средств ИКТ в образование, отмечается существование нескольких подходов к позиционированию средств ИКТ, используемых в учебном процессе. Наиболее перспективным и содержательным признан подход, при котором в качестве критерия классификации выступает область методического назначения средств ИКТ. К основным структурным элементам такой классификации относятся следующие средства ИКТ: информационно-поисковые и справочные, обучающие, тренажеры, демонстрационные, имитационные, лабораторные, моделирующие, расчетные, учебно-игровые. Б.С. Гершунский рассматривает информационные технологии в целом и компьютер в частности как средство повышения эффективности педагогической деятельности, которое не только «... способно внести коренные преобразования в само понимание категории «средство» применительно к процессу образования, но и существенно повлиять на все остальные системы - цели, содержания, методы и организационные формы обучения, воспитания и развития личности в учебных заведениях любого уровня и профиля» [4]. В такой транскрипции, *средства информационных технологий* представляют собой комплекс технических, аппаратных, инструментальных программных средств, систем и устройств, функци-

онирующих на базе вычислительной техники. В состав компьютерных средств входят локальные сети (Internet), глобальные сети (Internet, Glusnet, Runnet и др.), спутниковые связи. Для дизайн-педагогической деятельности особое значение имеет возможность применения информационно-коммуникационных технологий сразу в нескольких направлениях в качестве:

- средств поиска, хранения, систематизации информации;
- средства обучения;
- художественного выражения;
- контроля эффективности обучения и проверки принципиальной возможности реализации проекта в конкретной среде.

Каждое из приведенных направлений обладает спецификой применений средств ИКТ, способных активизировать проектную деятельность студента.

*Поиск и хранение информации* может осуществляться посредством использования таких средств и технологий, как: ПК и различное программное обеспечение, соответствующее решению поставленной задачи, Internet и его производные (поисковые системы, профессиональные Internet-сообщества и сетевые объединения), электронные образовательные ресурсы (ЭОР), электронные библиотеки, открытые образовательные ресурсы (ООР), а также средства цифровой фиксации и получения изображений. К ИКТ реализующим себя в качестве *средств обучения* относятся: электронные образовательные ресурсы (ЭОР), электронные библиотеки, открытые образовательные ресурсы (ООР), электронные учебники, мультимедийные методические пособия, программное обеспечение, в качестве инструментария для реализации проектных задач и т.д. ИКТ используемые *в качестве художественного выражения* – это непосредственно ПК и профессиональное программное обеспечение, а также широкий спектр медиатехнологий, используемых в цифровых типографиях, фото- и видеолaborаториях. Профессиональные программы, проверочные модули и электронные тесты применяются и на стадии *контроля и эффективности обучения*. Internet-сообщества и профессиональные объединения в сети Internet, в некоторых случаях могут быть использованы в качестве статистической базы, *на стадии критического анализа* готового проекта. Профессиональные среды программирования – для проверки принципиальной возможности его реализации в конкретной среде.

Для активизации художественно-проектной деятельности важно учитывать психофизиологический аспект воздействий ИКТ. С.Г. Григорьев и В.В. Гриншкун отмечают влияние природы средств ИКТ на формирование и развитие психических структур человека, в том числе мышления. Печатный текст, отмечают исследователи, строится на принципе абстрагирования содержания от действительности, и в большинстве языков организуется как последовательность фраз в порядке чтения слева направо, что формирует навыки мыслительной деятельности, обладающей структурой, аналогичной структуре печатного текста, которой свойственны такие особенности, как линейность, последовательность, аналитичность, иерархичность [4]. Такие средства массовой коммуникации, как фотография, кино, радио, телевидение имеют структуру, создающую модели узнавания, обращенные к чувственной стороне субъекта. Далее исследователи приходят к выводу о том, что компьютер должен увеличить потенциал человеческого мышления, вызвать определенные изменения в структуре мыслительной деятельности. В процессе активизации художественно-проектной деятельности студентов посредством ИКТ основными являются процессы организации и интерпретации информации. Она может быть закодирована и представлена на экране дисплея в виде математических символов, таблиц, графиков и диаграмм, изображения процессов, дополняемых звуком, цветным изображением и т.п. Как следствие, подобная среда формирует такие характеристики мышления, как склонность к экспериментированию, гибкость, связность, структурность. Наиболее актуальным для активизации художественно-проектной деятельности является тот факт, что данные характеристики соответствуют познавательным процессам, связанным с творческой деятельностью и решением проблем. Понимание сущности яв-

лений и тактика решения проблем – практики, актуальные для проектной деятельности. Они могут быть реализованы как способность воспринимать по-новому кажущиеся очевидными факты, находить способ соединения несвязанных, на первый взгляд, вещей, устанавливать оригинальные связи между новой и старой информацией [5]. Весь спектр трансформаций теории и практики дизайн-проектирования, связанный и использованием ИКТ в дизайн-образовании, имеет место в случае интеграции их в психологическую структуру деятельности студента. Анализируя психологическую структуру деятельности, разработанную А. Н. Леонтьевым, логичным становится вывод о том, что наличие у человека потребности приводит к активности. Это активность на начальной стадии деятельности недостаточно дифференцирована, но ориентирована на поиск предмета актуализированной потребности. Это некая психологическая предготовленность, предрасположенность к возможной деятельности [6]. Средства ИКТ в полной мере способны сформировать и способствовать интеллектуальному и визуальному накоплению такой активности посредством предоставления доступа к профессиональным источникам передовых проектных решений. Психологи отмечают, что далее происходит событие, при котором потребность находит свой конкретный предмет или мотив. Таким образом, поисковая активность психологически преобразуется в конкретную, отдельную деятельность.

В рамках реализации процесса дизайн-проектирования студентами потребность находит себя не в одном предмете, а в нескольких. На стадии исследования задач проекта, сбора материалов средства ИКТ позволяют собрать, накопить информацию и смоделировать интеллектуальную и далее визуальную концепцию проекта. Поэтому на практике подобная деятельность является многомотивированной, комплексной. А.Н. Леонтьев полагал, что включение смысла в напряженную структуру деятельности создает значимость, которая увеличивает напряженность и определяет затраты энергии индивида [6]. При активизации определенной потребности, например в профессиональном становлении и росте, студент настраивается на постановку и решение все новых и новых целей и задач, проявляет интерес к процессу приобщения к проектной культуре. Научная классификация мотивов находится в процессе становления, однако в педагогической практике принято различать ведущие группы: социальные мотивы, познавательные, моральные, мотивы общения и самовоспитания [7].

Подводя итоги, можно отметить следующее: для того, чтобы приводить к научению при минимальных затратах усилий и средств со стороны обучающегося и обучаемого, учебная деятельность должна соответствовать основному требованию – быть разносторонне мотивированной. В целом, активизация художественно-проектной деятельности посредством информационно-коммуникационных технологий имеет целью эффективную профессиональную проектную деятельность, в основе которой доказательность проекта. Она основывается на принятых в данное время критериях качества и эффективности, таких как: экологичность, экономичность, достоверность, коммуникационная открытость, эмоциональная привлекательность, убедительность, концептуальная целостность, социальная гармоничность, полнота, завершенность. Доказанной в проекте должна быть, прежде всего, принципиальная возможность реализации его в данной среде – при принятых онтологических предпосылках ее строения.

Обобщая изложенное, следует отметить, что процесс активизации проектной деятельности студентов дизайнеров посредством ИКТ запускает механизм познания закономерностей предметных областей и окружающей среды. Актуализирует использование потенциала новых информационных технологий для развития личности обучаемого, повышения уровня его активности и профессиональной компетентности, способностей к альтернативному мышлению, формирования умений разрабатывать стратегию поиска решений как учебных, так и практических задач, прогнозировать результаты реализации принятых решений на основе моделирования изучаемых объектов, явлений, процессов, взаимосвязей между ними.

## Библиографический список

1. **Баланд, Т.В.** Аксиологические аспекты дизайна: дисс. ... д-ра филос. наук: 09.00.04 / Т. В. Баланд. – М., 2004. – 117 с.
2. **Генисаретский, О.И.** Проектная культура и концептуализм [Электронный ресурс] / О. И. Генисаретский URL. – Режим доступа: <http://prometa.ru/olegen/publications/9> (дата обращения: 20.10.2011)
3. **Русакова, О.Ф.** PR-Дискурс: Теоретико-методологический анализ / О. Ф. Русакова, В. М. Русаков. – Екатеринбург: УрО РАН, Институт международных связей, 2008. – 340 с.
4. **Гершунский, Б.С.** Прогностический подход к компьютеризации // Советская педагогика. 1986. №7. С. 43–48.
5. **Григорьев, С.Г.** Возможности применения информационных и коммуникационных технологий в открытом образовании [Электронный ресурс] / С.Г. Григорьев, В.В. Гриншкун URL. – Режим доступа: <http://www.ido.rudn.ru/Open/ikt/3.htm> (дата обращения: 8.01.2013)
6. **Леонтьев, А.Н.** Деятельность. Сознание. Личность / А. Н. Леонтьев. – М.: Просвещение, 1975. – 214 с.
7. **Щукина, Г.И.** Активизация познавательной деятельности учащихся в учебном процессе / Г. И. Щукина. – М.: Просвещение, 1979. – 160 с.

Дата поступления  
в редакцию 28.12.2012

**O.V. Larina**

**THE INTENSIFICATION OF THE ARTISTIC PROJECT OF THE ACTIVITIES  
OF STUDENTS-DESIGNERS MEANS OF INFORMATION-COMMUNICATION  
TECHNOLOGIES**

Moscow state academy of art and industry n.a. S.G. Stroganov (Ural branch)

**The focus** of consideration of this article is design education in the conditions of shift of a social paradigm and society informatization.

**The subject** of research is focused on search of opportunities of activation of art and design activity of students designers by means of information and communication technologies. **The purpose** of this work is need of identification of methodological conditions and characteristics of ICT with which activization of art and design activity of students is possible.

In article **research** of feature of art and design activity and design culture of the designer as a whole, in the conditions of society informatization are carried out. The determinants of design culture traditional and created in the conditions of informatization of society are analyzed. The discourse nature of modern design is designated. Four main types of interpretation of a discourse which are possible for extrapolating are noted and fundamental characteristics and features of use of ICT Are output to a design discourse in design education. Possibilities of application in design pedagogical activity of information and communication technologies in several directions are reflected: as means of search, storage, information systematization, as tutorials, as means of art expression, as control of learning efficiency and check of basic possibility of implementation of the project in the concrete environment. Need of integration of ICT as means of activation of art design in psychological structure of activity of students designers is designated.

To the **main conclusions**, it is possible to carry, the following:

- process of activation of design activity of students of designers by means of ICT starts the mechanism of knowledge of regularities of subject domains and environment;
- use of the means of ICT focused on the purpose raises level of professional competence and abilities to alternative thinking, and as abilities to develop strategy of search of decisions both educational, and practical tasks;
- application of means of ICT at a stage of the critical analysis of the project allows to predict results of implementation of the made decisions on the basis of modeling of studied objects, the phenomena, processes, interrelations between them.

*Key words:* design education informatization, design paradigm, art and design activity, design culture, information and communication technologies, design discourse, means of information technologies.

УДК 378.1: 159.9

Т.Г. Мухина

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
В УСЛОВИЯХ ЕДИНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Раскрываются ведущие направления интеграции в области дополнительного профессионального образования. Представлены особенности глобальной, содержательной, организационно-технической и личностно-деятельностной интеграции.

*Ключевые слова:* дополнительное профессиональное образование, интеграция, направления интеграции, единое образовательное пространство.

Современное развитие и становление системы дополнительного профессионального образования (далее ДПО) как открытой социальной системы протекает в условиях глобализации и ускорения научно-технического развития и сопряжено, прежде всего, с процессами интеграции в мировое образовательное пространство. Повышение роли ДПО в системе непрерывного образования на современном этапе обусловлено следующими условиями:

- модернизацией отечественной экономики;
- ускорением НТП в ведущих отраслях промышленности;
- переходом Российского ВПО на многоуровневую систему подготовки;
- обязанностью повышения квалификации состоявшимися специалистами каждые три – пять лет;
- общественной аттестацией и сертификацией;
- интеграцией экономики РФ с экономикой зарубежных стран и соответственно созданием в системе профессионального и дополнительного образования единого образовательного поля;
- подготовки и переподготовки специалистов с выдачей им документов международного образца;
- необходимостью существенного повышения компетентности руководителей и др. [1; 2].

