

ISSN 1816-210X

# ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

**№ 1 (94)**

**Нижний Новгород 2012**

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, 2012. № 1 (94). – 366 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 (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор)  
**Члены редколлегии:** В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев, О.М. Власова,  
В.В. Глебов, А.М. Грошев, 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

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2012

**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 (94)**

**Nizhni Novgorod 2012**

**Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev**  
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2012. № 1 (94). – 366 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 (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor)  
**Members of Editorial Board:** V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, O.M. Vlasova,  
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. Mikhalenko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,  
S.V. Khvatov, Y.A. Chernyshov

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....</b>	<b>11</b>
Мякинъков А.В., Бураков С.В., Смирнова Д.М. Алгоритм фазирования многопозиционной радиолокационной системы со случайным расположением передающих позиций.....	11
Ковалев Ф.Н. Организация когерентно-импульсного режима работы РЛС с обнаружением “на просвет”.....	20
Гай В.Е. Метод определения основного тона речевого сигнала.....	26
<b>МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....</b>	<b>33</b>
Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Костенко И.С., Пелиновский Е.Н., Кузнецов К.И. Регистрация волн-убийц в заливе Анива Охотского моря.....	33
Асеева Н.В., Громов Е.М., Тютин В.В. О стабилизации пространственного спектра коротких солитонов в неконсервативных средах с неоднородной дисперсией.....	42
Морозов Е.Г., Демидова Т.А., Нечволодов Л.В. Внутренние волны и уменьшение толщины ледового покрова над крутыми подводными склонами.....	54
<b>ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>60</b>
Никулин Е.А. Рекурсивный алгоритм трассировки лучей с приоритетным стеком.....	60
Соколова Э.С., Пашковский А.И. Оптимизация структуры данных для хранения и обработки граф-моделей.....	70
Капранов С.Н., Тимофеева О.П. Прогнозирование затрат на обеспечение контролепригодности по критерию коэффициента достижимости граф-модели.....	76
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....</b>	<b>81</b>
Букин П.Э., Фролова И.Н. Кк вопросу об автоматизации проектирования станочных приспособлений.....	81
Тудакова Н.М., Кутилова О.И., Крайнов В.В. Моделирование процессов комплексной обработки отверстий.....	87
Куликов С.В., Манцеров С.А., Панов А.Ю. Развитие систем принятия решений единого информационного пространства машиностроительного предприятия.....	94
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>100</b>
Большухин М.А., Будников А.В., Свешников Д.Н., Фомичев В.Л., Крепков В.П. Актуальные задачи развития экспериментальной базы для верификации CFD кодов при использовании в атомной энергетике.....	100
Варенцов А.В., Доронков Д.В., Купричева Е.С., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д. Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками в ТВС реактора КЛТ-40С.....	107
Лапшин Р.М., Макаров Г.Ю., Тарасова Н.П. Нестационарные режимы теплопереноса в испарительных термосифонах при низких давлениях.....	114

<b>Малахов В.А., Попков К.В., Раевский А.С.</b> Комплексные волны и комплексный резонанс в структурах с металлическими наноплёнками на оптических частотах.....	120
<b>НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	128
<b>Вашурин А.С., Герасин А.В., Орлов Л.Н.</b> Исследование несущей способности многослойных панелей.....	128
<b>Костин С.Ю., Тумасов А.В., Колтунов В.А.</b> Исследование свойств активной безопасности автобуса среднего класса методом имитационного моделирования.....	134
<b>Беляков В.В., Вахидов У.Ш., Галкин Д.А., Зайцев А.С., Кудряшов Е.М., Макаров В.С.</b> Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «STONE-ROAD».....	143
<b>ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....</b>	152
<b>Фам Фу Тхань, Фан Ван Ан.</b> Скоростное судостроение. ретроспектива.....	152
<b>Химич В.Л., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю., Папкин Б.А., Шустров Ф.А., Иванов Д.А., Сонкин В.И., Папкин И.А.</b> Нейтрализация токсичных компонентов отработавших газов двигателей внутреннего сгорания до уровня перспективных экологических стандартов.....	161
<b>Миронов А.А.</b> Модель определения эффективного коэффициента концентрации напряжений дефектов сварных швов.....	169
<b>Зуев В.А., Семенова Н.М.</b> Сопrotивление ледокольных платформ на воздушной подушке на тихой воде.....	177
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....</b>	185
<b>Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Бедретдинов Р.Ш.</b> Исследование режимов работы узла нагрузки 20 кВ интеллектуальной равномерно-распределенной электрической сети.....	185
<b>Коробко Г.И., Попов С.В., Лебедев В.В., Макаев А.С.</b> Повышение качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах с использованием вольтодобавочных устройств.....	192
<b>Плехов А.С., Титов В.Г., Умяров Д.В.</b> Обеспечение устойчивой работы судовой системы электропитания грузовых насосов с помощью компенсационного преобразователя частоты.....	204
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....</b>	216
<b>Рудкий, С.Б. Гаманюк, Н.А. Зюбан, В.В. Шмаль, А.Я. Пузиков</b> Исследование распределения неметаллических включений в слитках различной геометрии.....	216
<b>Сафронов Н.Н., Харисов Л.Р.</b> Использование интегрального коэффициента качества свс-ферросилида для оптимизации состава шихты.....	224
<b>Гущин В.Н., Васильев В.А., Чернышов Е.А., Романов И.Д., Романова Е.А., Романов А.Д.</b> Утилизация отходов методом высокотемпературного пиролиза в жидкометаллическом теплоносителе.....	230
<b>ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	236

<b>Перетрутов А.А., Чубенко М.Н., Ким П.П.</b> Каталитическое разложение отработанной серной кислоты, содержащей органические примеси, на пиритном огарке.....	248
<b>Челнокова М.В., Калинина А.А., Аникина Т.А., Соколова Т.Н., Карташов В.Р.,</b> Роль пероксида водорода при бактериальной коррозии цинка.....	254
<b>Аксютёнок М.В., Гунько Ю.Л., Козина О.Л., Михаленко М.Г.</b> Влияние добавки гидроксида лития на процесс окисления кадмия в ограниченном объёме щелочного электролита.....	260
<b>Наумов В.И.</b> Переключения химических связей и колебательные системы в переходных металлах.....	271
<b>ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....</b>	271
<b>Юрлов Ф.Ф., Незнахин М.Е.</b> Классификация задач выбора эффективных решений при прогнозировании развития экономических систем с использованием модели жизненного цикла.....	278
<b>Ромашова И.Б., Хохлова О.В.</b> Инновационная деятельность как средство обеспечения стратегического преимущества.....	283
<b>Яшин С.Н., Мурашова Н.А.</b> Инновационное развитие предприятий и источники его инвестирования в посткризисном периоде в России и Нижегородской области ...	293
<b>Зорина Л.Б.</b> Социально-экономические факторы развития системы высшего профессионального образования.....	302
<b>СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	302
	314
<b>Егоров Е.Е.</b> Инфраструктурные аспекты эффективного управления человеческим капиталом организации.....	321
<b>Лысцев М.С.</b> Проблема генезиса региональных элит России в конце XX века.....	
<b>Гуляев С.В.</b> Модернизация муниципального хозяйства: опыт Нижегородской области....	329
<b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....</b>	329
<b>Галкин В.М., Пелиновский Е.Н.</b> Об эволюционных уравнениях в теории солитонов и распространении волн цунами.....	335
<b>Тимофеенко Л.А.</b> Порождающие тройки инволюций линейных групп размерности 2 над кольцом целых гауссовых чисел.....	342
<b>Верещагина Е.И.</b> Обратная задача для антагонистической 3×3 игры с различными элементами платёжной матрицы.....	349
<b>Игошин В.А.</b> Клеточная структура псевдориманова пространства с геодезическим полем одномерных направлений.....	



## CONTENTS

<b>RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....</b>	<b>11</b>
<b>Myakinkov A.V., Burakov S.V., Smirnova D.M.</b> Algorithm of phasing in multistatic radar with random positioning of transmitters.....	11
<b>Kovalev F.N.</b> The organization of coherent-pulse operating mode of the forward-scattering radar.....	20
<b>Gai V.E.</b> Method for determining the pitch of the voice signal.....	26
<b>MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA .....</b>	<b>33</b>
<b>Zaitsev, Malashenko A., Kostenko I., Pelinovsky E., Kuznetsov K.</b> Freak waves registration in the Aniva bay, Okhotsk sea.....	33
<b>Aseeva N.V., Gromov E.M., Tyutin V.V.</b> Stabilization of short soliton wave number spectrum in non-conservative inhomogeneous dispersive media.....	42
<b>Morozov E.G., Demidova T.A., Nechvolodov L.V.</b> Internal waves and thinning of the ice cover over steep submarine slopes.....	54
<b>INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....</b>	<b>60</b>
<b>Nikulin E.A.</b> Recursive raytracing algorithm with priority stack.....	60
<b>Sokolova E.S., Pashkovskiy A.I.</b> Optimization of data structures for graph model storing and processing.....	70
<b>Kapranov S.N., Timofeeva O.P.</b> Expenses prediction of controllability support using criterion of graph model reachability coefficient.....	76
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION .....</b>	<b>81</b>
<b>Bukin P.E., Frolova I.N.</b> On the design automation machinetool equipment.....	81
<b>Tudakova N.M., Kutilova O.I., Krainov V.V.</b> Modeling of processes complex forming apertures.....	87
<b>Kulikov S.V., Mantserov S.A., Panov A.Y.</b> Development of systems of decision-making of uniform information field of the machine-building enterprise.....	94
<b>NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS .....</b>	<b>100</b>
<b>Bolshukhin M.A., Budnikov A.V., Sveshnikov D.N., Fomichev V.I., Krepkov V.P.</b> Actual issues of experimental facilities development to verify CFD codes to be used in nuclear power engineering.....	100
<b>Varentsov A.V., Doronkov D.V., Kupricheva E.S., Solntsev D.N., Sorokin V.D.</b> Investigation of local mass transfer and efficiency of spacer grids of fuel assembly of reactors klt-40s.....	107
<b>Lapshin R.M., Makarov G.Y., Tarasova N.P.</b> Non-stationary modes of a heat transfer in evaporation thermosiphons at low pressure.....	114
<b>Malakhov V.A., Popkov K.V., Raevsky A.S.</b> Complex waves and complex resonance in structures with thin metal films at optical frequencies.....	120

<b>LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS .....</b>	<b>128</b>
<b>Vashurin A.S., Gerasin A.V., Orlov L.N.</b> The research of sandwich bearing capacity.....	128
<b>Kostin S.Y., Tumasov A.V., Koltunov V.A.</b> The research of bus active safety by means of simulation methods.....	134
<b>Belyakov V.V., Vahidov U.Sh., Galkin D.A., Zaytsev A.S., Kudryashov E.M., Makarov V.S.</b> Mobility special vehicles on roads type «stone-road».....	143
<b>PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....</b>	<b>152</b>
<b>Pham Phu Thanh, Pham Van Anh.</b> High-speed ship building. retrospective.....	152
<b>Khimich V.L., Khripach N.A., Lezhnev L.Yu., Papkin B.A., Shustrov F.A., Ivanov D.A., Sonkin V.I., Papkin I.A.</b> Reduction exhaust gases of internal combustion engines by neutralization until promising emission standards.....	161
<b>Mironov A.A.</b> A model for determining the fatigue-strength reduction factor of defects in welds joints.....	169
<b>Zuev V.A., Semenova N.M.</b> Resistance icebreaking platforms at air- cushion at the silent water.....	177
<b>ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY .....</b>	<b>185</b>
<b>Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A., Bedretdinov R.SH.</b> Operating modes research of knot of loading 20 kV in the uniformly-distributed smart grids.....	185
<b>Korobko G.I., Popov S.V., Lebedev V.V., Makaev A.S.</b> Increasing of electric power quality in ship electric power systems by means of volt-adding devices.....	192
<b>Plehov A.S., Titov V.G., Umyarov D.V.</b> Ensuring the firm functioning the ship system of the power supply cargo pump by means of compensation converter of the frequency.....	204
<b>METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS .....</b>	<b>216</b>
<b>Rutsky D.V., Gamanyuk S.B., Zyuba N., Schmal V., Puzikov A.</b> Investigation of the distribution of nonmetallic inclusions in ingots of different geometry.....	216
<b>Safronov N.N., Kharisov L.R.</b> Use of integral performance criterion of self-propagating high-temperature synthesis ferrosilida for optimization of the charge composition.....	224
<b>Guschin V.N., Vasilev V.A., Chernyshov E.A., Romano I.D., Romanova E.A., Romanov A.D.</b> Recycling of a waste by a method of high-temperature pyrolysis in the liquid heat-carrier.....	230
<b>CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES .....</b>	<b>236</b>
<b>Peretrutov A.A., Chubenko M.N., Kim P.P.</b> Catalytic decomposition of waste sulfuric acid containing organic impurities, on cinder pyrite.....	236
<b>Chelnokova M.V., Kalinina A.A., Anikina T.A., Sokolova T.N., Kartashov V.R.</b> The role of hydrogen peroxide in bacterial corrosion of zinc.....	248
<b>Aksyutenok M.V., Gunko Yu.L., Kozina O.L., Mikhaleenko M.G.</b> Effect of additive lithium hydroxide on oxidation process of cadmium in alkaline solution limited value.....	254
<b>Naumov V.I.</b> Switching of chemical and vibrational communication system in transition metals.....	270

**ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT .....**

**Yrlov F.F., Neznahin M.E.** A Choise problems in effective decisions classification at forecasting of economic system development using life cycle models..... 271

**Romashova I.B., Khokhlova O.V.** Innovation activity as a means of control of strategic advantage..... 278

**Yashin S.N., Murashova N.A.** Innovated development enterprises and sources it's ingestions for period after of crisis in Russia and Nizegorodskay region..... 292

**Zorina L.B.** Social and economic factors of developments system of higher vocational education..... 293

302

**SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....**

302

**Egorov E.E.** Effective steering of organization human capital: infrastructure aspects..... 314

**Lystcev M.S.** Regional elite genesis problem: late XXth century Russia..... 321

**Gulyaev S.V.** Municipal economy modernization: Nizhny Novgorod region experience.....

**MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES .....**

329

**Galkin V.M., Pelinovsky E.N.** On the evolution equations in the soliton theory and in the tsunami waves propagation..... 329

**Timofeenko L.A.** Generating triples involutions of linear groups of dimantion 2 over gaussian integer..... 335

**Vereshagina E.I.** The inverse problem two players antagonistic 3x3 – game with different elements of payoff matrixv..... 342

**Igoshin V.A.** Cellular structure of pseudoriemannian space with the geodesic field of one-dimensional directions..... 349

# РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.396.96

А.В. Мякинъков, С.В. Бураков, Д.М. Смирнова

## АЛГОРИТМ ФАЗИРОВАНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СО СЛУЧАЙНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПЕРЕДАЮЩИХ ПОЗИЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена многопозиционная радиолокационная система обнаружения наземных объектов со случайным расположением передающих позиций. Разработан алгоритм фазирования приемных каналов, соответствующих разным передающим позициям. Предложенный алгоритм обеспечивает когерентное накопление сигналов из разных пространственных каналов и формирование диаграммы направленности передающей антенной решетки. Приведены результаты математического моделирования алгоритма.