Диверсификация сферы образовательных услуг, инновационная политика в области образования требуют от специалистов высокой мобильности, способности к самообразованию [2,3]. В современных условиях становление системы ДПО как автономного институционального компонента системы НПО протекает в условиях глобализации и ускорения научно-технического развития и сопряжено, прежде всего, с процессами вхождения РФ в единое образовательное пространство. Интеграционные процессы в соответствии с концепцией З.Ш. Каримова, мы рассматриваем в следующих направлениях:

- глобальном;
- институциональном;
- содержательной интеграции;
- организационно-технологическом;
- личностно-деятельностном [4].

Рассмотрим характеристику каждого направления интеграции. *Глобализация* проявляется в изменении парадигм образования. Начинает развиваться наднациональное образование, которое, по сути, не только отвергает моноцентричную модель развертывания образования, но и формирует новый субъект. Не только государство, но и сам человек становится субъектом мирового образовательного поля [5]. Отечественными учеными (З.И. Батюковой,

В.А. Мясниковым, Н.Н.Найденовой, И.А. Тагуновой) определено наднациональное образование как образование, предоставляющее образовательные услуги каждому человеку в различных странах без обсуждения дипломов и сертификатов. Мы придерживаемся данной концепции и считаем, что человек становится активным субъектом изменений в образовании, выходящем за рамки национального.

Таким образом, современный дипломированный специалист в своей профессиональной деятельности становится в условия мирового хозяйствования, что обуславливает необходимость формирования у него компетенций, актуальных не только в своей стране, но и за рубежом. Каждый человек в современных условиях может участвовать в международных проектах и исследованиях, изучать международные программы; обучаться в зарубежной стране; получать гранты и др. Указанные виды образовательной деятельности органично вписываются в систему ДПО и характеризуют структурные элементы таких видов, как повышение квалификации, стажировка и самоподготовка (включает самообразование и самовоспитание).

Опыт зарубежных стран показывает, что путём расширения и совершенствования ДПО в условиях мирового образовательного пространства можно значительно снизить социальную напряжённость в обществе, решить другие социально-экономические задачи. В этой связи вузам необходимо активизировать деятельность совместно с работодателями по: 1) созданию образовательных услуг; 2) разработке программ переподготовки специалистов, востребованных мировым и российским рынком труда; 3) выявлению новых ресурсов для организации ДПО, в том числе кадровых и материально-технических [6].

*Институциональная интеграция.* Р. Асадулин, З.А. Багишев, В.И. Загвязинский, А.С. Молькова, С.Н. Сорокоумова и другие отечественные ученые, характеризуя различные формы институциональной интеграции, указывают на региональную основу интеграции. Институциональное взаимодействие осуществляется на основе региональных университетов, что является перспективным направлением, имеющим традиционные исторические причины.

В настоящее время к числу образовательных учреждений ДПО принадлежат академии; институты повышения квалификации (усовершенствования) - отраслевые, межотраслевые, региональные; курсы (школы, центры) повышения квалификации, учебные центры службы занятости. Однако в соответствии с распоряжением Правительства РФ от девятого марта 2006 г. № 306-ри Приказом ФА по образованию от 27 марта 2006г. № 200 реформируется и организуется новая интегрированная система ВПО и ДПО университетов. Как известно, идея образования ассоциаций, консалтингов и т.д. не является новой и имеет историческую основу. Однако современные условия, обоснованные вхождением России в единое образовательное пространство, ускорили объединения вузов и их подсистем, осуществляющих непрерывное профессиональное образование.

Осуществление взаимосвязей между вузами образуют внешнюю интеграцию, а между структурными подразделениями вуза или комплекса – внутреннюю. Главные задачи данных союзов: удовлетворение потребностей специалистов в получении знаний о новейших достижениях в соответствующих отраслях науки и техники, передовом отечественном и зарубежном опыте; организация и проведение повышения квалификации профессиональной переподготовки специалистов; организация и проведение научных исследований, научно-технических и опытно-экспериментальных работ, консультационная деятельность; научная экспертиза программ, проектов, рекомендаций, групп документов и материалов.

*Содержательная интеграция.* Согласно Закону «Об образовании», учреждениям дополнительного профессионального образования (ДПО) принадлежит самостоятельная роль в разработке образовательных программ. Образовательные программы ДПО отражают цели, задачи, содержание дополнительного образования, принципы и условия его формирования и реализации. Дополнительная профессиональная образовательная программа позволяет реа-



лизовывать в процессе обучения задачи, установленные для различных направлений дополнительного образования. Ведущими подходами в построении содержания образовательной программы являются модульный и компетентностный и деятельностный подходы, позволяющие обеспечить гибкость и вариативность программ, а также интеграцию содержания основных и дополнительных программ на всех уровнях.

Содержательная интеграция непрерывного профессионального образования между основным и дополнительным образованием обеспечивает не только подготовку узких специалистов для конкретной области деятельности, но и постоянное развитие личности будущего специалиста, когда обучающийся может повышать свою общую культуру, совершенствовать социальную и профессиональную компетентность (мастерство) на каждом из уровней образования

Дополнительное профессиональное образование как одна из важнейших подсистем непрерывного образования взрослых, которая включает в себя переподготовку специалистов, повышение квалификации, профессиональную переподготовку, стажировку и самоподготовку (самовоспитание, самообучение и самообразование). Оно занимает наиболее продолжительный период в системе непрерывного образования человека, так как фактически начинается от «старта» профессиональной деятельности и продолжается до ее «финиша».

Содержание ДПО исследователи рассматривают на разных уровнях. На уровне теоретического представления формируется методологический замысел, осуществляется тщательное философское, социальное, психолого-педагогическое обоснование содержания ДПО, обосновываются функциональное назначение, роль и место каждой из учебных дисциплин в системе содержания ДПО, формируются ее ценности, выявляется состав, структура основных элементов содержания учебного предмета.

Учебный предмет представлен инвариантной и вариативной частями. Инвариантная часть продиктована Требованиями к минимуму содержания ДПО и уровнем профессиональной подготовки по конкретной специальности, которые разрабатываются в соответствии с Государственным стандартом ВПО. Вариативная часть позволяет обеспечить учет индивидуальных запросов и потребностей обучающихся в их профессиональном росте и личностном саморазвитии, удовлетворить их профессиональные интересы, оказать помощь в подготовке к выполнению должностных обязанностей. Уровень учебного материала, предназначенного для усвоения обучающимися в системе ДПО, фиксируется в образовательных документах, опубликованных курсах лекций, в видеопрограммах, сборниках практических заданий и др.

На субъектно-личностном уровне осуществляются профессионально-личностная рефлексия, проектирование своих образовательных маршрутов – индивидуальных образовательных программ – самими обучающимися. Уровень, на котором проектируемое индивидуальное содержание становится достоянием каждого обучающегося, результатом реализации, который отражается в развитии ценностей и идеалов, в «приращивании» системы профессиональных знаний, развитии профессиональных умений и навыков, в формировании и обогащении опыта профессионально-личностного саморазвития, в развитии профессиональной культуры, человеческого потенциала [7].

В соответствии с указанными законодательными актами, программы ДПО могут реализовываться совместно несколькими образовательными учреждениями дополнительного образования, в том числе зарубежными. По завершении обучения слушателям выдаются соответствующие документы.

В процессе обучения слушателей эффективно используются инновационные методы и технологии обучения. К ним относятся: интернет-технологии (при реализации дистанционного образования); блочно-модульный принцип освоения программы обучения; инновационные интерактивные технологии и др. В процессе обучения взрослых педагоги обращаются к таким формам проведения занятий, как лекции, семинарские, практические занятия.

Конечно, лекция – это традиционная форма организации обучения взрослых, но сегодня ее организация характеризуется инновационными подходами. Активно используются активные и интерактивные способы и технологии обучения. Инновационными видами лекции определены: лекция-пресс-конференция, лекция вдвоем (или бинарная), лекция с заранее запланированными ошибками, лекции с использованием презентаций (лекции визуализации), лекции с элементами игровых методов проведения занятий, лекции с проблемным изложением знаний. Технологии организации данных видов лекций направлены на достижение запланированных результатов обучения, и, прежде всего, развитие продуктивного мышления. Обучающиеся из позиции обучаемых переходят в соучастников образовательного процесса – обучающихся. Интерактивные технологии на современном этапе обучения соотносятся с включением в учебный процесс ИКТ, применение которых в процессе организации семинаров, практических занятий, самостоятельных работ расширяют возможности и границы образовательного процесса. Дистанционное обучение, организация вебинаров, телеконференций, телетрансляций, теледискуссий, интерактивных олимпиад – перечень далеко не всех форм организации и проведения современных занятий в высшем учебном учреждении.

Современные формы проведения семинаров и практических занятий способствуют формированию профессионального мышления и компетенций в области профессиональной деятельности.

*Личностно-деятельностное направление.* Личностно-деятельностный подход рассматривается нами как основа организации обучения, способ интенсификации. Особое внимание уделяется развитию одной из составляющих личностной сферы, которую в психологии принято называть личностным смыслом (личной значимостью). Ведущей задачей данного направления интеграции является формирование у слушателей готовности к инновационной деятельности. Сущность инновационной деятельности (в русле концепций В.А. Сластенина и Л.С. Подымова) мы определяем как деятельность, связанную с трансформацией идей, в новый или усовершенствованный технологический процесс, использованный в практической деятельности, либо как новый подход к социальным услугам.

Особую роль приобретает сопряжение индивидуальных образовательных программ, складывающихся в рамках самообразования как вида ДПО.

Современный университет – это учебно-методический, научно-исследовательский, консалтинго-экспериментальный центр, одной из функций которого является организация и координация подготовки и повышения квалификации и профессиональной переподготовки руководящих кадров, специалистов, а также преподавателей и сотрудников университета и других учебных заведений начального, среднего, высшего и ДПО; организация и проведение научных исследований, научно-технических и опытно-экспериментальных работ, консультационная деятельность; научная экспертиза программ, проектов, рекомендаций, групп документов и материалов [8].

Эффективность любой образовательной системы зависит от успешности деятельности преподавательского состава. Новые требования к образовательному процессу обуславливают необходимость обеспечения инновационных подходов подготовки преподавателей, занятых в ДПО. Данное положение не вызывает сомнения. Однако многие исследователи и представители административного аппарата в погоне за инновациями не придают большого значения личности преподавателя в образовательном процессе. Преподаватель современного вуза, конечно, не только и не столько транслятор накопленного социального опыта прошлыми поколениями, он и организатор, и тренер и коммуникатор. Бесспорно, современный преподаватель высшей школы должен владеть навыками менеджмента и управления. Но личностные качества педагога, педагогические способности, преданность своему делу, профессиональная педагогическая культура, способность к созидательной деятельности на основе общечеловеческих и национальных ценностей являются не просто актуальными и востребованными в настоящее время, но и первостепенными.

Иллюстрацией к выделенным нами положениям могут послужить результаты опытной работы, проведенной нами на базе вузов Москвы и Н.Новгорода. К формирующей работе привлекались 262 студентов-магистрантов, осваивающих образовательные программы дополнительного профессионального образования параллельно основному (получение дополнительной квалификации преподаватель высшей школы). Из них 170 магистрантов технического направления и 92 магистранта общественно-гуманитарного направления. В исследовании в качестве экспертов участвовали преподаватели вуза. Исследование проводилось с 2009 по 2011 гг.

Опытная работа была подчинена следующим *задачам*:

1) определить оптимальные условия, необходимые для развития *профессионально-значимых* (предметных) *компетенций* в области педагогической деятельности в учебном процессе вуза;

2) активно использовать в процессе обучения интерактивных технологии (в том числе ИКТ);

3) выявить наиболее характерные качественные особенности в развитии профессионально-значимых компетенций у студентов-магистрантов технического и общественно-гуманитарного направления до и после реализации авторской программы;

4) оценить общие возможности развития *профессионально-значимых* (предметных) *компетенций* в условиях экспериментального обучения.

В соответствии с обозначенной целью и задачами опытно-педагогической работы в исследовании принимали участие две экспериментальные группы ЭГ и ЭГ<sub>1</sub> обучающихся по программе дополнительного профессионального образования в рамках двухуровневой системы подготовки «бакалавриат-магистратура». Для сравнения результатов опытного педагогического исследования были выбраны две контрольные группы К и К<sub>1</sub>. Группу К составили магистры ННГАСУ, обучающиеся в 2009–2011 гг., в количестве 82 чел. Группу К<sub>1</sub> составили студенты – магистранты МГГУ им. М.А. Шолохова (050700 «Психология и педагогика дополнительного образования», 050700 «Психология и педагогика дошкольного образования», 030300 «Позитивная психология», 030300 «Организационная психология»), обучающиеся в 2009-2011 гг., 44 чел.

Для исследования составляющих *профессионально-значимых* (предметных) *компетенций* были использованы следующие психодиагностические методики, представленные в табл. 1.