*Ключевые слова:* многопозиционная радиолокационная система, антенная решетка, виртуальные передатчики, корректирующий множитель, фазовая коррекция.

### Введение

Бистатистические просветные радиолокационные системы (РЛС) могут эффективно применяться для обнаружения малоразмерных целей благодаря действию просветного эффекта [1]–[3], который проявляется в резком увеличении бистатистической эффективной площади рассеяния цели при нахождении ее в узком угловом секторе между передающей и приемной позициями. Ширина этого углового сектора определяется соотношением линейного размера цели и длины волны зондирующего сигнала [1]–[3].

Как было показано в [4], [5], для эффективного обнаружения и измерения координат наземных объектов в условиях интенсивных помех от растительности могут применяться просветные РЛС, состоящие из нескольких передающих позиций и одной приемной. Передающие и приемные позиции имеют ненаправленные антенны и располагаются непосредственно на поверхности Земли.

Совокупность передающих позиций может рассматриваться как передающая антенная решетка (АР). Для обеспечения отдельного приема сигналов, соответствующих различным передатчикам, используется частотное разделение каналов. При этом разность соседних несущих частот передатчиков выбирается заведомо большей, чем максимальный доплеровский сдвиг частоты сигнала, отраженного от цели. Например, при использовании передатчиков, работающих в диапазоне частот 175 МГц, доплеровский сдвиг частоты рассеянного наземной целью сигнала не превышает 100 Гц. Разность частот соседних каналов при этом составляет порядка единиц килогерц, что обусловлено возможностями перестройки существующих передатчиков. При таком незначительном разносе частот сохраняется когерентность комплексных огибающих сигналов, соответствующих различным передатчикам.

Для выделения на приемной стороне комплексных огибающих (КО) сигналов, соот-

ветствующих различным передатчикам, можно использовать алгоритм фазирования, рассмотренный в [6], [7]. Суть этого способа заключается в передаче через выделенный цифровой канал на приемную позицию отсчетов КО излучаемого передатчиком сигнала.

В работе [8] рассмотрена система, в которой передающие позиции расположены эквидистантно вдоль прямой линии, а расстояние между ними точно известно, как и расстояние между линией расположения передатчиков и приемной позиции. Для такой системы в [8] рассмотрен алгоритм пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), заключающийся в формировании парциальных лучей передающей решетки. При этом появляется возможность измерения угловых координат цели, а при наличии двух или более групп передатчиков, объединенных в решетки, – измерения координат цели на плоскости.

Для работы алгоритма, рассмотренного в [8], необходимо обеспечить фазирование приемных каналов, соответствующих разным передатчикам. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, при независимой работе передатчиков их начальные фазы случайны и не связаны между собой. Во-вторых, в условиях реальной обстановки размещение передающей системы с соблюдением высокой точности позиционирования элементов (например, эквидистантно на одной линии) вряд ли представляется возможным, особенно при большом числе передающих позиций (10 и более). Поэтому размещение позиций будет иметь случайный характер.

В этих условиях перед началом работы системы необходимо произвести ее фазирование. Суть этой операции заключается в вычислении вектора комплексных корректирующих коэффициентов для каждого из элементов передающей системы. Эти коэффициенты вводятся в алгоритм ПВОС на приемной стороне таким образом, чтобы обеспечить когерентность накопления сигнала, отраженного от цели, находящейся на заданном направлении относительно нормали к передающей решетке.

### Геометрия системы

На рис. 1 показана геометрия системы, состоящей из пяти передатчиков  $Tx_0, Tx_1, \dots, Tx_4$  и одного приемника  $Re$  ( $Re^{(S)}$  – положение приемной позиции после перемещения на  $\Delta r$ ). В общем случае число передатчиков равно  $N$ , а элементы передающей системы расположены на поверхности Земли случайным образом. Однако будем полагать, что размещение этих элементов производилось таким образом, что область, в которой они расположены, вытянута вдоль некоторой прямой линии  $AA$ . Положение каждого из передающих элементов относительно этой линии можно охарактеризовать следующим образом. Из точки расположения каждого передатчика на прямую  $AA$  опустим перпендикуляр. Длину этого перпендикуляра для  $i$ -го передатчика обозначим  $\Delta x_i$ . Точки пересечения каждого из перпендикуляров с прямой  $AA$  обозначим  $Tx_i^{(V)}$ . В дальнейшем будем называть эти точки фазовыми центрами виртуальных передатчиков (отсюда и сокращение  $V$  – virtual). Расстояния между виртуальными передатчиками обозначим  $d_i$ . Расстояние между крайними виртуальными передатчиками будем называть эффективной апертурой передающей решетки  $D$ . Расстояние от линии расположения виртуальных передатчиков до точки расположения приемника будем называть базой системы и обозначим  $b$ .

Будем считать, что база системы  $b$  много больше эффективной апертуры передающей решетки:  $b \gg D$ . При этом для приемной позиции выполняется приближение дальней зоны, и фронт волны можно считать плоским.

### Структура оптимального алгоритма пространственной обработки

Оптимальная пространственная обработка сигнала, рассеянного целью, расположенной под углом  $\alpha_l$  по отношению к нормали  $AP$ , заключается в выполнении весового суммирования вида

$$\bar{U}_{\text{вых}}[n] = \sum_{i=0}^{K-1} \bar{U}_{\text{вх}, i}[n] \bar{w}_i^{(l)}, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_{\text{вх},i}[n]$  – отсчет комплексной огибающей входного сигнала  $i$ -го приемного канала, в котором принимается сигнал, соответствующий  $i$ -му передатчику в  $n$ -й момент времени;  $\bar{w}_i^{(l)}$  – комплексные весовые коэффициенты;  $^{(l)}$  – индекс, обозначающий номер направления относительно нормали к АР, в котором обеспечивается оптимальная пространственная обработка.

Весовые коэффициенты  $\bar{w}_i^{(l)}$  можно записать в виде

$$\bar{w}_i^{(l)} = \bar{k}_{\phi,i}^{(l)} \bar{w}_{0,i}^{(l)}, \quad (2)$$

$$\bar{w}_{0,i}^{(l)} = \begin{cases} \exp \left[ -j2\pi \left[ \left( \sum_{m=1}^i d_m \right) / \lambda \right] \sin \alpha_l \right], & i > 0; \\ 1, & i = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $d_m$  – расстояние от элемента виртуальной решетки, имеющего номер  $m$ , до элемента с номером  $m-1$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $\bar{k}_{\phi,i}^{(l)}$  – корректирующий фазовый множитель, учитывающий разность фаз между физическим и виртуальным передатчиками.

В выражении (2) элементы вектора оптимальных весовых коэффициентов представлены в виде произведения корректирующих фазовых множителей  $\bar{k}_{\phi,i}^{(l)}$  и оптимальных весовых коэффициентов для элементов виртуальной решетки  $\bar{w}_{0,i}^{(l)}$ . В частном случае, когда физические передатчики располагались бы на линии  $AA$  и излучали сигналы с одинаковыми начальными фазами, корректирующие множители были бы равны единице, поскольку равнялась бы нулю разность фаз сигналов, излучаемых физическими и виртуальными передатчиками.

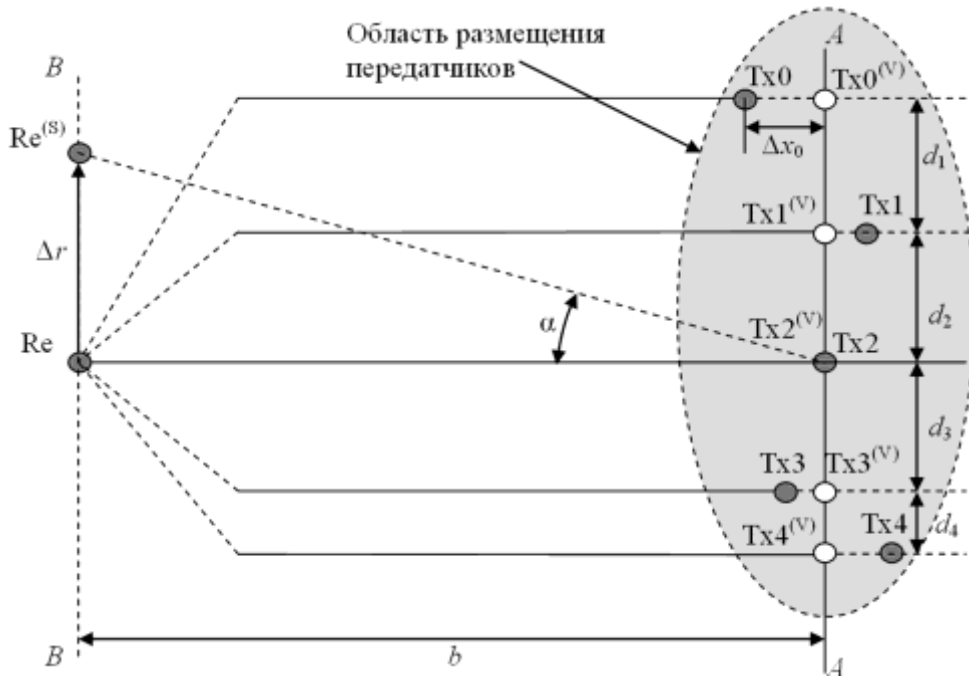


Рис. 1. Геометрия системы

Заметим, что разность фаз, соответствующая разности хода между физическим и виртуальным передатчиком, зависит от направления на цель относительно нормали к виртуальной решетке. Таким образом, для формирования  $L$  лучей виртуальной решетки необходим набор из  $L$  весовых векторов  $\mathbf{w}^{(l)}$ , обеспечивающих оптимальный прием сигналов, отраженных от целей, расположенных под углами  $\alpha_l$  относительно нормали к виртуальной решетке.

При этом каждый вектор весовых коэффициентов  $\mathbf{w}^{(l)}$  представляется в виде произведения диагональной матрицы  $\mathbf{w}_0^{(l)}$ , составленной из весовых коэффициентов виртуальной решетки, не учитывающих фазовую коррекцию,  $\bar{w}_{0,i}^{(l)}$ , и вектора-столбца корректирующих фазовых множителей  $\mathbf{k}_\phi^{(l)} = [\bar{k}_{\phi,0}^{(l)}, \bar{k}_{\phi,1}^{(l)}, \dots, \bar{k}_{\phi,K-1}^{(l)}]^T$ :

$$\mathbf{w}^{(l)} = \mathbf{w}_0^{(l)} \mathbf{k}_\phi^{(l)} = \begin{bmatrix} \bar{w}_{0,0}^{(l)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{w}_{0,1}^{(l)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{w}_{0,K-1}^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{k}_{\phi,0}^{(l)} \\ \bar{k}_{\phi,1}^{(l)} \\ \dots \\ \bar{k}_{\phi,K-1}^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{w}_{0,0}^{(l)} \bar{k}_{\phi,0}^{(l)} \\ \bar{w}_{0,1}^{(l)} \bar{k}_{\phi,1}^{(l)} \\ \dots \\ \bar{w}_{0,K-1}^{(l)} \bar{k}_{\phi,K-1}^{(l)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

При формировании  $L$  лучей виртуальной решетки необходимо найти  $L$  векторов оптимальных весовых коэффициентов вида (4). Эти вектора можно представить в виде матрицы весовых коэффициентов:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}^{(0)}, \mathbf{w}^{(1)}, \dots, \mathbf{w}^{(L-1)}] = \begin{bmatrix} \bar{w}_{0,0}^{(0)} \bar{k}_{\phi,0}^{(0)} & \bar{w}_{0,0}^{(1)} \bar{k}_{\phi,0}^{(1)} & \dots & \bar{w}_{0,0}^{(L-1)} \bar{k}_{\phi,0}^{(L-1)} \\ \bar{w}_{0,1}^{(0)} \bar{k}_{\phi,1}^{(0)} & \bar{w}_{0,1}^{(1)} \bar{k}_{\phi,1}^{(1)} & \dots & \bar{w}_{0,1}^{(L-1)} \bar{k}_{\phi,1}^{(L-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{w}_{0,K-1}^{(0)} \bar{k}_{\phi,K-1}^{(0)} & \bar{w}_{0,K-1}^{(1)} \bar{k}_{\phi,K-1}^{(1)} & \dots & \bar{w}_{0,K-1}^{(L-1)} \bar{k}_{\phi,K-1}^{(L-1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, целью алгоритма фазирования является вычисление матрицы весовых коэффициентов (5). При построении алгоритма фазирования будем считать, что известны следующие априорные сведения о системе:

1. Известен порядок расположения элементов системы вдоль линии  $AA$ .
2. Положение одного из виртуальных передатчиков, например, центрального ( $\text{Tx}2^{(v)}$  на рис. 1), совпадает с фактическим положением соответствующего передатчика ( $\text{Tx}2$ ). Таким образом, этот передатчик расположен на линии  $AA$ .
3. Линия базы, соединяющая передатчик, расположенный на линии  $AA$ , и приемник, перпендикулярна к линии  $AA$ .
4. Имеется возможность перемещения приемной позиции на заданное расстояние в заданном направлении относительно исходного положения при обеспечении высокой точности позиционирования относительно исходного положения.

### Алгоритм оценивания матрицы весовых коэффициентов

При выполнении принятых в предыдущем разделе допущений разность фаз сигналов, излученных различными виртуальными передающими позициями при условии их когерентности, в точке расположения приемной позиции равна нулю. При этом матрица коэффициентов  $\mathbf{w}_0^{(0)}$  является единичной. Разность фаз сигналов, излученных реальными передатчиками, будет отлична от нуля в силу случайности начальных фаз отдельных передатчиков и случайного характера их размещения в окрестности апертуры виртуальной решетки.

После выделения в каждом приемном канале КО сигналов соответствующих передатчиков, можно получить оценки разностей фаз между сигналом каждого из передатчиков и центрального передатчика, расположенного на линии  $AA$ :

$$\Delta \hat{\phi}_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x_i + \varphi_0, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения  $i$ -го передатчика;  $\Delta x_i$  – отклонение положения  $i$ -го реального передатчика от соответствующего положения виртуального передатчика;  $\varphi_0$  – случайная начальная фаза.