**Таблица 1**

**Психодиагностический инструментарий для оценки уровня сформированности профессионально-значимых компетенций у студентов-магистрантов**

Методики	Профессионально-значимые компетенции		
	Когнитивно-деятельностный компонент	Мотивационно-ценностный компонент	Эмоционально-волевой компонент
Методика оценки умений педагогического общения И.В. Макаровской	Методика «Педагогические ситуации» (Р.С. Немов)	Тест «Выявление наблюдательности» (А.А Карелин)	

В разработанной нами опытной педагогической работе в диагностическом исследовании были использованы методы статистического анализа данных, представленные процедурами критериально-уровневого анализа, процентного распределения-студентов-магистрантов по уровням, расчета среднего уровня показателя (СУП) и статистической значи-

мости различий СУП по  $\phi$  критерию (угловое преобразование Фишера). СУП представляет собой интегральный показатель уровня развития и проявления изучаемого свойства, учитывающий процентное распределение по уровням показателей. Расчет данного показателя осуществляется для трехуровневой шкалы по формуле 
$$\text{СУП} = \frac{a+2b+3c}{100}$$
, где  $a, b, c$  – процентно выраженные количества испытуемых, находящихся соответственно на 1, 2, или 3-м уровнях развития данной способности.

Средний уровень показатель в нашем исследовании может быть выражен величинами от 1 (нижний показатель, если все обследуемые находятся на низком уровне изучаемого свойства) до 3 (высший показатель возможен в случае, если все обследуемые находятся на высоком уровне развития изучаемого свойства). Рассчитывается данный показатель до сотых долей и очень чувствителен к статистическим различиям между сравниваемыми группами.

Оценивая уровень сформированности навыков педагогического общения после формирующего эксперимента у технического направления ЭГ, мы можем увидеть положительную статистически значимую динамику по всем составляющим когнитивно-деятельностной компетенции: рефлексивно-перцептивной, самораскрытие (самоактуализации) и организации коммуникации (диалогический подход к студентам). Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Динамика результатов методики «Оценки умений педагогического общения»  
у магистров технического направления до и после опытной работы**

Компетенции		ЭГ до		СУП	ЭГ после		СУП	КГ до		СУП	КГ после		СУП
		абс.	%		абс.	%		абс.	%		абс.	%	
рефлексивно-перцептивные	сформировано	21	24	2,21	48	53	2,59	17	21	2,20	22	27	2,27
	не достаточно сформировано	65	74		42	47		64	78		60	73	
	не сформировано	2			0	0		1	1		0	0	
самораскрытие	сформировано	8	9	2,04	17	19	2,18	5	6	2,02	6	7	2,06
	не достаточно сформировано	76	86		73	80		74	90		75	92	
	не сформировано	4	5		0	0		3	4		1	1	
диалогический подход к студентам	сформировано	17	18	2,21	36	40	2,45	17	21	2,45	23	28	2,25
	не достаточно сформировано	71	80		54	60		62	76		57	70	
	не сформировано	2	2		0	0		3	4		2	2	
Σ		88	100		88	100		82	100		82	100	

Сформированность рефлексивно-перцептивных умений у обучающихся ЭГ возросла статистически значимо (24% / 55%), самораскрытие (9 % / 19%), на уровне тенденции, умение вести диалог в ходе общения – 19% / 41%, что статистически значимо по  $\chi^2$  – критерию на уровне достоверности  $p < 0,05$ . В КГ существенной динамики выявлено не было. Так, сформированность рефлексивно-перцептивных умений составила 21% / 27%,

самораскрытие повысилось на уровне тенденции 6% / 7%, а умение вести диалог несколько выше – 21% / 28%.

Таблица 3

**Динамика результатов методики «Оценки умений педагогического общения» у магистров общественно-гуманитарного направления до и после опытной работы**

Компетенции		ЭГ <sub>1</sub> до		СУП	ЭГ <sub>1</sub> после		СУП	КГ <sub>1</sub> до		СУП	КГ <sub>1</sub> после		СУП
		абс.	%		абс.	%		абс.	%		абс.	%	
рефлексивно-перцептивные	сформировано	17	35	2,27	26	54	2,54	15	34	2,27	18	41	2,40
	не достаточно сформировано	27	57		22	46		26	59		26	59	
	не сформировано	4	8		0	0		3	7		0	0	
самораскрытие	сформировано	6	13	1,58	12	25	2,25	3	7	1,95	6	14	2,11
	не достаточно сформировано	40	83		36	75		36	81		37	84	
	не сформировано	2	4		0	0		5	11		1	2	
диалогический подход к студентам	сформировано	14	29	2,22	34	71	2,70	12	27	2,18	14	32	2,27
	не достаточно сформировано	31	65		14	29		28	63		28	63	
	не сформировано	3	6		0	0		4	9		2	4	
Σ		48	100		48	100		44	100		44	100	

Несколько иная картина наблюдается в исследовании компетенций при оценке умений педагогического общения у магистров гуманитарного направления. Так, сформированность рефлексивно-перцептивных умений у магистрантов ЭГ<sub>1</sub> возросла статистически значимо (35% / 54%), самораскрытие (13% / 25%), что статистически значимо по  $\chi^2$  – критерию на уровне достоверности  $p < 0,05$ , наиболее статистически значимую достоверность в сформированности компетенции мы получили в умении организовать диалог в ходе общения (29% / 71%).

В КГ<sub>1</sub> существенной динамики выявлено не было. Так, сформированность рефлексивно-перцептивных умений составила 34 % / 41%, самораскрытие повысилось на уровне тенденции 7% / 14%, а умение вести диалог стало несколько выше у третьей части выборки – 27 % / 32 %.

Итак, нами были выявлены наиболее характерные качественные особенности в развитии профессионально-значимых компетенций у студентов-магистрантов технического и общественно-гуманитарного направления. Наиболее существенные статистически значимые различия до и после реализации авторской программы мы получили по компетенции «Диалогический подход к студентам». Она оказалась более выраженной у студентов гуманитарного направления.

Результаты методики «Педагогические ситуации» у магистров технического направ-

ления до и после опытной работы показали статистически значимые различия в развитии и проявлении педагогических способностей (табл. 4).

Таблица 4

**Результаты методики «Педагогические ситуации» у магистров  
технического направления до и после опытной работы**

Педагогические способности	ЭГ до		СУП	ЭГ после		СУП	КГ до		СУП	КГ после		СУП
	абс.	%		абс.	%		абс.	%		абс.	%	
высокоразвитые	7	8	1,77	26	30	2,17	6	7	1,79	11	13	1,91
среднеразвитые	54	61		57	1		53	65		53	65	
слаборазвитые	27	31		5	9		23	28		18	22	
	88	100		88	100		82	100		82	100	

Оценивая динамику сформированности способностей правильно разрешать педагогические ситуации, мы наблюдаем значимое различие на достаточно хорошем уровне в ЭГ. Динамика по итогам опытной работы оказалась статистически значимой в ЭГ (8% до внедрения специальных курсов и 30% после апробации), тогда как в КГ составила всего лишь 6%, что доказывает эффективность разработанной нами программы.

Результаты методики «Педагогические ситуации» у магистров гуманитарного направления до и после опытной работы показали статистически значимые различия в развитии и проявлении педагогических способностей (табл. 5). Оценивая динамику сформированности способностей правильно разрешать педагогические ситуации, мы наблюдаем значимое различие на достаточно хорошем уровне в ЭГ<sub>1</sub>. Динамика по итогам опытной работы оказалась статистически значимой в ЭГ<sub>1</sub> (6% до внедрения специальных курсов и 17% после апробации), тогда как в КГ составила всего лишь 2%, что доказывает эффективность разработанной нами программы.

Таблица 5

**Результаты методики «Педагогические ситуации» у магистров  
общественно-гуманитарного направления до и после опытной работы**

Педагогические способности	ЭГ <sub>1</sub> до		СУП	ЭГ <sub>1</sub> после		СУП	КГ <sub>1</sub> до		СУП	КГ <sub>1</sub> после		СУП
	абс.	%		абс.	%		абс.	%		абс.	%	
высокоразвитые	3	6	1,81	8	17	2,08	3	6	1,77	4	9	1,84
среднеразвитые	33	69		36	75		28	64		29	65	
слаборазвитые	12	25		4	8		13	30		11	25	
Σ	48	100		48	100		44	100		44	100	

Способность разрешать педагогические ситуации более развита оказалась у магистров технического направления 17% / 30%. Это объясняется, видимо, более ассертивной позицией (способностью конструктивно отстаивать свое мнение, демонстрируя позитивность и уважение к другим, при этом принимая ответственность за свое поведение).

Оценивая динамику сформированности наблюдательности (эмоционально-волевая), мы отмечаем повышение уровня ее развития у магистров технического направления ЭГ. Так высокий уровень развития наблюдательности показали специалисты после опытной работы (13% / 27%). В КГ изменения менее значимы (10% / 16%), однако, все они статистически значимы по  $\chi^2$  – критерию на уровне достоверности  $p < 0,05$ .

Динамика сформированности наблюдательности (эмоционально-волевая), мы отмечаем значительное повышение уровня ее развития у магистров общественно-гуманитарного направления ЭГ<sub>1</sub>. Высокий уровень развития наблюдательности показали респонденты после

опытной работы (25% / 46%). В КГ<sub>1</sub> изменения менее значимы (32% / 36%), однако все они статистически значимы по  $\chi^2$  – критерию на уровне достоверности  $p < 0,05$ .

Таким образом, организация учебного процесса в рамках реализации дополнительной профессиональной образовательной программы повышения квалификации/переподготовки предполагает комплексное использование современных образовательных технологий. Использование модульной технологии, знаково-контекстного обучения, активных (проблемная лекция) и интерактивных (кейс-технологий) методов обучения позволяет проектировать целостный образовательный процесс, в котором учитываются такие факторы, как специфика учебных дисциплин, профессиональные потребности и возможности каждого участника образовательного процесса, а также продолжительность и материально-технические условия обучения.

Таким образом, система ДПО призвана прогнозировать изменения в науке, технике и обществе и действовать согласованно с этими изменениями. Поэтому и считается, что предназначение ДПО, с одной стороны, состоит в компенсации объективных недостатков и упущений предшествующей профессиональной подготовки, а с другой – в пополнении или интеграции знаний в связи с новыми достижениями науки и техники, современными требованиями к профессиям [9; 10]. Таким образом, особый статус отводится политике в области ДПО, обеспечивающей установление новых партнерских отношений и участие всех соответствующих партнеров в деятельности, касающейся всех аспектов ВПО. В системе ДПО и ВПО складываются предпосылки эффективной реализации основных принципов интеграции высшего образования в единую образовательную зону. Данный вид интеграции формируется через интегрирование образовательных программ, организационно-методических подходов, технологии и формы проведения занятий, расчет трудоемкости и определения индивидуальных маршрутов обучающихся и т.д. Дополнительное профессиональное образование в высшей школе играет важнейшую роль в обеспечении непрерывности образования, саморазвития и академической профессиональной мобильности квалифицированного специалиста.

### Библиографический список

1. **Бородачев, В. В.** ДПО и саморегулирование – новые грани развития / В. В. Бородачев // Сборник трудов по проблемам дополнительного профессионального образования. – М., 2007. Вып. 11.
2. **Наумова, Т. Б.** Дополнительное профессиональное образование в системе непрерывного образования // Компетентность. 2009. № 5. С. 10–16.
3. **Мясоедов, С.П.** Болонская декларация и конкурентоспособность выпускников российской высшей школы // Национальные проекты. 2010. № 5–№ 6.
4. **Каримов, З. Ш.** Теория и практика институциональной интеграции высшего профессионального педагогического образования на основе синтеза внешнего и внутреннего компонентов: автореферат дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.00 / З. Ш. Каримов. – Уфа, 2009. – 47 с.
5. **Мясников, В.А.** Образование в глобальном измерении: монография / В.А. Мясников, Н.Н. Найдёнова, И.А. Тагунова. – М., ИТИПРАО, 2009. – 512 с.
6. **Мухина, Т.Г.** Направления интеграции дополнительного высшего профессионального образования в единое образовательное пространство / Т.Г. Мухина // Известия Самарского НЦ РАН. 2011. Т. 13. №2(6). С. 1463–1466.
7. Педагогика профессионального образования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Е. П. Белозерцев [и др.]; под ред. В. А. Сластенина. – М.: Издательский центр «Академия». 2006. – 368 с.
8. **Бородачев, В. В.** Особенности формирования инновационной инфраструктуры вуза в условиях перехода высшего образования на многоуровневую систему образования // Научное, экспертно-аналитическое и информационное обеспечение национального стратегического проектирования, инновационного и технологического развития России: сб. мат. VI Всерос. научн.-практ. конф., 27–28 мая 2010 г. – М.: ИНИОН РАН. 2012. Ч 2. С. 308–311.