Тогда искомые корректирующие комплексные весовые коэффициенты, вводимые в каналы приема, будут равны

$$\bar{k}_{\delta,i}^{(0)} = \exp\{-j\Delta\hat{\phi}_i\}. \quad (7)$$

При подстановке в алгоритм (1), (2) корректирующих множителей вида (7) сигналы, излученные различными передатчиками  $Tx_i$  и принимаемые в соответствующих каналах приема, будут синфазны. Также будут синфазны сигналы, отраженные от цели, находящейся на линии базы, соединяющей приемник с центральной передающей позицией.

Это означает, что при использовании корректирующих множителей (7) имеется возможность формирования одного луча передающей антенной решетки, направленного на приемник. В случае, если расположение передатчиков точно известно, то оценка коэффициентов (7) позволяет сформировать лучи передающей решетки в произвольном направлении  $\alpha_l$ . Это обеспечивается вычислением диагональной матрицы  $\mathbf{w}_0^{(l)}$ , соответствующей заданному направлению, а также внесением поправочных множителей в значения коэффициентов (7):

$$\Delta k_{\phi,i}^{(l)} = \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta x_i(1 - \cos\alpha_l)\right\}. \quad (8)$$

В частном случае, когда реальная система передатчиков расположена на прямой линии (линейная АР), указанные поправочные множители равны единице.

Если геометрия системы неизвестна, задача формирования луча в произвольном направлении  $\alpha_l$  может быть решена способом, аналогичным рассмотренному для формирования луча в направлении нормали к виртуальной решетке. При этом должна быть известна с некоторой точностью длина линии базы  $b$ . Отличие заключается в том, что производится оценка не корректирующих множителей, а сразу элементов матрицы весовых коэффициентов  $W$ . Разделение элементов этой матрицы на сомножители в соответствии с (2) при случайной и неизвестной геометрии системы невозможно. При формировании  $l$ -го вектора-столбца оптимальных весовых коэффициентов следует перенести приемную позицию в точку  $Re^{(S)}$  (рис. 1), расположенную на линии, параллельной линии  $AA$  и удаленной от нее на расстояние  $b$ , на расстояние  $\Delta r$ , которое определяется из выражения

$$\Delta r = btg\alpha_l. \quad (9)$$

Далее, как и для случая расположения приемника в исходном положении на линии базы, вычисляются коэффициенты

$$w_i^{(l)} = \exp\{-j\Delta\phi_i^{(l)}\}. \quad (10)$$

Получив, таким образом, набор оптимальных весовых коэффициентов для  $L$  различных направлений  $\alpha_l$  относительно нормали к решетке, получаем возможность формирования  $L$  парциальных лучей виртуальной антенной решетки. При этом появляется возможность измерения углового положения цели моноимпульсным методом.

### **Особенности реализации алгоритма фазирования при априорно неизвестной длине базы и наличии ошибок позиционирования приемной позиции при ее перемещении**

В реальных условиях точная априорная информация относительно длины базы  $b$  может отсутствовать. В этом случае для обеспечения работоспособности алгоритма фазирования на передающих и приемных позициях могут быть установлены приемники сигналов систем GPS или GLONASS<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Точность определения координат наземных объектов спутниковыми навигационными системами гражданского применения составляет порядка 7 м.



Допустим, длина базы  $b$  равна 1 км. Требуется сформировать луч диаграммы направленности (ДН) передающей АР в направлении  $\alpha_l=10^\circ$ . При этом величина перемещения приемной позиции должна составлять  $\Delta r = 1000 \cdot \text{tg}10^\circ = 176$  м. Предположим, что ошибка позиционирования передатчиков и приемника приняла максимальное значение 7 м, причем направление смещения оценок координат соответствует наихудшему случаю, т.е. смещение координат центрального передатчика произошло вдоль линии базы, а приемника при его перемещении – в поперечном направлении. При этом реальное значение угла между нормалью к решетке и направлением на приемник составит  $\alpha = \text{arctg}(183/993) = 10,44^\circ$ . Таким образом, ошибка в направлении луча составит всего  $0,44^\circ$ .

При определении координат целей это приведет к появлению систематической ошибки, обусловленной данным смещением луча ДН АР.

Далее приведены результаты моделирования алгоритма фазирования для двух случаев. В первом случае значение длины линии базы  $b$  точно известно, а при перемещении приемной позиции ее положение относительно исходного измеряется без погрешности. Во втором случае значение длины базы оценивается, причем ошибка оценивания является гауссовской случайной величиной, СКО которой равно 5 м. При этом перемещение приемной позиции характеризуется ошибкой позиционирования относительно исходного положения.

### Влияние многолучевого распространения сигнала на работу алгоритма фазирования

Условия, в которых может использоваться рассматриваемая многопозиционная просветная РЛС, включают многолучевое распространение сигналов передатчиков. Таким образом, сигнал, обрабатываемый на приемной стороне при фазировании решетки, представляет собой интерференцию прямого сигнала и сигнала, отраженного от подстилающей поверхности и местных предметов. Исследование влияния переотражений от подстилающей поверхности с произвольными параметрами, а также отражений от местных предметов и алгоритмов их компенсации представляют собой содержание дальнейшего исследования. В частности, в [8] описана многопозиционная просветная система, предусматривающая многочастотный режим работы, обеспечивающий однозначное измерение угловых координат целей при использовании разреженной передающей антенной решетки, образованной передающими модулями. Использование нескольких несущих частот является одним из инструментов борьбы с влиянием многолучевого распространения.

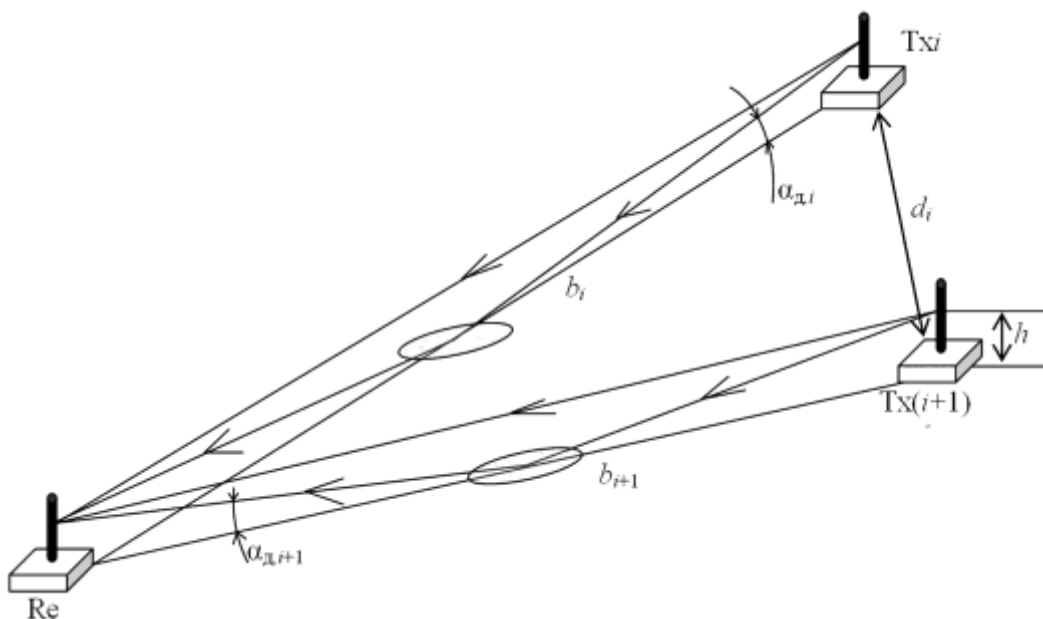


Рис. 2. Влияние многолучевого распространения

В рамках данной работы ограничимся рассмотрением наиболее простого случая, когда в качестве модели подстилающей поверхности рассматривается идеально гладкая проводящая поверхность. На рис. 2 показана иллюстрация, позволяющая определить основные соотношения.

Рассмотрим модель двухлучевого распространения сигнала. При этом ограничимся приближением геометрической оптики. Первый луч – прямой – распространяется непосредственно из фазового центра передающей антенны в фазовый центр приемной. Второй луч переотражается от подстилающей поверхности, после чего также приходит в фазовый центр приемной антенны. Угол между направлением падения (отражения) переотраженного луча и отражающей поверхностью  $\alpha_{д,i}$  будем называть углом дифракции.

Вычислим разность фаз между прямым и переотраженным лучами для случая предполагаемых геометрических параметров системы. Примем для расчета, что длина линии базы  $b = 200$  м, длина волны  $\lambda = 1,7$  м, расстояние между соседними элементами  $d_i = \lambda/2 = 0,85$  м. Ожидаемая высота корпуса передающих и приемных модулей составляет около 10 см. При расположении передающих и приемных модулей непосредственно на поверхности земли и использовании магнитных антенн (высотой около 20 см) можно считать, что высота расположения фазового центра составляет  $h = 0,2$  м. При этом угол дифракции будет  $\alpha_{д} = \arctg\{h/(0,5b)\} = 0,11^\circ$ . Геометрическая разность хода между прямым и переотраженным сигналами равна  $\Delta r = b/\cos(\alpha_{д}) - b = 0,0004$  м = 0,4 мм. Разность хода приведет к набегу фазы  $\Delta\varphi_i = 2\pi(\Delta r)/\lambda = 0,00147$  рад ( $0,085^\circ$ ). Очевидно, что такая разность фаз не может приводить к заметному ухудшению работы алгоритма фазирования.

Другим возможным вариантом размещения позиций системы является размещение на небольшой мачте высотой около 1 м. Аналогичный расчет для этого случая показывает, что разность фаз между прямым и переотраженным сигналами составит около  $2^\circ$ . Такая разность фаз могла бы оказать влияние на работу алгоритма фазирования. Однако следует учесть, что набег фазы переотраженного сигнала, соответствующего каждому из передатчиков, для рассматриваемой модели идеально гладкой поверхности на приемной стороне будет практически одинаков. Поэтому при вычислении разности фаз сигналов, соответствующих разным передатчикам, этот набег фазы будет компенсироваться.

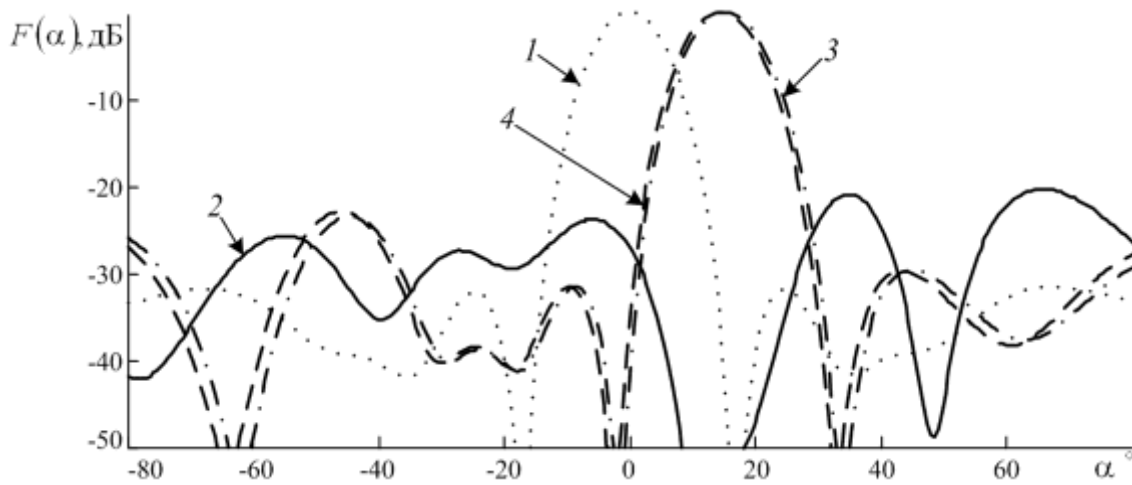
Таким образом, расчеты показывают, что при использовании монохроматического зондирующего сигнала с длиной волны  $\lambda = 1,7$  м (диапазон частот 175 МГц), влияние переотражений от идеально гладкой подстилающей поверхности на работу рассмотренного алгоритма фазирования, пренебрежимо мало. Следует заметить, что в реальных условиях при работе в указанном диапазоне гладкой можно считать поверхность, у которой высота неровностей составляет порядка 20 см [9].

### Результаты моделирования

Работа предложенного алгоритма фазирования передающей антенной решетки была исследована методом математического моделирования. Была рассмотрена система из 15 передатчиков, расположенных псевдослучайным образом в окрестности прямой линии расположения виртуальных передатчиков (рис. 1, линия AA). При этом расстояние между виртуальными и реальными передатчиками не превышало половины длины волны зондирующего сигнала.

На рис. 3 представлены ДН антенной решетки, полученные при различных условиях. При этом полагали, что погрешность начального позиционирования приблизительно соответствует погрешности системы GPS. Из рис. 3 видно, что в общем случае при наличии случайного разброса передатчиков ДН виртуальной решетки имеет случайный характер (на рис. 3, 2). После применения алгоритма фазирования форма ДН, полученная при неизвестном расположении передатчиков (кривые 3 и 4 рис. 3), соответствует форме ДН виртуальной решетки, построенной при известной геометрии системы. Погрешность измерения

длины линии базы приводит к некоторому смещению максимума ДН. Анализ показывает, что это смещение увеличивается при увеличении угла  $\alpha_1$ .



**Рис. 3. Диаграммы направленности передающей АР**

1 – ДН виртуальной решетки в направлении нормали к её апертуре при известной геометрии системы; 2 – ДН виртуальной решетки, сформированная без применения алгоритма фазирования; 3, 4 – ДН виртуальной решетки, сформированная в направлении  $\alpha_1=15^\circ$  с применением алгоритма фазирования без учета погрешности начального позиционирования элементов системы и с учетом погрешности начального позиционирования соответственно

### Выводы

Предложен алгоритм фазирования передающей антенной решетки, состоящей из нескольких независимо работающих передатчиков. Результаты исследования алгоритма фазирования, полученные методом математического моделирования, показывают, что в случае, если имеется возможность предварительного измерения координат позиций системы с использованием приемников навигационной системы GPS (GLONASS), а также возможность перемещения приемной позиции, рассмотренный алгоритм фазирования позволяет обеспечить формирование лучей ДН виртуальной линейной передающей антенной решетки.

Если геометрия расположения передающей системы точно известна, то процедура фазирования производится за один этап и сводится к оценке разностей фаз в приемных каналах. Эти оценки позволяют затем аналитически вычислить элементы матрицы оптимальных весовых коэффициентов для произвольного числа направлений парциальных лучей. В случае, когда геометрия передающей системы случайна и неизвестна, для формирования  $L$  лучей ДН передающей решетки необходимо произвести  $L-1$  перемещение приемной позиции. Для каждого положения приемника необходимо оценить вектор оптимальных весовых коэффициентов.

### Библиографический список

1. **Черняк, В.С.** Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. **Blyakhman, A.B.** Forward Scattering Bistatic Radar // Workshop on Advances in Radar Methods: proceedings of PIERS Baveno, Italy. 1998. P. 107–113.
3. Bistatic Radar: principles and practice / A.B. Blyakhman [et al.]; ed. M. Cherniakov. – Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons, 2007. – 504 p.
4. **Мякинников, А.В.** Обнаружение наземных целей в многопозиционной просветной радиолокационной системе / А.В. Мякинников, Д.М. Смирнова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. Вып. 5. С. 47–55.
5. **Мякинников, А.В.** Определение координат наземных целей в многопозиционной радиолокационной системе с обнаружением "на просвет" / А.В. Мякинников, Д.М. Смирнова // Радиоло-

- кация, навигация, связь" (RLNC-2010): сб. докл. 16-й междунар. научно-технич. конф. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2010. С. 1729–1736.
6. **Бураков, С.В.** Фазовая синхронизация в просветной радиолокационной системе обнаружения наземных целей / С.В. Бураков, А.В. Мякинков // Радиолокация и радиосвязь: сб. докл. IV Всероссийской конф. – М.: Интерсвязьинформ, 2010. С. 60–65.
  7. **Бураков, С.В.** Фазовая синхронизация сигналов и восстановление теневого контура объектов в просветной радиолокационной системе обнаружения наземных целей / С.В. Бураков, А.А. Кузин, А.В. Мякинков // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XVII междунар. научно-технич. конф. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2011. Т. 3. С. 1735–1746.
  8. **Смирнова, Д.М.** Определение координат наземных целей в многопозиционной просветной радиолокационной системе / Д.М. Смирнова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 5. С. 41–47.
  9. **Финкельштейн, М.И.** Основы радиолокации: учеб. для вузов. – 2-е изд. / М.И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.

*Дата поступления  
в редакцию 20.01.2012*

**A.V. Myakinkov, S.V. Burakov, D.M. Smirnova**

## **ALGORITHM OF PHASING IN MULTISTATIC RADAR WITH RANDOM POSITIONING OF TRANSMITTERS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The multistatic radar with random positioning of transmitters for ground target detection is considered. Algorithm of phasing of receiving channels corresponding to different transmitting positions is developed. Proposed algorithm provides coherent integration of signals from different spatial channels and forming of directional pattern of transmitting antenna array. The results of mathematical modeling are presented.

*Key words:* multistatic radar, antenna array, virtual transmitters, correcting multiplier, phase correction.

УДК 621.396.96

Ф.Н. Ковалев

## ОРГАНИЗАЦИЯ КОГЕРЕНТНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РЛС С ОБНАРУЖЕНИЕМ “НА ПРОСВЕТ”

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложены основные принципы построения когерентно-импульсных радиолокационных систем (РЛС) с обнаружением “на просвет”. Предложено использовать импульсный режим для организации просветных радиолокационных комплексов с несколькими передатчиками.

*Ключевые слова:* теневое излучение, просветная радиолокация, когерентно-импульсная РЛС, передатчик с самовозбуждением, временная селекция, многопозиционная радиолокация.

### Введение

В просветных радиолокаторах для обнаружения используется теневое излучение объектов, находящихся в окрестности базы системы – отрезка между приемной и передающей антеннами. Теневое излучение значительно превосходит по мощности поле, рассеянное в обратном направлении (на передатчик), и не зависит от радиопоглощающих покрытий объекта [1]. Это делает просветные РЛС эффективным средством противодействия малозаметным для традиционных радаров целям, в том числе реализованным по технологии Стелс.

Наиболее исследованными являются системы с монохроматическим излучением [2, 3]. В них рассеянный на цели сигнал поступает на вход приемника совместно с мощным прямым сигналом передатчика. Получаемый в точке приема интерференционный сигнал вследствие движения цели становится модулированным по амплитуде с разностной – доплеровской частотой, и для выделения сигнала доплеровской частоты можно использовать амплитудный детектор. Достоинством такого приемника является его простота и отсутствие дополнительных каналов для привязки по высокой частоте с передатчиком, что особенно важно при большом разнесении приемника и передатчика.

Определение координат и траекторий в бистатической РЛС производится по измерениям направления прихода  $\alpha$  (за счет использования направленных свойств приемной антенны) и доплеровской частоты  $f$  принимаемого сигнала [2, 4].

В настоящей работе вместо непрерывного рассмотрен импульсный режим излучения при условии использования в приемнике, как и прежде, прямого сигнала передатчика в качестве опорного. Импульсный режим является малоисследованным и может расширить возможности просветной радиолокации, в том числе стать основой для построения многопозиционных просветных систем.

### 1. Время запаздывания и доплеровская частота

На рис. 1 изображена схема расположения элементов бистатической системы на плоскости с основными обозначениями, используемыми далее. Приемная антенна  $Pr$  имеет координаты  $(0, 0)$ , передающая  $P$  –  $(d, 0)$ ; длина базы равна  $d$ . Цель находится на расстоянии  $r_n$  от передатчика, а от приемника – на  $r_{np}$ ;  $\alpha$  – пеленг цели относительно оси  $Ox$ ;  $v$  – скорость цели.

Временной интервал между моментами приема прямого и рассеянного сигналов

$$\Delta = \tau_p - \tau_{np} = (l - d)/c, \quad (1)$$

где  $\tau_p$  и  $\tau_{np}$  – запаздывание рассеянного и прямого сигналов относительно зондирующего

сигнала;  $l = r_{\text{пр}} + r_{\text{п}}$  – суммарная дальность до цели;  $c$  – скорость распространения радиоволн.

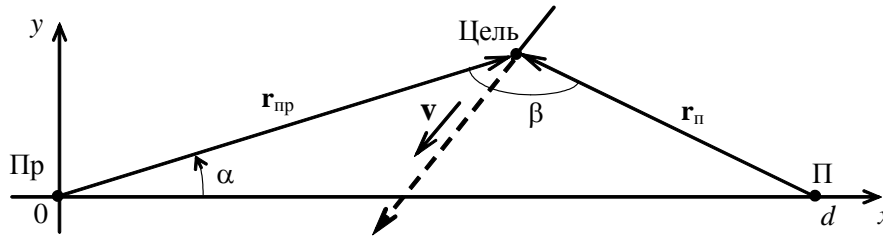


Рис. 1. Геометрия бистатической РЛС

Из (1) видно, что постоянному значению дальности  $l = \text{const}$  соответствует неизменная задержка  $\Delta = \text{const}$ . На плоскости  $xOy$  (рис. 1) линия  $l = \text{const}$  (и как следствие  $\Delta = \text{const}$ ) является эллипсом с фокусами в пунктах размещения антенн. В качестве примера рис. 2 показано семейство эллипсов, вычисленных для  $d = 40$  км и различных значениях задержки  $\Delta$ . Здесь же штрихом изображены дуги окружностей, проходящих через пункты расположения передающей и приемной антенн, для которых остается неизменным значение вписанного угла  $\beta = \beta_{\text{min}} = \text{const}$  (рис. 1). Их можно взять в качестве условной границы зоны видимости системы, то есть полагать, что наблюдение за целью производится при углах  $\beta \geq \beta_{\text{min}} = 150^\circ$ . Такое ограничение вполне оправдано для многих типов воздушных объектов и длине волны порядка одного метра [2].

Максимальное расстояние от базы до дуг окружностей (рис. 2)

$$h = \frac{d}{2 \text{tg}(\beta_{\text{min}}/2)}. \tag{2}$$

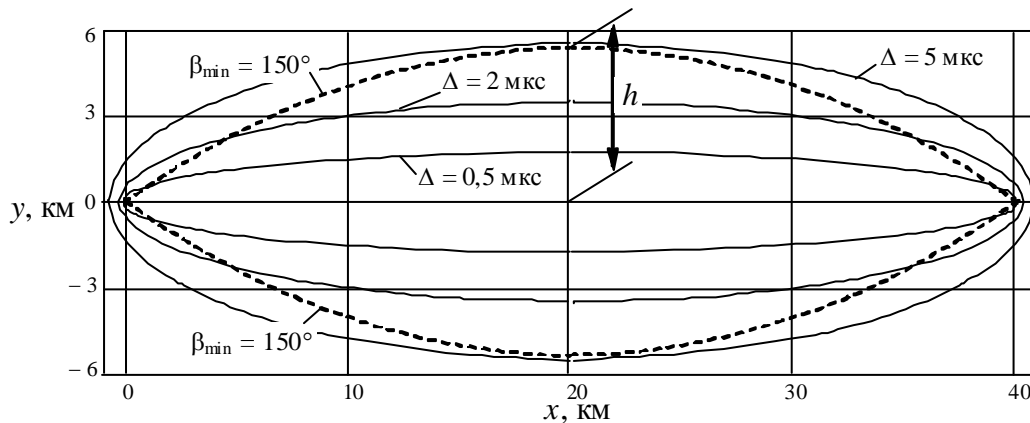


Рис. 2. Семейство эллипсов, соответствующих разным задержкам  $\Delta$

Производная от (1) по времени определяет значение доплеровской поправки частоты (доплеровской частоты) принимаемого сигнала [5]:

$$f(t) = -f_0 \frac{d\tau_p(t)}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl(t)}{dt}, \tag{3}$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $f_0 = c/\lambda$  – несущая частота зондирующего сигнала;  $t$  – время. Доплеровская поправка отсутствует, если цель перемещается по эллипсу суммарной дальности  $l = \text{const}$  (рис. 2), включая базу. Напротив, доплеровский сдвиг наиболее значителен при

движении цели ортогонально к эллипсам, т.е. по биссектрисе бистатического угла [5], и достигает максимальной величины для наиболее скоростных ( $v = v_{\max}$ ) и удаленных ( $\beta = \beta_{\min}$ ) от базы целей:

$$f_{\max} = \frac{2v_{\max}}{\lambda} \cos(\beta_{\min}/2). \quad (4)$$

Например, при  $v_{\max} = 500$  м/с,  $\beta_{\min} = 150^\circ$  и  $\lambda = 1$  м получим  $f_{\max} \approx 250$  Гц.

Приближение цели к базе приводит к уменьшению времени запаздывания  $\tau_p$  и  $\Delta$  (1) и согласно (3), сопровождается положительной поправкой  $f(t) > 0$ . Удаление, наоборот,  $-f(t) < 0$ . В момент  $t_0$  пересечения базы доплеровская частота  $f(t_0) = 0$ . Это обстоятельство лежит в основе методов определения координат цели в системах с монохроматическим излучением [4, 6]: в момент  $t_0$  дальность  $l(t_0) = d$ , и интегрирование (3) позволяет получить значение суммарной дальности в текущий момент времени, т.е.

$$l(t) = \begin{cases} d + \lambda \int_{t_0}^t f(t) dt, & t \leq t_0, \\ d - \lambda \int_t^{t_0} f(t) dt, & t > t_0. \end{cases} \quad (5)$$

Точка пересечения эллипса, соответствующего вычисленной из (5) дальности  $l = \text{const}$ , и луча, выходящего из точки  $O$  (рис. 1) под углом  $\alpha$  к оси  $Ox$ , определяет местоположение цели.

## 2. Импульсный режим

Пусть бистатическая просветная РЛС (рис. 1) работает в импульсном режиме излучения с сохранением прежней когерентной связи с передатчиком. Чтобы получить доплеровские биения, выполним условие перекрытия во времени прямого и рассеянного сигналов. Как и в непрерывном режиме, мощный прямой радиоимпульс будет выступать в качестве опорного, а выделение сигнала доплеровской частоты легко производить амплитудным детектором в моменты перекрытия прямого и рассеянного импульсов.

Согласно рис. 2, максимальное значение задержки  $\Delta$  в системе соответствует эллипсу, касающемуся дуг окружностей в центре базы  $x = d/2$ , и равно

$$\Delta_{\max} = \frac{d}{c} \left( \frac{1}{\sin(\beta_{\min}/2)} - 1 \right). \quad (6)$$

Например, при  $\beta_{\min} = 150^\circ$  задержка равна  $\Delta_{\max} \approx 4,7$  мкс. Выбирая длительность  $\tau_{\text{и}}$  зондирующего импульса, равную задержке  $\Delta_{\max}$ ,

$$\tau_{\text{и min}} = \Delta_{\max}, \quad (7)$$

добьемся наложения во времени прямого и рассеянного сигналов во всей зоне видимости, ограниченной значением  $\beta_{\min}$ .

Увеличение  $\tau_{\text{и}}$  по сравнению с (7) удлиняет время перекрытия импульсов для целей, находящихся внутри зоны видимости ( $\beta \geq \beta_{\min}$ ). При этом ограничение длительности зондирующего сигнала сверху будет определять схему построения приемника.

Рассмотрим два варианта организации импульсного режима: длинными и короткими импульсами. В первом случае длительность импульса соответствует времени  $T$  однократного

измерения частоты принимаемого сигнала ( $\tau_n = T$ ). Обработка сигнала здесь аналогична непрерывному режиму, так как интервал  $\tau_n$  много больше  $1/f_{\max}$ , и на нём может укладываться много периодов сигнала доплеровской частоты. Выбор времени  $\tau_n$  ограничивает минимальное значение модуля доплеровского сдвига обнаруживаемого сигнала. Например, если  $\tau_n = 1$  с, то  $|f_{\min}| = 1/\tau_n = 1$  Гц.

Во втором случае длительность коротких импульсов может быть сопоставима с максимальной задержкой  $\Delta_{\max}$ :

$$\Delta_{\max} < \tau_n \ll 1/f_{\max},$$

а период повторения излучения передатчика  $T_n$  для исключения слепых скоростей следует выбирать из условия

$$T_n < 1/(2f_{\max}).$$

В просветной РЛС это неравенство выполнить намного проще, чем в однопозиционном радиолокаторе, из-за меньшего в  $(\cos(\beta_{\min}/2))$  раз сдвига частоты (4). Подавление пассивных помех в приемнике может осуществляться гребенчатыми фильтрами, выполненными, например, по схеме череспериодного вычитания [7]. В качестве передатчиков могут использоваться простые передатчики с самовозбуждением, например, на основе магнетронного генератора. Несмотря на случайный характер начальной фазы зондирующих импульсов, когерентный режим здесь сохраняется, благодаря использованию излученного импульса в качестве опорного.