9. **Мухина, Т. Г.** Содержательные характеристики дополнительной образовательной программы // Приволжский научный журнал. 2010. № 1(13). С. 221–226.
10. Дополнительное профессиональное образование в условиях модернизации: материалы всероссийской научно-практической Интернет-конференции (к 100-летию ЯГПУ им. К. Д. Ушинского); под ред. М. В. Новикова. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2009. – 136 с.

*Дата поступления  
в редакцию 22.12.2012*

**T. G. Mukhina**

**ADDITIONAL VOCATIONAL TRAINING IN THE CONDITIONS  
OF UNIFORM EDUCATIONAL SPACE**

Nizhny Novgorod state university of architecture and civil engineering

**Purpose:** The article describes the major trends in the field of integration of additional professional education.

**Findings:** In the system of additional vocational training formed a prerequisite to effective implementation of the basic principles of the integration of higher education into a single educational area.

**Research:** The features of a global, content, organizational, technical and student-activity integration.

**Originally/value:** This article revealed leading direction of integration of additional professional education.

**Topic:** Additional vocational training in the conditions of uniform educational space.

*Key words:* additional vocational training, system of additional vocational training, uniform educational space.



# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 53.072

В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, И.Н. Толкачев

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОГО ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Хорошо известно, что в логистической модели  $x_{n+1} = a(x_n - x_n^2)$ ,  $0 < a \leq 4$ , последовательность  $\{x_n\}$  может вести себя стохастическим образом. Однако в литературе нет сведений о вероятностных характеристиках этой последовательности таких, как функция распределения и моменты. В статье приводятся результаты обширных вычислений, восполняющие этот пробел.

*Ключевые слова:* хаос, асимптотическая периодичность, окна периодичности, гистограмма, центрированные моменты.

Сочетание «вероятностный» и «детерминированный» при изучении математических моделей представлялось бы необычным до обнаружения стохастических свойств процессов, описываемых сравнительно простыми уравнениями. В первую очередь, это относится к открытию Лоренцом «странного аттрактора» и к изучению рекуррентных последовательностей типа  $x_{n+1} = f(x_n)$ . Из последних наиболее известна (и замечательна) так называемая логистическая модель, в которой  $f(x) = a(x - x^2)$ . Качественное понимание явлений в этой модели достигнуто уже давно (см. [1]), однако некоторые вопросы остаются нерешенными. Это объясняется тем, что адекватный математический аппарат для исследования подобных моделей еще не создан и большую часть результатов приходится получать численными методами, не всегда вызывающими доверие у исследователей, предпочитающих строгие доказательства. В этой статье, примыкающей к [4], численными методами оцениваются функция распределения и моменты логистической модели, рассматриваемой как временной ряд или динамическая система.

1. В качестве справочного материала приведем основные сведения о логистической модели [1]–[4]. В рекуррентном соотношении

$$x_{n+1} = a(x_n - x_n^2) \quad (1)$$

параметр  $a$  берется из интервала  $[0, 4]$ . Это обеспечивает принадлежность  $x_n$  интервалу  $[0, 1]$ , если из того же интервала берется начальное значение  $x_0$ . При  $a < 3,56994567$  поведение траектории достаточно простое. Либо существует  $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ , либо (при  $a > 3$ ) почти все траектории асимптотически периодичны с периодами  $2 \cdot 2^k$  ( $k \geq 0$ ). Имеются  $m$  – окна периодичности, где траектория асимптотически периодична с периодами  $m \times 2^k$ . Например, 3-окно

имеет место при  $1 + \sqrt{8} < a < 3,8496\dots$ . Между окнами периодичности находятся интервалы стохастичности, а нас интересуют вероятностные характеристики траекторий из этих интервалов.

2. Предварим приведение результатов численных расчетов, изложением некоторых теоретических сведений о предполагаемых законах распределения стохастичности в логистической модели.

*Предложение 1.* При  $a > 1$  и начальном значении  $x_0$  из интервала  $[\alpha, \beta]$ , где  $\beta = \frac{a}{4}$ ,  $\alpha = \frac{a^2}{4} - \frac{a^3}{16}$ , все члены последовательности  $\{x_n\}$  принадлежат тому же интервалу.

Доказательство элементарно и заключается в проверке нужных неравенств. Отметим попутно, что  $\alpha < \beta$ .

*Предложение 2.* Если  $0 < x_0 < \alpha$  и  $a > 2$ , то начиная с некоторого  $n$  члены последовательности  $\{x_n\}$  попадают в интервал  $[\alpha, \beta]$ .

Доказательство.  $x_{n+1} > x_n \Rightarrow a(1 - x_n) > 1 \Rightarrow x_n < 1 - \frac{1}{a}$ .

Разность  $1 - \frac{1}{a} - \alpha = 1 - \frac{1}{a} - \frac{a^2}{4} + \frac{a^3}{16} = \frac{1}{16a}(a-2)^3(a+2) > 0$ , при  $a > 2$ . Поэтому, если бы члены последовательности  $\{x_n\}$  лежали вне  $[\alpha, \beta]$ , то последовательность возросла бы.

Но тогда она имела бы предел, который, как нетрудно видеть, был бы равен  $1 - \frac{1}{a} > \alpha$ .

Противоречие.

*Предложение 3.* Пусть  $F(x)$  – функция распределения стохастической величины  $X$ , чьи значения являются значениями членов последовательности  $\{x_n\}$ .

Тогда  $F(x) = 0$ , при  $x < \alpha$ ,  $F(x) = 1$ , при  $x > \beta = \frac{a}{4}$ .

Доказательство. По закону больших чисел  $F(x)$  есть предел статистической функции распределения  $F_N^*(x)$ , построенной по экспериментальным данным  $x_n$  для  $n < N$ , при  $N \rightarrow \infty$ . Предложения 1 и 2 обеспечивают  $F(x) = 0$  при  $x < \alpha$ . Второе утверждение следует из того, что  $x_{n+1} \leq \max a(x - x^2) = \frac{a}{4}$ , т.е. самое большее  $x$  не может быть вне  $[\alpha, \beta]$ .

Естественно задаться вопросом, какую часть  $[\alpha, \beta]$  занимают значения  $x_n$  при  $x_0 \in [\alpha, \beta]$ . Неожиданными оказались экспериментальные данные, полученные для  $x_1, x_2, \dots, x_{100}$  (табл. 1). В качестве  $x_0$  было взято 0,5.

Таблица 1

$a$	$\min x_n$	$\max x_n$	$\alpha$	$\beta$
3,5	0,382819	0,874997	0,382813	0,875
3,6	0,324364	0,899870	0,324000	0,900
3,7	0,258610	0,924388	0,256688	0,925
3,74	0,227476	0,934940	0,227299	0,935
3,8	0,180531	0,949989	0,180500	0,950
3,9	0,095062	0,974974	0,095062	0,975

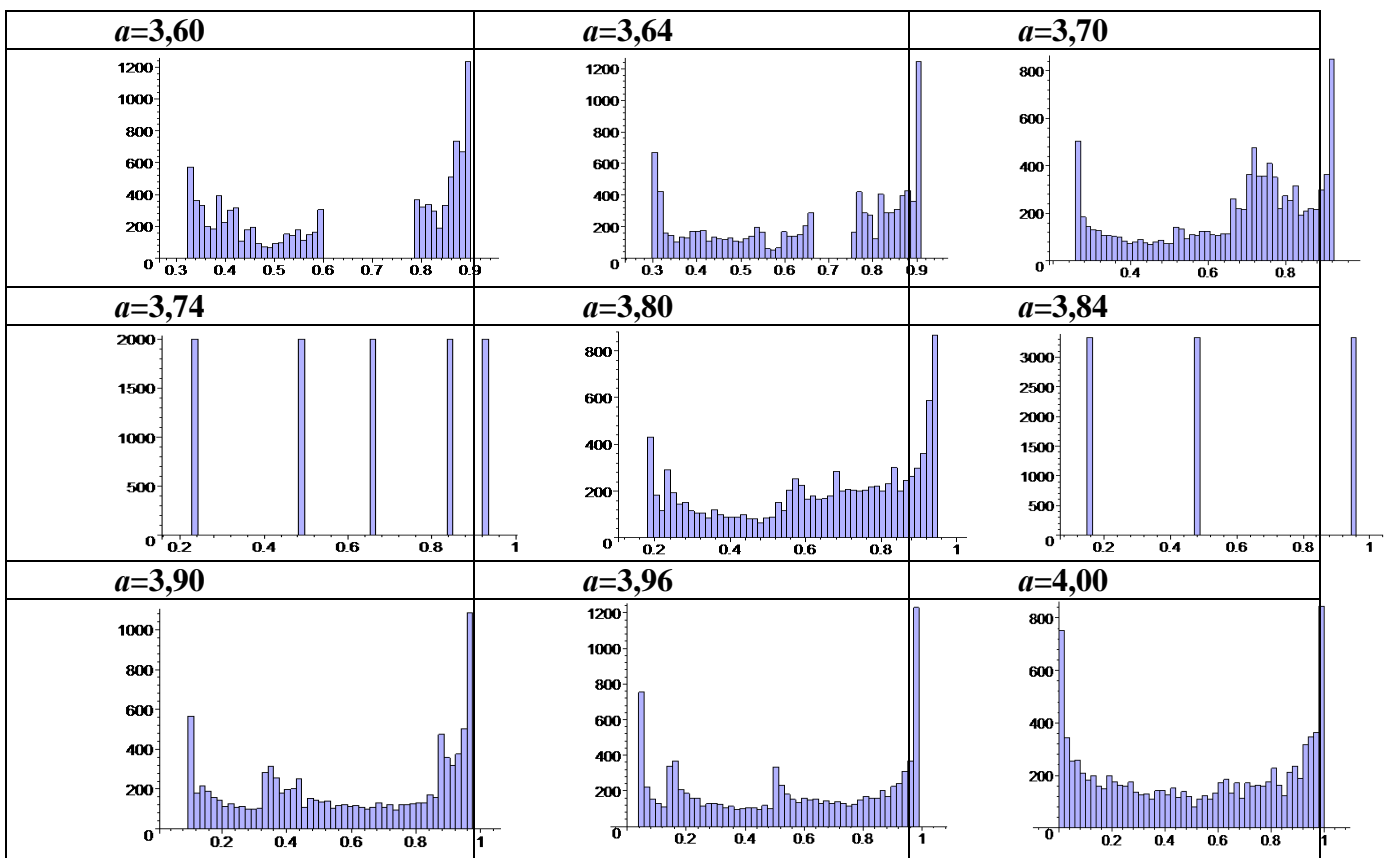
Эти данные оправдывают предложение, что  $\alpha = \inf_{F(x) > 0} (x)$ ,  $\beta = \sup_{F(x) < 1} (x)$ .

3. При исследовании распределения значений последовательности  $\{x_n\}$  внутри интервала  $[\alpha, \beta]$  следует учитывать два обстоятельства. Относительно теоретической функции распределения  $F(x)$  а priori неизвестно, обладает ли она плотностью вероятностей. Если рассматривать значения  $a$ , не входящие в области стохастичности, то это заведомо не так.

Асимптотическая периодичность ведет к тому, что при  $N \rightarrow \infty$  частоты появления определенных значений будут стремиться к нулю для тех из них, которые отличаются от значений предельной периодической траектории. Распределение становится дискретным и  $F'(x)$  не существует.

Случай  $a = 4$  дает иное. Здесь есть явное выражение для  $x_n$ :  $x_n = \sin^2(2^n t)$ . Поведение  $x_n$  зависит от поведения  $2^n t$  по mod  $\pi$ , т.е. от двоичного разложения числа  $\frac{t}{\pi}$ , определенно-го начальным условием. Из метрической теории чисел известно, что в двоичных разложениях почти всех чисел значения 0 и 1 встречаются одинаково часто, т.е.  $2^n t \text{ mod } \pi$  распределено равномерно на  $[0, \pi]$ . Отсюда легко найти и распределение  $x_n$ . Его плотность дается выражением  $f(x) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{x(1-x)}}$ .

Таблица 2



Другое обстоятельство связано с проведением компьютерных вычислений. Компьютерная ошибка в вычислении  $x_n$  и растет экспоненциально порядка  $a^n$ . Действительно, если ошибка в определении  $x_n$  есть  $\Delta_n$ , то  $\Delta_{n+1} \approx a(1-2x_n)\Delta_n$ . Поскольку  $a$  в расчетах  $>3$ , то погрешность даже при сравнительно небольших  $n$  становится существенной. Фактически при вычислении происходит усреднение значений  $x_n$  для различных начальных данных. От-

сюда следует, что при построении гистограмм зависимость от начального значения  $x_0$  должна мало проявляться. Так оно и оказалось в результате расчетов. В табл. 2 приводится ряд гистограмм, полученных по 10000 первых значений  $x_n$ . Интервал  $[0,1]$  делится на 50 подинтервалов так, что основания прямоугольников в гистограммах равны 0,02.