### 3. Многопозиционные РЛС

Импульсный режим в просветной радиолокации может быть обусловлен многими причинами. Например, в распоряжении разработчика имеется импульсный генератор или работающая импульсная совмещенная РЛС с параметрами излучения, соответствующими обозначенным выше условиям. “Подключение” к ней вынесенного на расстояние базы  $d$  приемника дает ещё одну – теперь уже бистатическую просветную – систему. С другой стороны, импульсный режим удобен для селекции сигналов в многопозиционной РЛС с несколькими передатчиками.

Как известно, объединение нескольких РЛС в многопозиционную систему предполагает их работу в разных частотных диапазонах [5], с целью предотвращения их нежелательного взаимодействия.

Импульсный режим предопределяет другую организацию работы объединяемых РЛС – передатчики могут работать и на одной частоте, но излучение производится поочередно через интервалы, необходимые для образования временных окон, в течение которых осуществляется прием сигналов от целей, облученных предыдущим передатчиком системы. Основой временного разделения каналов в просветных РЛС являются относительно узкая ширина зоны видимости и, как следствие, небольшое время задержки  $\Delta$  рассеянного сигнала относительно прямого (рис. 2).

Рассмотрим возможность временной селекции сигналов на примере простейшей многопозиционной РЛС с несколькими передатчиками (рис. 3). Система состоит из двух идентичных бистатических ячеек, образованных приемником Пр с каждым из двух передатчиков  $П_1$  и  $П_2$ , равноудаленных от приемника.

Чтобы ослабить взаимодействие сигналов ячеек, когда рассеянный на объекте сигнал от одного передатчика приходит в приемник с прямым сигналом другого передатчика, интервал  $T_n$  между излучениями передатчиков следует брать не менее величины, определяемой максимальной задержкой  $\Delta_{\max}$  (6):



$$T_{\text{и}} > \tau_{\text{и}} + \Delta_{\text{max}},$$

а период повторения излучения каждого из передатчиков  $T_{\text{п}} \geq 2T_{\text{и}}$ . Например, в радиолокационной системе с длинными импульсами, когда задержки  $\Delta$  несоизмеримо меньше  $\tau_{\text{и}}$ , минимальное значение периода  $T_{\text{п min}} \approx 2\tau_{\text{и}}$ .

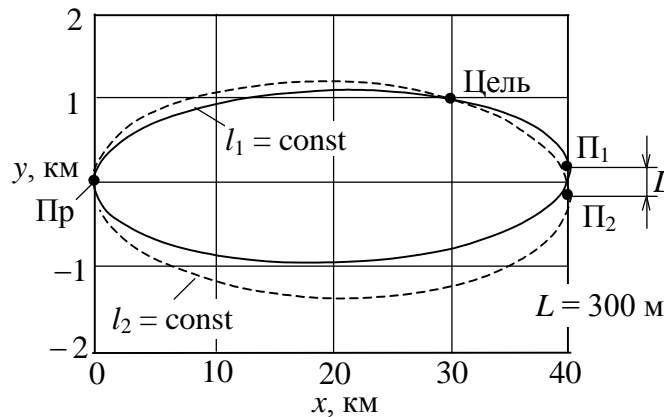


Рис. 3. Геометрия просветной РЛС с двумя передатчиками

Примем для определенности, что передатчики удалены от начала системы координат на рис. 3 (приемника) на 40 км. Тогда зондирование длинными импульсами  $\tau_{\text{и}} = 0,5$  с учетом малости времени задержки  $\Delta \ll \tau_{\text{и}}$  (рис. 2) позволяет делать период повторения  $T_{\text{п}} = 1$  с и чередовать работу передатчиков через  $T_{\text{и}} = 0,5$  с.

Для варианта с короткими импульсами возьмем  $\tau_{\text{и}} = 50$  мкс,  $T_{\text{и}} = 1$  мс и  $T_{\text{п}} = 2$  мс. Выбор такой длительности импульсов дает глубокое – более 45 мкс – перекрытие прямого и рассеянного сигналов для целей в зоне видимости  $\beta \geq 150^\circ$  (рис. 2). А интервал  $T_{\text{и}} = 1$  мс вполне обеспечивает “развязку” сигналов бистатических ячеек. Действительно, рассеянный объектом сигнал поступает на вход приемника одновременно с прямым сигналом другого передатчика, пройдя путь

$$l_i = T_{\text{и}}c + d_j \approx 340 \text{ км},$$

где  $l_i$  – суммарная дальность для ячейки с  $i$ -м передатчиком ( $i = \overline{1,2}$ );  $d_j$  – база другой ячейки ( $j = \overline{1,2}$ ),  $j \neq i$ . Объект находится далеко за пределами зоны видимости. Мощность рассеянного им сигнала с учетом снижения интенсивности теневого поля существенно меньше (более чем на 4 порядка) мощности рассеянного сигнала в случае нахождения объекта в пределах зоны видимости.

Интервал между излучениями коротких импульсов можно брать и менее  $T_{\text{и}} = 1$  мс, если использовать, например, генераторы с самовозбуждением. Тогда случайный характер начальной фазы зондирующих импульсов обеспечит разрыв когерентной связи между сигналом от цели, облученной одним передатчиком, и прямым сигналом другого передатчика.

Для упрощения конструкции системы на рис. 3 целесообразно ограничиться измерениями доплеровской частоты. В этом случае задача местоопределения может решаться аналогично РЛС с разнесенным приемом [6]: по оценкам частоты  $f_1(t)$  в системе с передатчиком  $\text{П}_1$  и  $f_2(t)$  в системе с передатчиком  $\text{П}_2$  по формулам (5) определяются дальности  $l_1(t)$ ,  $l_2(t)$ , соответствующие им эллипсы положения и в итоге местоположение объекта по пересечению эллипсов (рис. 3). При короткоимпульсном зондировании оценивать частоту удобно с помощью быстрого преобразования Фурье. Число отсчетов  $N$  и полосы фильтров  $\Delta F$  определяют

ся интервалом  $T$ , за который производится оценка частоты. Например, при  $T = 0,5$  с для рассматриваемого примера получим  $N = T/T_{\text{п}} = 250$  и  $\Delta F = 1/T = 2$  Гц.

### Заключение

Таким образом, использование радиоимпульсов длительности (7) позволяет создавать просветные когерентные РЛС с излучаемым сигналом в качестве опорного. Выделение доплеровских биений в приемнике производится аналогично системам с непрерывным излучением с помощью амплитудного детектора в моменты наложения прямого и рассеянного импульсов. Предложено использовать импульсный режим для организации совместной работы просветных радиолокаторов в составе многопозиционных комплексов. Ослабить взаимное влияние сигналов радиолокаторов возможно с помощью передатчиков с самовозбуждением, особенностью которых является случайная начальная фаза зондирующих импульсов.

### Библиографический список

1. Уфимцев, П.Я. Черные тела и теневое излучение // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 12. С. 2519–2527.
2. Бляхман, А.Б. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации “на просвет”/ А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424–432.
3. Chapurskiy, V. SISAR: shadow inverse synthetic aperture radiolocation / V. Chapurskiy, V. Sablin // IEEE International Radar Conference. – Alexandria, USA. 2000. Pp. 322–328.
4. Бляхман, А.Б. Метод определения координат движущихся целей при радиолокации “на просвет”/ А.Б. Бляхман, Ф.Н. Ковалёв, А.Г. Рындык // Радиотехника. 2001. № 1. С. 4–9.
5. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
6. Ковалев, Ф.Н. Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением “на просвет”// Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.
7. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширмана [и др.]; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио, 1970. – 560 с.

Дата поступления  
в редакцию 20.01.2012

F.N. Kovalev

### THE ORGANIZATION OF COHERENT-PULSE OPERATING MODE OF THE FORWARD-SCATTERING RADAR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

Principles of coherent-pulse forward-scattering radar are considered. The pulse operating mode is offered for the forward-scattering multiradar with several transmitters.

*Key words:* forward-scattering, forward-scattering radiolocation, coherent-pulse radar, self-excited transmitter, magnetron, time separation, multiradar system.

УДК 534.87

В.Е. Гай

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНОГО ТОНА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

Предлагается метод определения основного тона сигнала. Рассматривается вся последовательность этапов определения основного тона, начиная с выделения вокализованного сегмента сигнала. Разработанный алгоритм основан на использовании теории активного восприятия, адаптированной к анализу речевых сигналов. Результаты проведенных экспериментов подтверждают возможность использования предложенного алгоритма для решения поставленной задачи.

*Ключевые слова:* цифровая обработка сигналов, анализ речевых сигналов, основной тон.

**Введение**

Основной тон – мгновенная частота колебаний голосовых складок диктора. Для мужских голосов типичной областью изменений основной частоты голоса является 50–150 Гц, для женских – более высокая область 120–500 Гц. Значение основного тона используется при оценке эмоционального состояния диктора. Типичные средние значения частоты основного тона в речи, определенные на группе говорящих, составляют 132 Гц для мужчин, 223 Гц для женщин и 264 Гц для детей [1]. По основному тону возможна классификация дикторов на мужчин и женщин [2].

Изменение частоты основного тона во времени имеет сложную структуру. Соседние периоды основного тона, как правило, отличаются по величине друг от друга, и эти различия передают информацию. Наиболее важная для интонации составляющая частоты основного тона – это крупные и плавные изменения (подъемы, падения и более сложные конфигурации), реализующиеся в пределах слогов, слов и синтагм. Именно применительно к данной составляющей контура частоты основного тона можно говорить о мелодике, только эти тональные изменения воспринимаются как мелодические и передают информацию. На конкретные значения частоты основного тона, наблюдаемые на протяжении высказывания, влияет ряд факторов [3].

**1. Обзор алгоритмов оценки частоты основного тона**

На настоящий момент разработано большое количество алгоритмов, предназначенных для оценки величины основного тона.

Алгоритм, основанный на подсчете пересечений нулевого уровня, рассматривается в [4]. Алгоритм определения периода сигнала, основанный на вычислении его автокорреляционной функции (АКФ) описан в [2]. Одним из его недостатков является сложность обработки сигнала, включающего несколько гармоник. В [5] рассматривается алгоритм, который решает указанную проблему.

Существуют также алгоритмы, предназначенные для поиска основного тона в фазовом пространстве [6], в частотной области [8], с помощью кепстрального анализа. В [9] выделение основного тона выполняется на основе фильтров с различной центральной частотой. Многомасштабный метод определения основного тона рассматривается в [10].

Количественная мера оценки точности выделения основного тона предлагается в [15]:

$$E = \frac{100}{K} \sum_{k=1}^K \begin{cases} 1, & \text{если } |N_k| \geq \xi \\ 0, & \text{если } |N_k| < \xi \end{cases}, N_k = P_k - 1, P_k = \frac{P'_k}{P_k}$$

где  $E$  – оценка точности;  $K$  – количество измерений основного тона;  $\xi$  – порог разделения грубых ошибок оценки и мелких отклонений;  $N_k$  – нормированная ошибка оценки основного тона;  $p_k$  – оценка периода основного тона на выходе алгоритма;  $p_k$  – контрольное значение периода для  $k$ -й точки, известное заранее.

## 2. Алгоритм выделения основного тона

Пусть  $f(t)$  – исходный сигнал, представляющий собой запись голоса диктора, содержащую всю необходимую информацию для оценки частоты основного тона. Параметры алгоритма:

- 1) порог, используемый при сравнении амплитуд двух максимумов ( $T$ );
- 2) длина анализируемого сегмента ( $L$ ).

Исходные данные для алгоритма – спектральное представление сигнала  $S$ , построенное на основе  $U$ -преобразования для одномерных сигналов [11, 12, 13, 14]. Спектральное представление  $D$  включает  $M$  спектров, где  $M$  – число сегментов сигнала (формируется один уровень разложения). Каждый спектр представляет собой набор коэффициентов  $D_i = \{d_0, \dots, d_{N-1}\}$ . При формировании спектра используется  $F$  фильтров. Спектр вычисляется по отрезку сигнала длиной  $L$  отсчётов, со смещением в  $T$  отсчётов. При реализации алгоритма используются фильтры Уолша системы Хармута [13, 14]. Сегменты не пересекаются ( $T = L$ ). Рассмотрим шаги алгоритма оценки основного тона.

### 2.1. Выделение периодической компоненты речевого сигнала

1) Выполнить сравнение спектров разложения  $D$  друг с другом: если суммарная разница элементов  $i$ -го и  $j$ -го спектров меньше порога  $T_1$ , то значение  $i$ -го элемента массива  $N$  увеличивается на единицу. При сравнении спектров не учитывается отклик нулевого фильтра.

2) Сформировать массив  $R$  (длина массива равна длине массива  $N$ ):

$$R_i = \begin{cases} 1, & N_i < T_2 \cdot \max(N), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3) Выполнить поиск последовательностей единиц в массиве  $R$ . Каждая такая последовательность соответствует вокализованному участку исходного сигнала. Таким образом, после обработки массива  $R$  будет получено разбиение исходного сигнала на вокализованные / невокализованные участки.

Для каждого сигнала значения параметров индивидуальны, однако следует придерживаться следующих замечаний по связи значений параметров:

а) не рекомендуется использовать значение  $L \geq 200$ , так как это существенно снижает точность выделения периодических элементов;

б) при уменьшении длины сегмента  $L$  надо уменьшать порог  $T$ , иначе не будут выделяться периодические сегменты;

в) при увеличении длины сегмента  $L$  надо увеличивать порог  $T$ , иначе вместе с периодическими сегментами будут выделяться участки сигнала, находящиеся рядом с компонентой и отличающиеся от неё по структуре (например, такие участки не содержат периодов, входящих в компоненту);

г) значение параметра  $T_2$  влияет на точность выделения периодических компонент: меньшее значение параметра соответствует более точному выделению периодических составляющих (в данном случае под точностью понимается выделение компоненты с выраженной периодичностью), также уменьшение данного параметра приводит к уменьшению числа выделенных компонент;

д) при применении алгоритма рекомендуется начать с меньших значений  $L$ , если для них алгоритм не выдаёт результат, значение  $L$  нужно увеличивать.