Визуальный анализ гистограмм приводит к следующим выводам. Наличие лакун (при  $a = 3,60$  и  $a = 3,64$ ) означает, что область значений  $x_n$  может быть несвязной. Далее наличие больших выбросов свидетельствует в пользу разрывности функции распределения. Гистограмма для  $a = 3,84$  соответствует траектории из 3-окна. Последняя асимптотически периодична с периодом 3. Периодичность именно асимптотическая, т.е. разность  $x_{n+3} - x_n$  лишь стремится к 0 при  $n \rightarrow \infty$ , но от нуля отлична. Аналогичный вывод можно сделать в случае  $a = 3,74$ . Соответствующая траектория находится в 5-окне. Это объясняет результат, полученный из вычисления показателя Херста. Значение показателя для  $a = 3,74$  должно быть равно нулю, как это имеет значение для окон периодичности. Может показаться неожиданным, что 5-окно находится между 2- и 3-окнами. Наконец, при  $a = 4$  наблюдается очень хорошее приближение к теоретическому распределению.

4. Оценки математического ожидания и центральных моментов производились по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{N \leq n} x_n, \quad m_k = \frac{1}{n} \sum_{n \leq N} (x_n - \bar{x})^k.$$

Значение  $N$  бралось равным 10 000. Результаты для тех же значений  $a$ , которые использовались для составления таблицы, приведены в табл. 3.

Таблица 3

$a$	<b>3,60</b>	<b>3,64</b>	<b>3,70</b>	<b>3,74</b>
$x$	0,6464541941	0,6533017856	0,6676716338	0,6316760141
$M_2$	0,04898453	0,04701964	0,04144264	0,06375505
$M_3$	-0,00186490	-0,00347736	-0,00572293	-0,00624473
$M_4$	0,00306926	0,00347182	0,00392354	0,00749077
$M_5$	-0,00028323	-0,00055998	-0,00102891	-0,00156973
$M_6$	0,00021872	0,00031283	0,00048794	0,00104617
$M_7$	-0,00003200	-0,00007250	-0,00016274	-0,00030166
$M_8$	0,00001706	0,00003165	0,00006848	0,00015754
$M_9$	-0,00000330	-0,00000884	-0,00002521	-0,00005307
$M_{10}$	0,00000142	0,00000343	0,00001019	0,00002462

Таблица 3(продолжение)

$a$	<b>3,80</b>	<b>3,84</b>	<b>3,90</b>	<b>3,96</b>	<b>4,00</b>
$x$	0,6417085596	0,5323780944	0,5919962520	0,5487472755	0,5026727803
$M_2$	0,06104216	0,11030207	0,08973320	0,10906247	0,1243422651
$M_3$	-0,00728511	0,00721588	-0,00494431	-0,00398569	-0,000618231
$M_4$	0,00717988	0,01825103	0,01273429	0,01859092	0,023235929
$M_5$	-0,00175536	0,00198922	-0,00187597	-0,00157263	-0,000237661
$M_6$	0,00106262	0,00307232	0,00216739	0,00357068	0,004832788
$M_7$	-0,00035399	0,00046080	-0,00052327	-0,00049327	-0,000075173
$M_8$	0,00017796	0,00052279	0,00041192	0,00073432	0,001056232
$M_9$	-0,00006863	0,00009841	-0,00013167	-0,00014187	-0,000022033
$M_{10}$	0,00003197	0,00008984	0,00008421	0,00015846	0,000237533

Начальное значение  $x_0$  для табличных данных выбрано равным 0,6, кроме случая  $a = 4$ , где  $x_0 = 0,8$ . Однако проводились вычисления и для других значений. Так, для  $x_0 = 0,6$

и  $x_0 = 0,8$  разница результатов наблюдалась в 3 и 4-м знаках. Исключение составил случай  $a = 4$ . Для него при  $x_0 = 0,6$  получилось  $x = 0,515654$ ,  $M_2 = 0,120855$ . Причина сравнительно больших расхождений объясняется тем, что  $x_0 = 0,5$  приводит к  $x_n = 0$  и  $N = 10000$  недостаточно для получения более точных оценок при  $x_0$  близком к 0,5. При  $x_0 = 0,8$  табличные данные можно сравнить с теоретическими. Последние проще всего получить следующим образом.

Из  $x_n = \sin^2(2^n t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2^{n+1} t)$  следует, что  $x = \frac{1}{2}$ . Для получения точных значений

$M_k$  надо усреднить значения  $\left(-\frac{1}{2} \cos \lambda\right)^k$  в предположении равномерного распределения  $\lambda$ .

$$\text{Но } \left(-\frac{1}{2} \cos \lambda\right)^k = \left(\frac{e^{i\lambda} + e^{-i\lambda}}{4}\right)^k.$$

Биномиальное разложение и обращение в нуль среднего значения экспоненты дает

$M_k = \frac{C_k^{k/2}}{2^{2k}}$  при  $k$  четном и 0 при  $k$  нечетном. Здесь  $C_k^{k/2}$  – биномиальный коэффициент.

Числовые значения таковы:  $x = 0,5$ ;  $M_2 = 0,125$ ;  $M_4 = 0,023438$ ;  $M_6 = 0,004883$ ;  $M_8 = 0,001068$ ;  $M_{10} = 0,000240$

**5.** Определенный интерес представляет вопрос о существовании и нахождении периодических последовательностей  $\{x_n\}$ . Для последовательности периода  $k$  имеем  $x_{n+k} = x_n$  для всех  $n$ . Достаточно, впрочем, рассматривать это уравнение при  $n=0$ :  $x_0 = x_k$ . Вывод, сделанный при анализе табл. 1, позволяет ввести замечательный класс периодических последовательностей, для которых  $x_0 = \frac{a}{4}$ . Уравнение  $x_0 = x_k$  превращается в алгебраическое уравнение степени  $2^{k+1} - 1$  относительно  $a$ .

Здесь мы не будем анализировать это уравнение, а приведем лишь результаты численного счета для некоторых  $k$ :

- **$k = 2$ .** Уравнение седьмой степени для  $a$  имеет корнями 0, 2,  $1 \pm \sqrt{5}$ , причем ненулевые корни имеют кратность 2. Нетривиален лишь случай  $a = 1 + \sqrt{5}$ , приводящий к последовательности из 2-окна периодичности;
- **$k = 3$ .** Уравнение 15-й степени для  $a$  имеют семь действительных корней – 0, 2 (кратности 2),  $\lambda = 3,831874\dots$  и  $2 - \lambda$  (оба кратности 2). И здесь нетривиален лишь случай  $a = \lambda$ , приводящий к последовательности из 3-окна периодичности;
- **$k = 4$ .** Из 31 корня действительными являются – 15. Это 0, 2,  $1 \pm \sqrt{5}$ ,  $\lambda_1 = 3,498561\dots$ ,  $\lambda_2 = 3,960270\dots$ ,  $2 - \lambda_1$ ,  $2 - \lambda_2$ . Ненулевые корни имеют кратность 2. Значение  $a = \lambda_1$  принадлежит 2-окну, но другое  $a = \lambda_2$  выходит за его пределы. Период последовательности составляют  $x_0 = 0,998067$ ,  $x_1 = 0,038944$ ,  $x_2 = 0,148224$ ,  $x_3 = 0,500000$ . Расчеты для  $a$ , близких к  $\lambda_2$ , показывают, что  $\lambda_2$  принадлежит 4-окну периодичности;
- **$k = 5$ .** Здесь выявляются три 5-окна, соответствующие  $a = 3,738914913$ ;  $3,905766470$ ;  $3,990267047$ . Укажем период для первого из этих значений:  $x_0 = 0,934728$ ;  $x_1 = 0,228114$ ;  $x_2 = 0,658342$ ;  $x_3 = 0,840985$ ;  $x_4 = 0,500000$ .

### Библиографический список

1. **Берже, П.** Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991.
2. **Лихтенберг, А.** Регулярная и стохастическая динамика / А. Лихтенберг, М. Либман. – М.: Меркурий Пресс, 2000.
3. Хаос и две задачи Рамануджана / В.М. Галкин [и др.] // Прогрессивные технологии в Машино- и приборостроении: сб. ст. – Н.Новгород – Арзамасс, 2010.
4. **Галкин, В.М.** Логистическое отображение: некоторые экспериментальные данные / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, И.Н.Толкачев // Труды НГТУ. 2011. №4(91).

*Дата поступления  
в редакцию 19.02.2013*

**V.M. Galkin, L.N. Erofeeva, I.N. Tolkachev**

### THE PROBABILITY CHARACTERISTICS OF A DETERMINING PROCESS

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

The aim of this paper is to give some information about the stochastic behavior of the sequence  $\{x_n\}$ . This sequence is recurrent one and  $x_{n+1} = a(x_n - x_n^2)$ ,  $0 < a \leq 4$ . The histograms and central moments  $M_n$  ( $n < 10$ ) for some values of  $a$  are given. The remarkable class of the periodic sequences is founded.

*Key words:* Haos, asymptotic periodicity, periodicity windows, histogram, central moments.

УДК 61:0014+61:577.3

А.А. Кузнецов, Л.Т. Сушкова, В.Г. Гуменный, С.А. Пермяков, А.А. Шмиг

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕСЕННЕГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГРУППЫ СТУДЕНТОВ**

Владимирский государственный университет

Представлены результаты обработки и анализа диаграмм ритма сердца одной группы студентов по данным регистраций электрокардиограмм. Обоснованы методика регистрации и объем выборки ритмограмм. Оценка функционального состояния студентов в интервале времени февраль–май проведена с использованием метода оценки variability сердечного ритма и структурно-топологического анализа ритмограмм. Предложена методика тестирования цифровых рядов ритмограмм на артефакты известного происхождения по соотношению числа рабочих ярусов и вариационного размаха. В процессе анализа установлено, что все студенты группы находятся в соответствующем весеннему сезону одинаковом функциональном состоянии в пределах нормы.

*Ключевые слова:* функциональное состояние организма, variability сердечного ритма, избыток продукции информационной энтропии.

**Введение**

В течение 10 лет на кафедре «Биомедицинской инженерии» Владимирского государственного университета проводится мониторинг функционального состояния организма (ФСО) студентов по данным групповых, серийных и комбинированных двадцатиминутных регистраций электрокардиограмм (ЭКГ) студентов второго курса (18–20 лет).

На сегодняшний день лучшей методологией оценки здоровья является теория функциональных систем П.К. Анохина [1], в рамках которой категории, характеризующие непрерывно-дискретные состояния биологической динамической системы в условиях непрерывного влияния патогенных факторов внешней среды, могут быть объединены понятием ФСО. Понятие ФСО одновременно должно иметь статус и функции динамического процесса, и интегрального состояния, обретая свойства «шкалы ФСО». Термин «нормы ФСО» становится характеристикой начала отсчета по этой шкале. Нормальное ФСО – это интегральная характеристика состояния здоровья, которая отражает адаптивные возможности при максимальном функциональном резерве организма и оценивается степенью напряжения регуляторных систем организма по данным изменений функций и структур наиболее реактивных систем и органов к факторам внешней среды влияния. Поэтому чрезвычайно актуальным является выбор в качестве объекта исследования ритма сердца как наиболее реактивной системы условно здорового человека на внешнюю среду влияния с предметным поиском индивидуальных и коллективных адаптационных способностей [2]. Метод оценки ФСО по данным variability сердечного ритма (ВСР) удовлетворяет требованиям диагностического метода по технологии получения биосигнала с максимальной информацией о ФСО [3], что подтверждено международным стандартом оценки и интерпретации показателей ВСР [4].

Таким образом, донозологическая бессимптомная диагностика организма человека проводится по интегральному параметру – функциональному состоянию организма. Объектом исследования назначается ритм сердца [3–5]. При этом косвенно оценивается состояние и работа иммунной системы организма по величине функционального резерва и эффективности его использования.

Цель работы – анализ ритмограмм студентов одной группы с оценкой их общего функционального состояния во второй половине учебного года.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Комбинированные и серийные двадцатиминутные регистрации ЭКГ студентов второго курса (18 – 20 лет) одной группы БМИ<sub>6</sub>110 проводились во втором отделении монитором Холтера лицензированного комплекса амбулаторной регистрации AnnAFlash 3000 с программным обеспечением rEScreen [6]. Комбинированные регистрации проводились в положении тела «сидя» без адаптации к условиям регистрации в научной лаборатории Владимирского университета для студентов всей группы, состоящей из 24 человек: 11 девушек и 13 юношей. Каждый обследуемый проходил 5–8 регистраций в течение четырех месяцев (февраль – май 2012 г). Серийные регистрации проводились в положении тела «лежа» без адаптации в комфортных домашних условиях отдельно для двух студентов той же группы ежедневно в течение двух месяцев (март – апрель). Количество регистраций: комбинированных – 130, серийных – 100 (по 50).