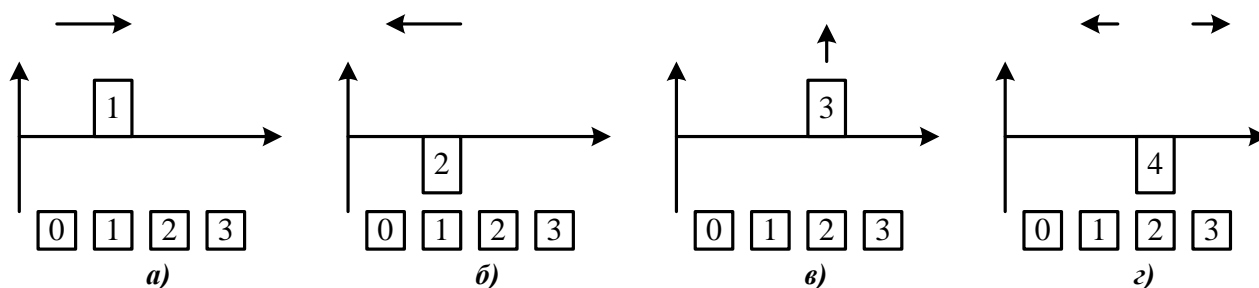
## 2.2. Выделение максимумов сигнала

Одним из этапов является выделение максимумов сигнала. Максимумы выделяются на основе разложения, полученного на предыдущем шаге алгоритма.

После проведённого анализа участков сигналов, включающих максимумы, были выделены четыре типовых спектра, наличие которых указывает на расположение максимума относительно центра рассматриваемого сегмента (обозначается стрелкой над спектром, рис. 1). Стрелка вверх обозначает, что максимум приходится на центр анализируемого сегмента. В нижней части рис. 1 в квадратах показаны фильтры, формирующие отклики.

Для определения типа спектров необходимо сравнить отклики первого и второго фильтров:

- 1) если  $|s_1| > |s_2|$  и  $s_1 > 0$ , то спектр относится к первому типу;
- 2) если  $|s_1| > |s_2|$  и  $s_1 < 0$ , то спектр относится ко второму типу;
- 3) если  $|s_1| < |s_2|$  и  $s_2 > 0$ , то спектр относится к третьему типу;
- 4) если  $|s_1| < |s_2|$  и  $s_2 < 0$ , то спектр относится к четвёртому типу.



**Рис. 3. Классификация спектров:**

*a* – первый тип ( $\rightarrow$ ); *б* – второй тип ( $\leftarrow$ ); *в* – третий тип ( $\uparrow$ ); *г* – четвёртый тип ( $\leftrightarrow$ )

При анализе спектров сигнала может возникнуть ситуация, когда значения откликов первого и второго фильтров будут эквивалентны по модулю. В этом случае считается, что данные спектры относятся к третьему типу (см. рис. 7).

Выше описаны особенности спектров, которые позволяют определить позицию максимума относительно центра сегмента. В зависимости от ситуации для определения позиции максимума требуется два или три спектра. Например, возможны следующие ситуации:

1) спектр третьего типа указывает позицию максимума, спектр второго типа подтверждает найденную позицию;

2) позицию максимума определяют идущие подряд спектры первого и второго типов.

При анализе реальных сигналов были выделены следующие цепочки спектров, указывающих на присутствие максимума в сигнале на протяжении спектров, образующих цепочку:

1)  $\rightarrow\uparrow\leftarrow$  ( $\rightarrow\uparrow\leftarrow\uparrow\leftarrow\uparrow\leftarrow$ , как вариант, в начале сигнала:  $\uparrow\leftarrow\uparrow\leftarrow\uparrow\leftarrow$ , в конце сигнала:  $\rightarrow\uparrow\leftarrow\uparrow\leftarrow$ ) или  $\uparrow$ ;

2)  $\rightarrow\uparrow$ ;

3)  $\uparrow\leftarrow$ ;

4)  $\uparrow\uparrow\uparrow$  (несколько пиков принимаются за один);

5) цепочка  $\uparrow\uparrow\uparrow\leftarrow$  ( $\rightarrow\uparrow\uparrow\uparrow$ ) распадается на две:  $\uparrow\uparrow$  и  $\uparrow\leftarrow$  ( $\rightarrow\uparrow$  и  $\uparrow\uparrow$ );

6)  $\rightarrow\leftrightarrow$ ;

7)  $\leftrightarrow\leftarrow$ ;

8)  $\rightarrow\leftarrow$ ;

9)  $\leftrightarrow\leftrightarrow$ ;

10)  $\leftrightarrow\uparrow$ ;

11)  $\uparrow\leftrightarrow$ ;

12)  $\rightarrow\leftrightarrow\leftarrow$ .

Предполагается, что каждая из найденных цепочек соответствует только одному максимуму. Необходимо отметить, что цепочка  $\rightarrow\rightarrow\uparrow\leftarrow\leftarrow$ , а также все цепочки, построенные по похожему принципу, т.е. с дублированием первых и последних спектров, т.е. спектров одинакового типа, сокращается до  $\rightarrow\uparrow\leftarrow$ .

Таким образом, алгоритм выделения максимумов сигнала состоит из следующих этапов:

1) определение типа каждого спектра разложения (разметка сигнала);

2) выделение в размеченном сигнале описанных выше цепочек;

3) поиск максимума в  $i$ -й цепочке:

- определение координаты начала ( $x$ ) и конца ( $y$ ) цепочки в сигнале;

- поиск на отрезке сигнала  $[x; y]$  спектра третьего типа с использованием механизма тремора;

- определение координаты максимума;

5) вследствие того, что при поиске максимума с помощью тремора существует некоторая погрешность определения его координаты, необходимо выполнить уточнение положения максимума на уровне отсчётов.

Одним из параметров алгоритма выделения максимумов является длина анализируемого сегмента сигнала  $L$ . Априорно не известно значение  $L$ , которое нужно выбрать для построения разложения сигнала. Оценить точность выделения максимумов при использовании заданного  $L$  можно, используя следующее выражение:

$$E = \sum_{i=1}^N f[M[i]] / N.$$

На рис. 4 показаны результаты выделения максимумов сигнала при  $L = 16$ .

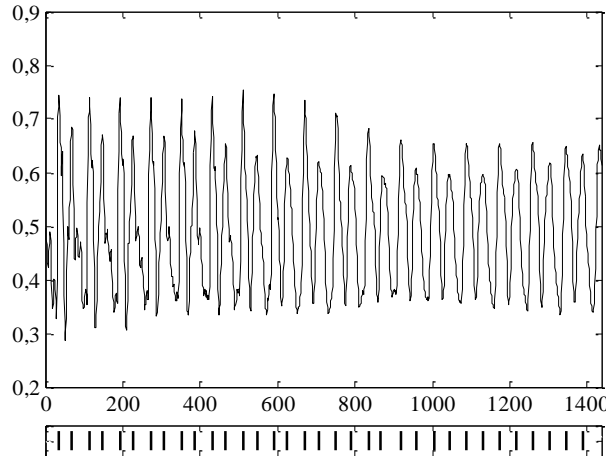


Рис. 4. Результат выделения максимумов при различных значениях  $L$

### 2.3. Алгоритм определения основного тона

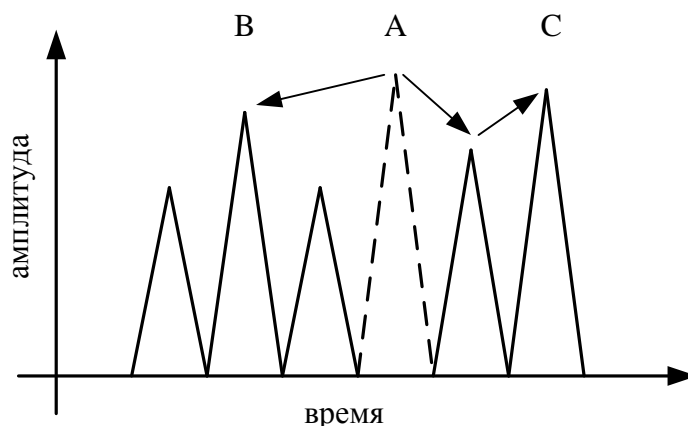
1. Предварительная оценка основного тона. Результаты, полученные на данном шаге, используются для оценки основного при дальнейшей работе алгоритма:

1.1. Определение позиции максимума максимума сигнала (А);

1.2. Предварительная оценка расстояний между максимумами сигнала (в отсчётах): вычисляется расстояние от максимума А до ближайших максимумов (В и С), близких к нему по амплитуде (используется порог  $T$ ), расстояния АВ и АС не должны отличаться более чем на 25%, в противном случае необходимо проверить следующие максимумы;

1.3. Уточнение расстояний: рядом с найденными максимумами В и С могут быть максимумы, превосходящие их по амплитуде (период может быть сложной формы, рис. 5). По-

этому нужно поискать максимумы рядом, чтобы удостовериться, что рядом нет больших максимумов. Если же таковые присутствуют, то необходимо заменить индекс найденного ранее максимума на индекс максимума с большей амплитудой.



**Рис. 5. Поиск ближайших максимумов:**  
 - - - - - глобальный максимум

## 2. Определение основного тона периодов сигнала:

2.1. Поиск ближайшего по амплитуде максимума для  $B$  слева, обозначим найденный максимум буквой  $D$ ;

2.2. Поиск ближайшего по амплитуде максимума для  $C$  справа, обозначим найденный максимум буквой  $E$ ;

2.3. Расстояния  $DB$  и  $CE$  не должны отличаться друг от друга, а также от расстояний  $AB$  и  $BC$  более чем на 25%, в противном случае необходимо повторно выполнить шаги 4.1–4.2 с учётом координат найденных максимумов. Если расстояния отличаются на допустимое значение, то координаты  $D$  и  $E$  сохраняются в массив  $R$ , после чего выполняется обновление значений  $B$  и  $C$ :  $B = D$ ,  $C = E$ .

Данный шаг выполняется до тех пор, пока не будут обработаны все максимумы, находящиеся слева и справа от  $A$ .

## 3. Вычислить расстояния между максимумами по массиву $R$ :

$\forall i \in [1; N-1]$ :

$$D(i) = R(i) - R(i+1),$$

где  $N$  – количество элементов в массиве  $R$ ;

4. Поиск корректных расстояний: некорректным является расстояние, отличающееся от максимального из расстояний  $AB$ ,  $AC$  более чем на 25%.

Результат работы алгоритма – массив расстояний  $D$  между максимумами, которые ограничивают периоды сигнала. По указанному массиву вычисляется массив частот основного тона  $F$ :

$\forall i \in [1; N]$ :

$$F(i) = G / D(i),$$

где  $G$  – частота дискретизации исходного сигнала.

Заранее неизвестно, какие значения  $T$  и  $L$  позволят наиболее точно определить частоту основного тона. Поэтому предлагается выполнить оценку с помощью следующих наборов значений параметров:  $T = [0.01 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.2 \ 0.25]$ ,  $L = [4, 8]$ , после чего из всех результатов выбрать наиболее точную оценку основного тона. Оценку точности выделения основного тона при использовании параметров  $\{L, T\}$  можно выполнить, используя следующее выражение, приведённое в п. 2.2. Большие значения  $E$  указывают на более точную оценку основного тона.

### 3. Вычислительный эксперимент

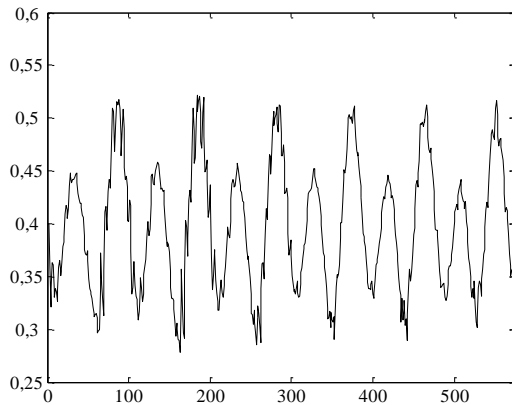


Рис. 6. Тестовый сигнал 1

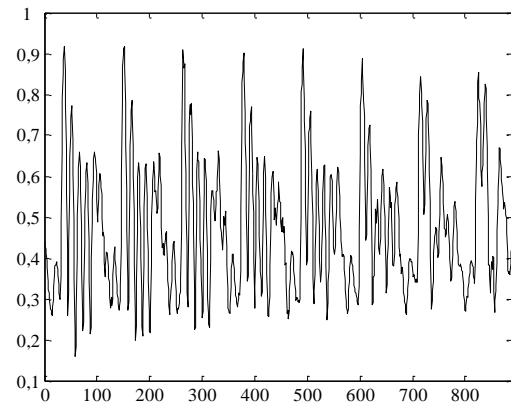


Рис. 7. Тестовый сигнал 2

Набор частот основного тона, вычисленных по сигналу, приведённому на рис. 6: 166, 158, 173, 179, 186 Гц, на рис. 7: 140, 144, 137, 141, 142, 142, 146 Гц. Точность оценки основного тона для первого сигнала составляет 3,4%, для второго – 5,1%.

Тестирование проводилось на речевых сигналах 20 дикторов (10 мужчин, 10 женщин). Результаты тестирования подтвердили достоверность работы предложенного алгоритма.

#### Заключение

В работе предлагается алгоритм оценки частоты основного тона. К достоинствам алгоритма относятся возможность обработки периодических сигналов сложной формы.

По сравнению с другими алгоритмами, работающими во временной области, предлагаемый алгоритм позволяет обрабатывать сложные периодические сигналы (с большим количеством гармоник) без предварительного сглаживания сигнала фильтрами нижних частот.

#### Библиографический список

1. **Светозарова, Н. Д.** Интонационная система русского языка / Н.Д. Светозарова. – Л.: 1982. – 176 с.
2. **Аграновский, А.В.** Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов / А.В. Аграновский, Д.А. Леднов. – М.: Радио и связь, 2004. – 164 с.
3. **Катаева, О.В.** Многоаспектная природа «Мелодики речи» // Аналитика культурологи. 2005. Вып. 2(4).
4. **Kedem, B.** Spectral analysis and discrimination by zero-crossings / B. Kedem // Proceedings of the IEEE, 74(11):1477–1493, November 1986.
5. **Cheveigne, A.** Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music / A. Cheveigne, H. Kawahara // Journal of the Acoustical Society of America. 2002. 111(4).
6. **Gerhard, D.** Audio visualization in phase space / D. Gerhard // Mathematical Connections in Art, Music and Science. 1999. P. 137–144.
7. **Piszcalski, M.** Predicting musical pitch from component frequency ratios / M. Piszcalski, A.B. Galler // Journal of the Acoustical Society of America. 1979. 66(3). P. 710–720.
8. **Moorer, J. A.** On the transcription of musical sound by computer / J. A. Moorer // Computer Music Journal. 1977. November. P. 32–38.
9. **Geoffiois, E.** The multi-lag-window method for robust extended-range f0 determination / E. Geoffiois // Fourth International Conference on Spoken Language Processing. 1996. V. 4. P. 2239–2243.
10. **Утробин, В. А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений / В.А. Утробин. – Н. Новгород: НГТУ, 2001. – 234 с.



11. **Утробин, В. А.** Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов / В.А. Утробин. Н. Новгород: НГТУ, 2004. – 221 с.
12. **Хармут, Х.Ф.** Применение методов теории информации в физике: [пер. с англ.] / Х.Ф. Хармут. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
13. **Хармут, Х. Ф.** Передача информации ортогональными функциями: [пер. с англ.] / Х.Ф. Хармут. – М.: Связь, 1975. – 272 с.
14. **Бабкин, В.В.** Помехоустойчивый выделитель основного тона речи // 7-я Международная конференция и выставка цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2005, Москва 16-18 марта 2005 г. – М., 2005.

*Дата поступления  
в редакцию 20.01.2012*

**V.E. Gai**

## **METHOD FOR DETERMINING THE PITCH OF THE VOICE SIGNAL**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

A method of determining the signal pitch. Examines the entire sequence of steps to determine the pitch, beginning with the selection of voiced segment of the signal. Developed algorithm is based on the theory of active perception, adapted to the analysis of speech signals. The results of the conducted experiments to confirm the possibility of using the suggested algorithm for the solution.

*Key words:* digital signal processing, analysis of speech signals, pitch.

---

# МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

---

УДК 517.465

А.И. Зайцев<sup>1,2,3</sup>, А.Е. Малашенко<sup>1</sup>, И.С. Костенко<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>2,3,4</sup>,  
К.И. Кузнецов<sup>1,5</sup>

## РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛН-УБИЙЦ В ЗАЛИВЕ АНИВА ОХОТСКОГО МОРЯ

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований,  
Южно-Сахалинск<sup>1</sup>,  
Институт прикладной физики РАН<sup>2</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>,  
Высшая школа экономики<sup>4</sup>,  
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск<sup>5</sup>

**Цель:** Целью данной работы является изучение характеристик anomalно высоких волн, зарегистрированных в заливе Анива Охотского моря.

**План/методология/подход:** Последние три года Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова Сахалин (залив Анива) с помощью автономных донных регистраторов гидростатического давления АРВ-К12. Анализ записей волн выполнен методами, развитыми в океанографии: каждый 20-минутный сегмент рассматривают как постоянный вероятностный процесс и выполняют вычисления его статистических особенностей. Отдельные волны с амплитудами в два раза превышения значимой высоты идентифицированы как неправильные anomalные (убийцы) волны. Проанализированы их формы и вероятность возникновения.

**Полученные результаты:** За время наблюдений (с июня по сентябрь 2009 г.) у южных берегов острова Сахалин (залив Анива), зарегистрировано 394 anomalно больших волны, удовлетворяющих критерию волн-убийц (высота волны в два и более раз превышает значительную высоту волны), из них 6 случаев, когда превышение достигает 2,5. Вероятность возникновения anomalно больших волн хорошо соответствует распределению Пуассона.

**Исследовательские результаты/применение:** Данное исследование обеспечивает начало для дальнейшего изучения особенностей волн в различных областях Охотского моря, оно необходимо для судоходства и нефтегазового освоения на шельфе.

**Новизна/важность:** Это первые данные, показывающие существование волн-убийц в Охотском море. Их параметры в среднем схожи с особенностями anomalных волн в Мировом Океане. Региональные особенности anomalных волн должны быть проанализированы с использованием систему распределенных датчиков в Охотском море.

*Ключевые слова:* инструментальные данные, anomalные волны (волны-убийцы), Охотское море.

### Введение

В последнее время накопилось много свидетельств появления необычных волн, называемых в литературе волнами-убийцами, на поверхности моря как в открытой части, так и вблизи берега. Некоторые натурные данные как визуальные, так и инструментальные, приведены в книгах, каталогах и статьях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Данных о наблюдениях волн-убийц в морях, окружающих Россию, весьма немного. Отметим здесь наблюдения anomalно больших волн в Черном [10, 11, 12] и Балтийском морях [13, 14]. Что же касается восточного

побережья России, то в литературе приводится только одна фотография необычной волны, наблюдаемой М.В. Соколовским вблизи восточного побережья Камчатки в 25 км от мыса Ольги в июне 2006 г. [1]. Является ли эта волна волной-убийцей (то есть редко наблюдающейся) однозначно сказать нельзя, и авторы, например, каталога [7] считают, что такие волны в данном месте появляются достаточно часто.

Наблюдения волн – убийц вблизи побережья Сахалина практически полностью отсутствуют. По сообщению Андрея Серафимова (частично оно есть на форуме <http://www.raspadok.ru/forum>), он наблюдал аномальную волну 2 августа 2010 г. вблизи западного побережья Сахалина в районе мыса Воздвижения во время каякерского похода вдоль участка западного побережья Сахалина от п. Бошняково до г. Александровска-Сахалинского. Приведем в сокращенном виде его описание: «Волнения моря в тот день практически не было, и белая вода была только в зоне прибоя. Я проходил примерно в 500 м от скалистого участка берега с неприятным предчувствием, так как берег напротив этого места был непричальным, пляжа там не было, прибой бил в скальную стену и большие валуны. В случае оверкиля будет трудно дрейфовать к берегу в связи со сложной зоной прибоя. И, самое главное, будучи на расстоянии более километра до этого места напротив скал, я пару раз замечал мелькание чего-то светлого, но вглядываясь, не фиксировал ни характерно повторяющихся белых барашков ломающихся волн, как это обычно бывает над мелью, ни чего-то подобного, что указывало бы на необходимость обогнуть это место. День был солнечным, расстояние до берега значительным и я решил, что это были отблески солнца. За всё время подхода со зрительным мониторингом этого места никаких угроз не проявилось.

Когда я уже окончательно уверовал, что зря беспокоился, в нескольких метрах от меня внезапно выросла боковая волна, поднялась надо мной и прихлопнула меня сверху. Мощным ударом сверху меня притопило, прижало, оглушило, но, не перевернуло, чему я удивился. Волна была короткой и по ширине, и по длине, и по ходу (по меньшей мере в своей высокой стадии). То, что меня не перевернуло, вероятно, связано с тем, что волна не пошла дальше меня в том виде, в котором она развлекалась со мной. Иначе бы она потащила бы меня боком и, заворачиваясь дальше, обязательно бы перевернула. Но волна быстро выросла, завернулась, сломалась, обрушилась и рассосалась.

Высота волны в тот момент мне показалась очень большой, но по описанию ребят с соседней двойки выходит, что она была выше меня, сидячего в каяке, примерно на вытянутую руку. Пока я приходил в себя, ко мне подошла двойка и с неё категорически заявили, что мой инцидент с волной выглядел со стороны крайне эффектно. Еще сказали, что через пару мгновений после того, как меня накрыло, в том же месте возникла еще одна такая же волна. Вторую я не видел и не слышал, наверное, был еще оглушен первой.

Двойка предусмотрительно обогнула подальше «злое» место. Парни сказали, в том месте даже цвет воды отличается. За все время, пока мы стояли напротив «злого» места, связывались по рации с идущими за нами (еще 5 каяков), предупреждали их, ничего даже близко похожего не повторялось, и мы пошли дальше. Впрочем, никто с растянуто идущих следом каяков также ничего похожего с описанным мной на своем пути не заметил. В последующие дни похода с нами происходило еще много интересного, были и ветры, и волны, и оверкили, но ничего из природных явлений настолько же внезапного и неотвратимого, как прихлопнувшая меня волна, уже не встречалось». И далее: «Я уверен, что подобная встреченной мной волна далеко не первая на Сахалине. По моим ощущениям, её возникновение связано с местом или каким-то незамеченным мной подводным фактором, а может столкновением со скальным отражением предыдущих волн. Но то, что она радикально "выделялась" в том месте и в то время – это конечно факт». Как следует из этого описания, волна-убийца имела вид «двух сестер» и проявилась только однажды за все время наблюдений.

Настоящая работа содержит первые результаты инструментальных наблюдений аномально больших волн вблизи мыса Анива (о. Сахалин).

## Измерения

Начиная с 2009 г., Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова Сахалин (залив Анива). В 2009 г. измерения проводились на мысах залива (мыс Анива и мыс Терпенья) и в глубине залива на западном и восточном побережье (п. Новиково и п. Кириллово). В данной работе мы обсудим только данные, полученные в районе мыса Анива (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение прибора в заливе Анива

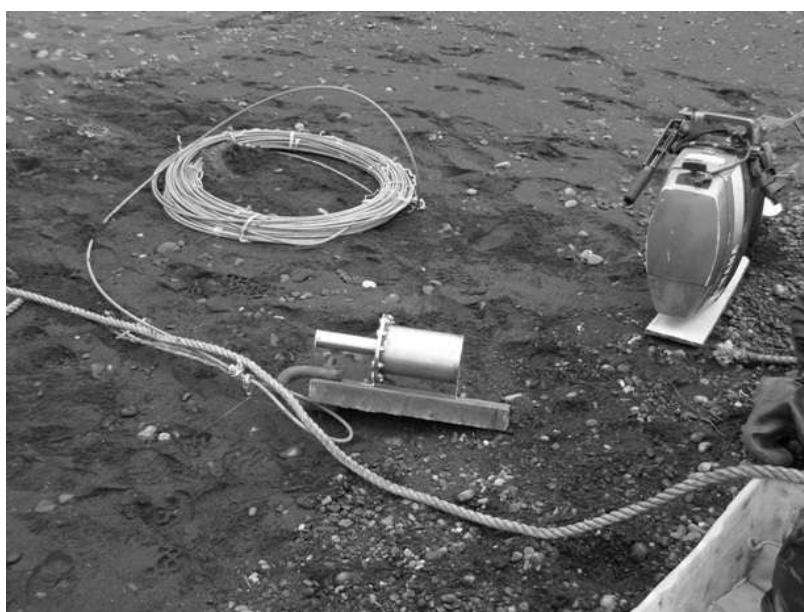


Рис. 2. Внешний вид прибора АРВ-К12

Измерения проводились с помощью автономных донных регистраторов гидростатического давления АРВ-К12, произведённых в КБ г. Углич. Прибор выполнен в корпусе из

нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму (рис. 2). В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Такой выбор не случаен: пьезорезонаторные элементы имеют малую температурную зависимость и высокую точность. Диапазон измерения давления (глубина погружения) до 100 м, точность по давлению 0,06%, диапазон рабочих температур от -4 до 40 °С. Автономность приборов составляет 6 месяцев, рабочая глубина до 100 м. Дискретность измерений 1 с. Глубина постановки прибора на мысу Анива 12 м. Из-за малой глубины ветровые волны здесь являются мелководными, и их измерение может производиться с помощью датчиков давления с использованием гидростатических формул пересчета. Эти приборы уже использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 г. и Невельского цунами 2007 г. [15, 16], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [17].

Для обработки использованы данные с прибора, полученные с мая по сентябрь 2009 г. Естественно, что данные весьма неоднородны. Это определяется метеорологическими условиями в данном районе (силой и направлением ветра, полем атмосферного давления). На волны весьма влияет оживленное судоходство. В настоящее время пока нам доступны только данные о колебаниях уровня моря с установленной станции, и сейчас трудно говорить о связи характеристик морской поверхности с волнообразующими факторами. Поэтому принята следующая методика выделения аномальных волн. Вся запись (почти полугодовая) делилась на отрезки по 20 мин, и предполагалось, что колебание уровня моря внутри 20-минутного интервала является стационарным случайным процессом. Число таких интервалов достигает 10000, обеспечивая достаточно представительную статистику.

Колебания уровня моря для каждого 20-ти минутного интервала характеризовались среднеквадратичным отклонением, вычисляемым по стандартной формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \langle z \rangle)^2}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество измерений в интервале (около 1 200);  $z_i$  – значения уровня моря, отсчитываемое от дна по гидростатической формуле для давления;  $\langle z \rangle$  – среднее значение уровня моря в 20-минутном интервале.

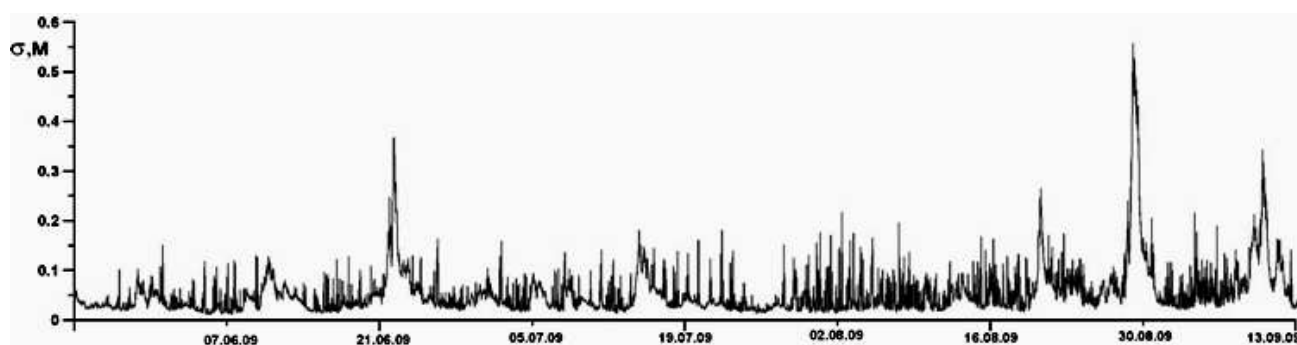


Рис. 3. Временная изменчивость вариаций колебаний уровня моря за период наблюдений

Временная изменчивость среднеквадратичного отклонения морской поверхности показана на рис. 3. Видно, что большую часть времени волнение относительно слабое (характерные высоты волн 5–10 см), однако были и большие волны (средняя высота 40 и 50 см) во время штормов в июне и августе 2009 г.

Статистический характер волнового процесса иллюстрируется вычисленными коэффициентами асимметрии и эксцесса (рис. 4):

$$Sk = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N [z_i - \langle z \rangle]^3, \quad Ku = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N [z_i - \langle z \rangle]^4, \quad (2)$$

которые обнаруживают сильную изменчивость в течение шести месяцев, однако средние значения этих коэффициентов ( $\langle Sk \rangle = -0,04$ ,  $\langle Ku \rangle = 2,8$ ) достаточно мало отличаются от «гауссовых» значений ( $Sk = 0$  и  $Ku = 3$ ), так что в целом ветровое волнение является почти гауссовым процессом. Все же отрицательные значения коэффициента асимметрии означают, что впадины в записи несколько более представительны, чем гребни, а меньшее значение коэффициента эксцесса (по сравнению с гауссовым) свидетельствует о меньшей вероятности появления аномально больших волн.