Записи ЭКГ конвертировались в ритмограммы, которые далее проходили процедуру HRV (Heart rate variability) в окне программного обеспечения rEScreen с последующим формированием параметрической базы данных [4–6] в среде MatLab.

Исходя из поставленной цели работы, исследователь выбирает наиболее эффективный метод регистрации и методику формирования объема выборки экспериментальных данных. Поэтому, с одной стороны, для регистрации ЭКГ выбрано второе отделение, обеспечивающее наилучшее выделение элементов кардициклов на кривой ЭКГ. С другой стороны, необходимо провести сравнительный анализ двух вариантов назначения объема выборки: по одинаковой длине записи ритмограммы (по интервалу времени) или по одинаковому числу кардиоинтервалов (по числу отсчетов).

### Назначение объема выборки ритмограмм для статистического анализа

При росте объема выборки все общепринятые статистические параметры ритмограммы, кроме стресс-индекса (SI), быстро и монотонно растут. Это сопровождается формированием функции распределения и величин ее моментов, которые устанавливаются за промежуток времени 3–5 мин. При фиксированных условиях регистрации остальным параметрам для выхода на уровень собственных средних значений требуется дополнительно 12–15 мин. Таким образом, формирование функции распределения начинается с формирования среднего значения R-R интервала, среднеквадратического отклонения и коэффициентов асимметрии и эксцесса. Степень отклонения от нормального распределения характеризует степень проявления требуемых организмом в интервале времени регистрации регуляторных влияний, которая количественно оценивается параметрами HRV. Для коротких записей ЭКГ все параметры ритмограммы сильно зависимы от объема выборки, а при смене среднего значения ритмограммы все параметры обязаны «перенастроиться».

Объем выборки ритмограммы определен количеством отсчетов числа кардиоциклов. При заданной длине записи ЭКГ малое среднее значение ритмограммы задает большой объем выборки, а большое среднее значение ритмограммы – малый объем выборки. Принимая за рамочный параметр одинаковый интервал времени записи ЭКГ (20 мин) получаем разное число кардиоциклов в объеме выборки ритмограммы. Даже для здоровых людей различие в объемах выборки может быть двукратное. В этом случае сравнение ритмограмм по статистическим параметрам происходит по унифицированному параметру – интервалу времени. Все параметры ритмограмм приведены к одному интервалу времени, но определяют те или иные признаки ритмограмм для разного количества кардиоциклов.

Если в качестве рамочного параметра задавать объем выборки в предположении, что параметры ритмограмм нормируются (приводятся) к параметрам задаваемого по длине эталона, то возможны три варианта приведения:

1. Автоматический выбор максимального объема  $n_{\max}$  выборки длиной 20 мин. В этом случае вся база данных будет все время перестраиваться, так как всегда будет находиться новая выборка 20-минутной записи с объемом, максимальным ко всей базе данных.



2. Задание теоретически максимального объема, просчитывая минимальный размер кардиоцикла без интервала общей паузы и с минимальными значениями интервалов, сегментов и ширин зубцов, но и это не спасает. При нелинейных искажениях форм структуры, например, альтернации зубца  $T$ , размер кардиоцикла может уменьшиться;

3. Назначение одного и того же объема выборки, например, 1000 отсчетов, не обращая внимания на формируемую таким образом разную длину записи, выводя ее за рамки анализа. Полученная ритмограмма представляется физически обезличенным (без единиц измерения) количеством кардиоциклов математической модели, оперирующей количеством отсчетов.

Опыт проведения более 1000 регистраций ЭКГ в течение 10 лет показал, что максимальный объем выборки ограничен 20 минутами, в течение которых возможно обеспечить одинаковый средний минимальный уровень психического и эмоционального состояния молодого здорового человека. В условиях покоя нормализация распределения ритмограммы заканчивается после пятой минуты записи, средний уровень параметров HRV устанавливается после 20 мин записи, параметры нелинейного анализа меняют ускоренный – на замедленный рост после 15 мин записи.

Назначение объема выборки по одинаковому интервалу времени 20 мин позволяет ввести интервал стационарности по всем параметрам variability сердечного ритма, оставляя объект исследования физическим. Назначение объема выборки по одинаковому числу отсчетов выводит за рамки исследования интервал времени кардиоцикла, придавая ему статус номера отсчета и подменяя объект исследования математической моделью. Исходя из изложенного, основным критерием назначения объема выборки ритмограммы служит одинаковая двадцатиминутная длина записи ЭКГ.

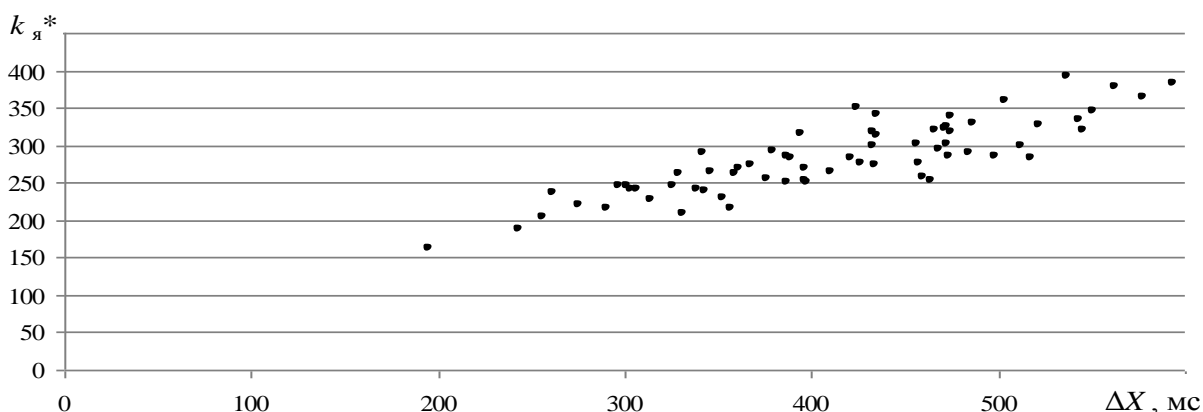
## МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

После регистрации ЭКГ и выборе длины записи при подготовке экспериментальных данных к анализу необходимо тщательно их проверить. Для конвертирования ЭКГ в ритмограмму существенным является качественное и адекватное выделение зубца  $R$ . И, хотя для здоровых молодых людей наименее вероятно ожидать нестандартные морфологические изменения кардиоциклов, тем не менее, индивидуальные особенности организма человека в переменных внешних условиях физических и социальных полей могут приводить к известным искажениям структуры кардиоциклов на ЭКГ [4, 5]. Наиболее частые локальные искажения (артефакты) формируемой ритмограммы появляются при слабовыраженной деполяризации желудочков. Программный фильтр выделения пиков зубцов  $R$  либо пропускает его, либо «путает» с последующим зубцом  $T$ , и ритмограмма обретает локальные искажения в форме псевдоэкстрасистол.

Для борьбы с этим «злом» авторы использовали следующую методику. К полученной ритмограмме, наряду со стандартной процедурой HRV, применялась ярусная технология анализа [4] в части определения количества  $k_{я}^*$  рабочих ярусов и сопоставления с вариационным размахом  $\Delta X$ . Если программа выделения пиков зубцов  $R$  «путала» их с зубцами  $T$ , но на ритмограмме возникали резкие отклонения от среднего значения, сопоставимые с ним по величине. Это практически не отражалось на величине  $k_{я}^*$ , но сильно (в 1,5 раза) меняло значение  $\Delta X$ . На параметрической диаграмме  $k_{я}^*(\Delta X)$  каждая точка соответствует паре значений этих параметров определенной ритмограммы. Если величина  $\Delta X$  оказывается сильно измененной, то эта точка на диаграмме значительно отходит от предполагаемой [7, 8] линейной зависимости. В нашем случае из 230 ритмограмм оказались локально искаженными две. На рис. 1 показана диаграмма  $k_{я}^*(\Delta X)$  с внесенными исправлениями.

Оказалось, что предполагаемая линейная зависимость  $k_{я}^*(\Delta X)$ , представлена «в нескольких экземплярах». Внутри ромбовидной области распределения (рис. 1) выделяются, как минимум, четыре линейные составляющие в форме прямых одинакового наклона со сдвигом по шкале  $0\Delta X$  на 40 – 60 мс. Трактую  $\Delta X + 1 \approx \Delta X$  как количество всех ярусных зна-

чений R-R интервалов на ритмограмме при шаге дискретизации 1мс, нетрудно понять, что эффективность их использования ритмом падает на диаграмме «слева – направо».



**Рис. 1. Диаграмма зависимости числа рабочих ярусов на диаграмме ритма сердца ее вариационным размахом для 130 комбинированных регистраций**

Наличие фрактальных компонент на диаграммах ритма сердца (ДРС) определено переменным психоэмоциональным состоянием обследуемого в интервале времени регистрации. На ДРС это сказывается в появлении нескольких стационарных участков с разной структурой стохастичности, а переходы между ними обычно связаны с резким и сильным (до 50 %) изменением значений R-R интервалов на участках 10–15 отсчетов (2–3 периода дыхания). Эти изменения указывают на относительность состояния покоя обследуемого и приносят случайный характер изменений границ параметра  $\Delta X$ . Отсутствие таких участков на ДРС обследуемых со спокойным темпераментом определяет положение точки на диаграмме  $k_{я}^*(\Delta X)$  на левой линейной границе распределения (линейная зависимость), а их присутствие – к смещению точки на диаграмме  $k_{я}^*(\Delta X)$  вправо с эффектами дискретизации по темпераменту при слабом рассеянии, связанном с иными факторами. Диаграммы  $k_{я}^*(\Delta X)$  для серийных измерений имеют распределения в тех же границах по горизонтали (параметр  $\Delta X$ ) и сжаты по вертикали (параметр  $k_{я}^*$ ).

В рамках выбранной трактовки распределения  $k_{я}^*(\Delta X)$  на диаграмме рис. 1 следует отметить одинаковый угол наклона предполагаемых линейных зависимостей. На каждые 150 мс интервала параметра  $\Delta X$  приходится приблизительно 150 мс интервала параметра  $k_{я}^*$ . Тангенс угла наклона составляет  $1 \text{ мс}^{-1}$ . Это может означать, с одной стороны, оптимальное использование числа рабочих ярусов в интервале вариационного размаха, а с другой – наличие аддитивной составляющей, меняющейся дискретно и кратно 40 – 60 мс, предположительно – в зависимости от темперамента здорового обследуемого в состоянии покоя. Аддитивная составляющая проявляется также дискретно: сначала при формировании 200 наполненных ярусов на ДРС, затем – при 250 наполненных ярусах.

### Результаты обработки и анализа ДРС группы студентов

При донозологической диагностике общепринятым методом оценки функционального состояния организма человека (вне зависимости от возраста и пола) является метод оценки variability сердечного ритма (BCP), или HRV [4–8]. Для коротких записей, к которым относятся и двадцатиминутные, рекомендуемый набор параметров многофакторной оценки включает стандартные параметры статистической и частотной областей анализа, а также параметры, «пришедшие» из космической медицины и предложенные Баевским Р.М. [5]. В принятых обозначениях и в несколько сокращенном виде их расчетные значения приведены в табл. 1 и 2 для комбинированных и серийных регистраций соответственно.

Таблица 1

## Средние значения параметров комбинированных регистраций

Стандартные параметры статистической и частотной областей анализа [4]							
$n$	$\langle X \rangle$ , мс	SDNN, мс	RMSSD, мс	Triangular Index	VLF, мс <sup>2</sup>	LF, мс <sup>2</sup>	HF, мс <sup>2</sup>
1663±44	746±16	58±3	35±2	30,4±1,5	2572±288	2635±297	783±111
Параметры Баевского Р.М. [5]							
АМо, %	Мода, мс	ИН, с <sup>-2</sup>	ВПП, отн.ед.	ИВР, с <sup>-1</sup>	ПАПР, с <sup>-1</sup>	$\Delta X$ , мс	LF/HF
15,8±0,8	719±26	32±4	554±23	44,2±4,2	22,6±1,7	416±17	4,2±0,4
Параметры структурно-топологического и критериального анализа ДРС [7, 8]							
$k_{я}^*$ , %	$\langle \Delta_{я} \rangle$ , мс	$I^*$ , бит	$i$ , бит	$H(X)$ , бит	ТР, мс <sup>2</sup>	ТР·ИН·10 <sup>-4</sup>	ИН· $\sigma^2$ ·10 <sup>-4</sup>
69±1	1,5±0,03	7,2±0,06	0,20±0,04	7,9±0,1	8364±651	21,0±1,4	8,3±0,3

К статистическим параметрам отнесены: объем выборки  $n$ , стандартное отклонение ритмограммы (SDNN, или  $\sigma$ ) и дифференциальной ритмограммы RMSSD, геометрический параметр формы распределения (Triangular Index). К частотным параметрам отнесены: полная спектральная мощность ТР, спектральные мощности диапазонов очень низких VLF, низких LF и высоких HF частот, а также отношение мощностей LF/HF [4]. Параметры и индексы напряжения регуляторных систем [4] представлены во вторых строках табл. 1, 2. Амплитуда моды АМо, %, – доля кардиоинтервалов, соответствующая значению моды. Мода (Мо, мс) как наиболее вероятное значение среди всех значений R-R интервалов определяется по пику гистограммы. Индекс вегетативного равновесия (ИВР = АМо/ $\Delta X$ , с<sup>-1</sup>) определяет соотношение симпатической и парасимпатической регуляции сердечной деятельности. Показатель адекватности процессов регуляции (ПАПР = АМо/Мо, с<sup>-1</sup>) отражает соответствие между уровнем функционирования синусового узла и симпатической активностью. Вегетативный показатель ритма (ВПП = (Мо· $\Delta X$ )<sup>-1</sup>, с<sup>-2</sup>) позволяет судить о вегетативном балансе: чем меньше величина ВПП, тем больше вегетативный баланс смещен в сторону преобладания парасимпатической регуляции. Индекс напряжения регуляторных систем (ИН = АМо/(2· $\Delta X$ ·Мо), с<sup>-2</sup>) отражает степень централизации управления сердечным ритмом [5–8].

В третьих строках таблиц представлены параметры структурно-топологического и критериального анализа ДРС, основанные на применении ярусной технологии [7, 8]. К ним относятся: процентное отношение числа  $k_{я}^*$  рабочих ярусов на ДРС, средневыворочный межъярусный промежуток  $\langle \Delta_{я} \rangle$ , информационная энтропия ДРС  $I^*$ , энтропия  $H(X)$  бесконечного ряда случайных чисел, распределенных по нормальному закону, избыток продукции энтропии  $i$  и безразмерные критерии соответствия функционального резерва степени напряжения регуляторных систем ТР·ИН и ИН· $\sigma^2$ .

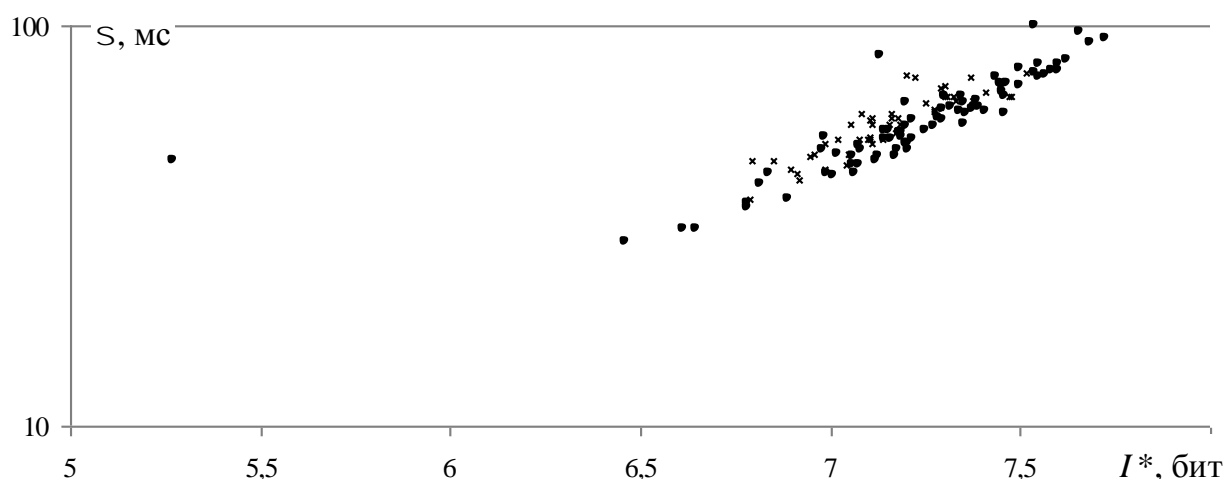
Таблица 2

## Средние значения параметров первой серии регистраций

Стандартные параметры статистической и частотной областей анализа [4]							
$n$	$\langle X \rangle$ , мс	SDNN, мс	RMSSD, мс	Triangular Index	VLF, мс <sup>2</sup>	LF, мс <sup>2</sup>	HF, мс <sup>2</sup>
1367±27	894±15	57±2	43±2	29±1	1968±148	1806±147	1051±90
Параметры Баевского Р.М. [5]							
АМо, %	Мода, мс	ИН, с <sup>-2</sup>	ВПП, отн.ед.	ИВР, с <sup>-1</sup>	ПАПР, с <sup>-1</sup>	$\Delta X$ , мс	LF/HF
15,9±0,5	896±15	21±1	489±14	38±2	18±1	442±12	2±0,2
Параметры структурно-топологического и критериального анализа ДРС [7, 8]							
$k_{я}^*$ , %	$\langle \Delta_{я} \rangle$ , мс	$I^*$ , бит	$i$ , бит	$H(X)$ , бит	ТР, мс <sup>2</sup>	ТР·ИН·10 <sup>-4</sup>	ИН· $\sigma^2$ ·10 <sup>-4</sup>
61±1	1,7±0,04	7,2±0,03	0,3±0,02	7,9±0,04	8207±353	16,2±0,6	6,5±0,2

Обращают внимание значения доверительного интервала (уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ) в пределах 10 % по всем параметрам и для обеих таблиц. С одной стороны, это подтверждает возможность проведения статистического анализа: все обследуемые «изготовлены по одному рецепту» и соответствуют статистическому ансамблю. С другой стороны, это свидетельствует о постоянстве величин характеристических параметров для одного человека и для группы разных людей одного возраста в течение февраля – мая. При этом практически все величины параметров лежат в пределах нормы общего функционального состояния [4–8]. В таком случае акцент в анализе переносится на параметры, величины которых наиболее сильно отличаются. К ним относится отношение спектральных мощностей LF/HF (см. табл. 1, 2). Для группы обследуемых более выражено симпатическое влияние на ритм сердца, для одного обследуемого – парасимпатическое. Это, вероятно, связано с разным временем регистрации: дневным и вечерним. Как видим, осреднение по статистическому ансамблю и по времени привело к практически одинаковым результатам.

Как известно [7, 8], наиболее информативным при классификации функциональных состояний является анализ зависимости статистического параметра стандартного отклонения от информационной энтропии ДРС (рис. 2). Приведенная в полулогарифмическом масштабе функциональная связь стандартного отклонения и информационной энтропии при  $i \approx 0$  (кроме двух регистраций) также характеризует функциональные состояния обследуемых нормой, но с некоторыми нюансами. Во-первых, данные комбинированных регистраций и серийной регистрации в указанном масштабе на графической диаграмме формируют линейные зависимости при значениях  $i$ , близких к нулю, что в обоих случаях распределений соответствует «весеннему сезону» [4]. Во-вторых, данные серии вечерних регистраций сдвинуты на 0,1 бит влево на диаграмме рис. 2 параллельно данным дневных регистраций, что свидетельствует о слабом усилении регуляции ритма. В-третьих, данные двух мартовских регистраций одного и того же студента характеризуются последовательными значениями  $i = 1$  бит и  $i = 3$  бит.



**Рис. 2.** Точечная диаграмма зависимости стандартного отклонения  $\sigma$  от информационной энтропии для 130 ритмограмм комбинированных записей (•) и 50 ритмограмм первой серии (x)

В первом случае результат соответствует «зимнему сезону», а во втором – преморбидному состоянию вне рамок условно-сезонной классификации [8], что указывает на истощенное состояние иммунной системы организма по величине функционального резерва [5]. В-четвертых, плотность распределения точечных значений параметров в обоих случаях сим-

метричная относительно их средних значений:  $\sigma = 58 \pm 3$ мс и  $I^* = 7,2 \pm 0,1$  бит (см. табл. 1, 2), а форма распределений указывает на случайный характер отклонений от средних значений. Это позволяет придать данным статус статистического ансамбля по двум указанным параметрам, подтверждая высказанное ранее предположение. В пятых, в рамках проведенных исследований условно-сезонная классификация функционального состояния организма, наложенная на общепринятый календарь учебного года (сентябрь – июнь), позволяет компенсировать аккумулируемые в течение года психоэмоциональные затраты студентов, сезонным ростом функционального состояния от угнетения в октябре – ноябре ( $i = 2$  бит) до нормы в апреле – июне ( $i = 0$ ) [8].

Принятая методика исследования позволяет, опираясь на общепринятый в клинической кардиологии и физиологии стандартный многофакторный анализ по совокупности рекомендуемых параметров, оценивать общее функциональное состояние людей. При сравнительном анализе результатов комбинированных и серийных регистраций появляется возможность проверять схожесть этих состояний по статистическому ансамблю и времени с проверкой выполнения эргодической гипотезы по совокупности параметров.

### Выводы

1. Все студенты группы находятся в соответствующем весеннему сезону одинаковом функциональном состоянии в пределах нормы. Отклонения в этих пределах имеют случайный индивидуальный характер.

2. По минимальному значению избытка продукции энтропии ДРС ( $i \rightarrow 0$ ) определен интервал времени февраль – май, обозначенный «весенним сезоном» и удовлетворяющий требованию эргодической гипотезы для используемых параметров variability ритма сердца группы молодых здоровых людей одного возраста.

3. Рост значения  $i$  вне рамок условно-сезонной классификации функционального состояния является показателем напряжения регуляторных систем ритма сердца, определяющим процесс истощения функционального резерва.

4. Методика тестирования ритмограмм на артефакты известного происхождения по соотношению числа рабочих ярусов и вариационного размаха позволяет не только надежно выделять ритмограммы с искаженными участками, но и оценивать по амплитуде и частоте индивидуальные рефлекторные психоэмоциональные реакции в интервале времени записи.

### Библиографический список

1. **Анохин, П.К.** Философские аспекты теории функциональной системы: избр. труды / П.К. Анохин. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
2. **Агаджанян, Н.А.** Адаптационная и этническая физиология: продолжительность жизни и здоровье человека / Н.А. Агаджанян. – М.: РУДН. 2009. – 34 с.
3. **Никулина, Г.А.** Исследование статистических показателей сердечного ритма, как метод оценки функционального состояния организма при экстремальных воздействиях: дисс... канд. матем. наук / Г.А. Никулина. – М.: 1974. – 147 с.
4. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // European Heart Journal. 1996. V.17. – P. 354–381.
5. **Баевский, Р.М.** Введение в донозологическую диагностику / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. – М.: Слово, 2008. – 176 с.
6. Medical Computer Systems. Moscow, Zelenograd: <http://www.mks.ru>
7. **Кузнецов, А.А.** Энтропия ритма сердца: монография / А.А. Кузнецов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 172 с.

8. **Кузнецов, А.А.** Системный анализ и обработка электрокардиографической информации: дисс. ... д-р техн. наук / А.А. Кузнецов. – Н. Новгород: 2012. – 297 с.

*Дата поступления  
в редакцию 19.02.2013*

**A.A. Kuznetsov, L.T. Sushkova, V.G. Gumennyj, S.A. Permjakov, A.A. Shmig**

**RESULTS OF SPRING INSPECTION OF A STUDENTS GROUP  
FUNCTIONAL CONDITION**

Vladimir state university

Results of processing and the analysis of heart rhythm diagrams of one students group are submitted according to electrocardiograms registration. The technique of registration and volume of rhythmgram sample are proved. The estimation of students functional state in a time interval February - May is carried out with use of a method of an estimation of heart rate variability and the structural - topological analysis. The technique of testing of digital numbers on artifacts of a known origin on a ratio of number of working circles and variation scope is offered. During the analysis it is established, that all students of group are in the identical functional condition appropriate to a spring season within the limits of norm.

*Key words:* an organism functional state, heart rate variability, an entropy production surplus.

## НАШИ АВТОРЫ

### РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

**Афонин Игорь Леонидович** – СевНТУ  
(Украина), д-р техн. наук, проф. каф. СиБС,  
тел. (0692) 24 14 24

**Боков Геннадий Викторович** – СевНТУ  
(Украина), ст. препод. каф. Судовождения и  
безопасности судоходства,  
тел. (0692) 24 14 24

**Лашенко Ирина Викторовна** – СевНТУ  
(Украина), канд. техн. наук, доц. каф.  
Радиотехники и телекоммуникаций,  
e-mail: rt@sevntu.com.ua

**Катин Станислав Владимирович** - ФГУП  
«ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»,  
зам. директора по научной работе, д-р техн.  
наук, проф., e-mail: niiis@niiis.nnov.ru

**Шорохова Елена Анатольевна** – ФГУП  
«ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова».  
вед. н.с., д-р физ.-мат. наук,  
e-mail: eaShorokhova@gmail.com

**Яшнов Владимир Александрович** - ННГУ  
им. Н.И. Лобачевского, доц., канд. физ.-мат.  
наук, e-mail: vay@rf.unn

**Евсеев Владимир Иванович** - ОАО  
«Арзамасский приборостроительный завод  
им. П.И. Пландина», зам. тех. директора,  
тел. (83147) 7-95-60

**Лавричев Олег Вениаминович** – ОАО  
«Арзамасский приборостроительный завод  
им. П.И. Пландина», Ген. директор,  
тел. (83147) 7-95-60

**Хамидулин Сергей Владимирович** - ОАО  
«ФНПЦ «ННИИРТ», аспирант НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, 8 (831) 436-78-40.

**Хранилов Валерий Павлович** - НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, зам. директора ИРИТ,  
проф., д-р техн. наук, тел. 8(831) 436-93-47

### МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

**Родин Артем Александрович**- НГТУ  
им. Р.А. Алексеева, Институт кибернетики,  
ТТУаспирант НГТУ,  
e-mail: xmrarro@gmail.com

**Орлов Евгений Федорович** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, проф.  
каф. ПМ, e-mail: eforlov@mail.ru

**Асеева Наталья Владимировна** – зам. зав.  
каф. ИСиТ, РИУ ВШЭ, канд. физ.-мат. наук,  
доц., e-mail: naseeva@hse.ru

**Громов Евгений Михайлович** – зав. каф.  
«Математика», РИУ ВШЭ,  
д-р физ.-мат. наук, проф.,  
e-mail: egromov@hse.ru

**Подчищаева Ольга Вячеславовна** – ННГУ  
им. Н.И. Лобачевского, канд. физ.-мат. наук,  
доц., e-mail: mem1967@mail.ru

**Тютин Виктор Владимирович** – зам.зав.  
каф. «Математика», РИУ ВШЭ, канд. физ.-  
мат. наук, доц., e-mail: vtyutin@hse.ru

### ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Гай Василий Евгеньевич** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц. каф.  
ВСиТ ИРИТ, e-mail: iamuser@inbox.ru

**Новиков Павел Александрович** – ООО  
«Мера-НН», рук. группы инженеров, магистр  
техники и технологии,  
e-mail: pnovik@mera.ru

**Аверин Олег Владимирович** - АО «АЦ  
Фонд», вед. программист, e-mail:  
averinoleg@yandex.ru

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Иванов Анатолий Андреевич** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. АМ, д-р техн.  
наук, проф., e-mail: ivanov-aa@nntu.nnov.ru

**Лаптев Игорь Леонидович** - НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. ТиОМ, канд.  
техн. наук., доц. e-mail: kpmis@nntu.nnov.ru

**Шатагин Дмитрий Александрович** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, ассистент,  
e-mail: kpmis@nntu.nnov.ru

**Серый Сергей Владимирович** – КнАГТУ,  
ИКПМиО, доц каф. ТМ, e-mail: ktm@knastu.ru  
**Бурдасов Евгений Николаевич** – КнАГТУ,  
ИКПМиО, ассистент каф. ТМ, e-mail:  
ktm@knastu.ru

**Кабалдин Юрий Георгиевич** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф. каф  
ТиОМ, e-mail: kpmis@nntu.nnov.ru

**Кретинин Олег Васильевич** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф. каф.  
АМ, e-mail: kretinin@list.ru

**Шатагин Дмитрий Александрович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: kpmis@nntu.nnov.ru

### **ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

**Власичев Герман Николаевич** — НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИЯЭиТФ, канд. техн. наук., доц., e-mail: vlas@mts-nn.ru

**Когтева Людмила Владимировна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: kogteva@nntu.nn.ru

**Львов Анатолий Егорович** - ОАО ФНПЦ «ННИП«Кварц» им. А.П. Горшкова», нач. отдела, канд. техн. наук, тел.8(831) 466 20 25

**Рудоясова Людмила Григорьевна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8 (831) 436 82 33

**Шишков Глеб Иванович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел.8 (831) 436 82 33

**Щербаков Владимир Викторович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8 (831) 436 82 33

### **НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ**

**Орлов Лев Николаевич** - зав. каф. АиТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 8(831) 436-73-63

**Рогов Петр Сергеевич** - инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 8(831)201-04-15

**Тумасов Антон Владимирович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.техн. наук, доц., e-mail: anton.tumasov@gmail.com

**Кузьмин Николай Александрович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. АТ, д-р техн. наук, проф., тел. 8 (831) 436-43-83

**Шапкин Виктор Александрович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 8 (831) 436-43-83

**Шапкина Юлия Викторовна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистр каф. АТ, тел.8 (831) 436-43-83

**Макаров Владимир Сергеевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.техн. наук, доц. Каф. АиТ, e-mail: makv@gmail.com

**Зезюлин Денис Владимирович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, ассист. каф. АиТ, тел. 8(831) 436 73 63

**Гончаров Кирилл Олегович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зам. директора АИ, канд. техн. наук, тел. 8(831) 257 86 88

**Федоренко Александр Викторович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, нач. отд. метрологии и стандартизации, аспирант, тел. 8(831) 257 86 55

**Беляков Владимир Викторович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, нач. УНИиИР, д-р техн. наук, проф., тел. 8(831) 436 56 72

### **ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ**

**Май Ван Куан** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, тел. 8(987)744-63-86

**Нгуен Дык Тхинь** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, тел. 8(987)744-63-86

**Ларин Александр Геннадьевич** — НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ст. препод., e-mail: ship@nntu.nnov.ru

**Захаров Илья Львович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, e-mail: zakharov\_oi@mail.ru тел. 8(916)755 20 12

**Химич Владимир Леонидович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЭУиТД, e-mail: tseu@nntu.nnov.ru, тел. 8(831)436 78 79

**Тарасов Алексей Николаевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: tarasov\_alexey@list.ru, тел. 8(904)054 49 41

**Дегтярев Александр Владимирович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант e-mail: alexandr\_dvs@mail.ru, тел. 8(915)94 12 61

**Захаров Лев Анатольевич** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: tseu@nntu.nnov.ru, тел. 8(831)436 78 79

### **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

**Анисимов Сергей Анатольевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер, e-mail: Sergey.Anisimov@tecomgroup.ru

**Лоскутов Алексей Борисович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: Loskutov@nntu.nnov.ru

**Полозов Игорь Владимирович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: polozov@tecomgroup.ru

**Смирнов Андрей Игоревич** - ООО «Теком», тех. Директор отд. собственных разработок,

e-mail: Andrey.Smirnov@tecomgroup.ru

**Соснина Елена Николаевна** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: sosnyna@yandex.ru

**Куликов Александр Леонидович** – Нижегородское предприятие магистральных электрических сетей (филиал ОАО «ФСК



ЕЭС»), директор, д-р техн. наук, e-mail: kulikov@nrmes.elektra.ru

**Папков Борис Васильевич** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф. e-mail: boris.papkov@gmail.com

**Шарыгин Михаил Валерьевич** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: sharygin.m.v@gmail.com

**Серебряков Александр Сергеевич** – МГУПС (Нижегород. ф.), д-р техн. наук, проф., e-mail: A.Sereb@mail.ru

**Семенов Дмитрий Александрович** – НГИЭИ, аспирант, e-mail: xxxmy@mail.ru

## **МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**Панов Алексей Геннадьевич** - ИНЭКА, канд. техн. наук, доц., e-mail: alexey@modifier.ru

**Хлыбов Александр Анатольевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: Nlybov\_52@mail.ru

**Углов Александр Леонидович** – АО «НИЦ контроля и диагностики технических систем», д-р техн. наук, тел. 8 (831) 277 46 68

**Малов Виктор Сергеевич** – ОАО «Завод «Красное Сормово», гл. спец. по металлургии, e-mail: V.Malov@krsormovo.

**Васильев Виктор Александрович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. ТаиЭПП, д-р техн. наук, проф., e-mail: taer@nntu.nnov.ru

**Зиновьев Юрий Александрович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831)436 23 94

**Леушин Игорь Олегович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. ЛМПС, д-р техн. наук, проф., тел. 8(831) 436 43 95

**Тимофеев А.М.** - ОАО «ГАЗ», аспирант НГТУ, 8(831) 436 43 95

**Швецов Владимир Дмитриевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831)436 23 94

**Белявский Георгий Иванович** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831)43623 94

## **ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ**

**Карташов Виктор Романович** – зав. каф. БФФХ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р хим. наук, проф., тел. 8(831)436 93 57

**Челнокова Марина Вадимовна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. хим. наук, ассистент, e-mail: chelnokova-mv@mail.ru

**Калинина Александра Алексеевна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: 777aleksa777-87@mail.ru

**Соколова Татьяна Николаевна** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р хим. наук, проф., e-mail: biotechno@nntu.nnov.ru

**Москвичев Александр Николаевич** – Нижегород. ф. Института машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, **Разов Евгений Николаевич** - Нижегород. ф. Института машиноведения им. А. А. Благодирова РАН, тел. (831) 432 01 58

**Хлопин Сергей Юрьевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: biotechno@nntu.nnov.ru

**Радостин Станислав Юрьевич** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: biotechno@nntu.nnov.ru

## **ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ**

**Юрлов Феликс Федорович** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. ЭиП, д-р техн. наук, проф., тел. 8(831) 436 98 74

**Грачев Владимир Юрьевич** – НИИТОП, директор, канд. техн. наук, тел. 8(831)412 38 10

**Старцева Вероника Николаевна** – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. соц. наук, доц., e-mail: mba@nntu.nnov.ru

**Узбекова Александра Сергеевна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. эконом. наук, доц., тел. 432-53-99

**Колесов Кирилл Игоревич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. эконом. наук, доц., тел. 432-53-99

**Шибанов Николай Александрович** – ООО «Центр деловой информации», руководитель тендерного отдела, тел. 8(831) 215 12 18

**Яшин Сергей Николаевич** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р эконом. наук, проф., тел. 8(831) 436 73 74

**Мурашова Наталья Александровна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831) 436 73 74

**Ермакова Татьяна Ивановна** - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, нач. учебно-метод. отд., канд. педагог. наук, доц., тел. 8(831) 436 05 69

## **СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ**

**Агаев Натиг Фарман Оглы** – НГАСУ, канд. пед. наук, ст. препод., e-mail: agaev1112nf@gmail.com

**Ларина Оксана Владимировна** – МГХПА  
им. С.Г. Строганова (Уральский ф.),  
e-mail: [xsenialarina@gmail.com](mailto:xsenialarina@gmail.com)

**Мухина Татьяна Геннадьевна** - НГАСУ,  
д-р пед. наук, проф.,  
e-mail: [tg-muhina@yandex.ru](mailto:tg-muhina@yandex.ru)

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ  
И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ**

**Галкин Владимир Михайлович** – НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, зав. каф. ВМ, д-р физ.-  
мат. наук, тел. 8(831) 257 86 91

**Ерофеева Лариса Николаевна** - НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
тел. 8(831) 257 86 91

**Толкачев Иван Николаевич** - НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц.,  
тел. 8(831) 257 86 9

**Кузнецов Артемий Артемьевич** – ВГУ,  
канд. физ.-мат. наук, доц.,  
e-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)

**Сушкова Людмила Тихоновна** - ВГУ,  
д-р техн. наук, проф., e-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)

**Гуменный Виктор Георгиевич** – ВГУ,  
студент, e-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)

**Пермяков Сергей Александрович** – ВГУ,  
магистрант, e-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)

**Шмиг Андрей Андреевич** – ВГУ, студент,  
e-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ  
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
Тел. 8 312 4367372  
E-mail: [rio@nntu.nnov.ru](mailto:rio@nntu.nnov.ru)**

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ**

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

#### The name of organization

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

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

**№ 1 (98)**

Редакторы: **Е.В. Комарова, Т.В. Третьякова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
тел.: 8-312-436-73-72, [rio@nntu.nnov.ru](mailto:rio@nntu.nnov.ru)

Подписано в печать 18.03.2013. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 41,25. Уч.-изд. л. 38,75. 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 44757**  
**«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»**