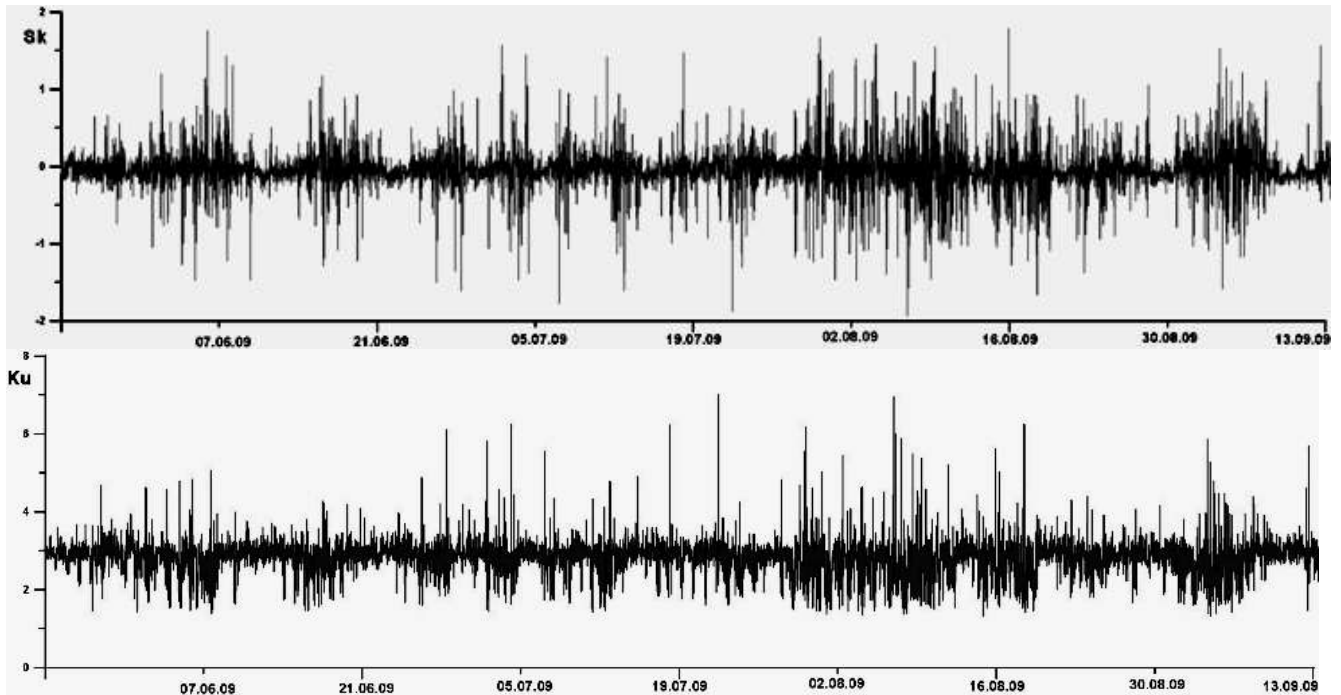


Рис. 4. Изменчивость коэффициентов асимметрии ( $Sk$ ) и эксцесса ( $Ku$ ) в период наблюдений

Как известно, значительная высота волн в случае гауссового волнения однозначно связана со среднеквадратичным отклонением. Для выделения аномальных волн по амплитудному критерию удобнее определить значительную амплитуду волнения

$$A_s = 2\sigma, \tag{3}$$

тогда аномальной волной («волной - убийцей») будет называться любая волна с амплитудой

$$A_{fr} > 2A_s = 4\sigma. \tag{4}$$

Примеры 20-минутных записей колебания уровня моря, содержащих аномальную волну, приведены на рис. 5. Даты их наблюдений сведены в табл. 1. За истекший период (шесть месяцев) наблюдалось шесть аномальных волн с превышением их амплитуды над сигмой, равной 5 или 2,5 над значительной амплитудой.

Таблица 1

Параметры аномальных волн с пятикратным превышением над средним уровнем

Дата	Время (Гринвич)	Смещение, м	$\sigma$ , м
22.06.09	19:24:36	-0.95	0.19
01.07.09	03:53:21	-0.27	0.05
24.07.09	12:55:03	0.09	0.02
14.08.09	16:40:22	-0.24	0.05
08.09.09	20:15:11	0.37	0.07
09.09.09	02:14:26	-0.72	0.14

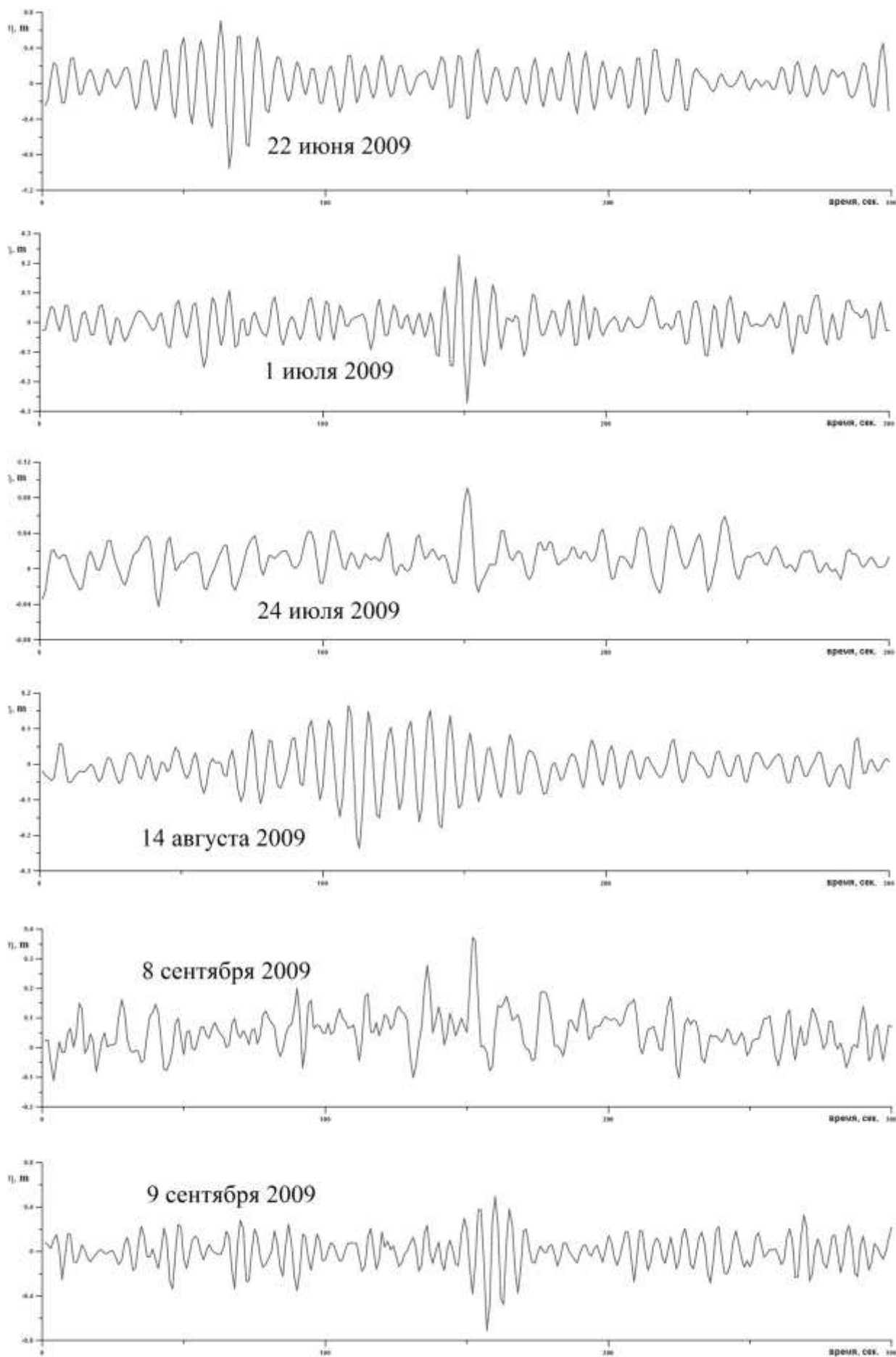


Рис. 5. Сегменты записей аномальных волн

Формы аномальных волн с превышением 2,5 над значительной амплитудой показаны на рис. 6. Ясно видно, что в двух событиях волна-убийца имела вид одиночного гребня, а в других случаях, в сущности, в виде знакопеременной волны или даже цуга волн.

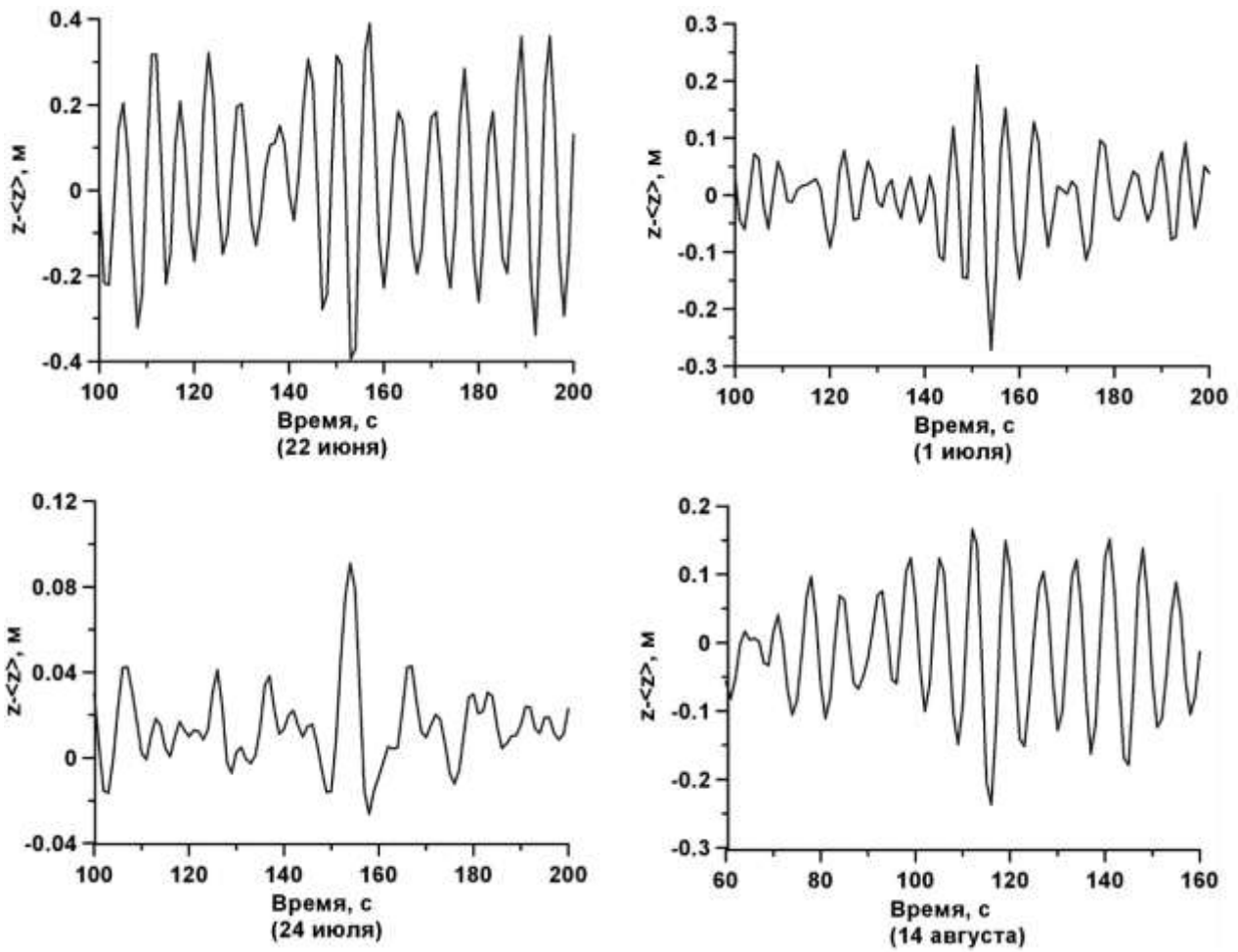


Рис. 6. Формы аномальных волн с превышением 2,5 над значительной амплитудой

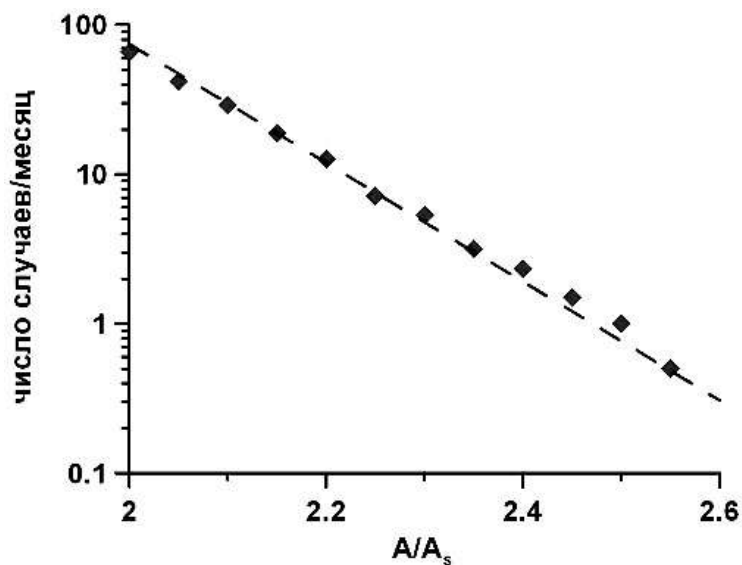


Рис. 7. Частота наблюдения волн-убийц в южной части Охотского моря



За шесть месяцев наблюдалось 394 аномальные волны, амплитуда которых удовлетворяет пороговому критерию волн-убийц ( $2A_s$ ). Рассчитанная частота превышения аномальных колебаний уровня моря (число случаев с амплитудой больше данного значения ко времени) показана на рис. 7. Как и следовало ожидать из теории экстремальной статистики [18], она хорошо описывается Пуассоновской кривой

$$\ln(N/T) = 226 - 9(A/A_s), \quad (5)$$

где  $N$  число случаев наблюдения волн с превышением  $A/A_s$  в течение времени  $T$ . Итак, волны – убийцы с двойным превышением появляются в южной части Охотского моря в среднем дважды в день, а с превышением 2,5 – один раз в месяц. Отметим, что согласно теории, основанной на представлении ветрового волнения узкополосным гауссовым случайным процессом [1, 2], волны-убийцы в среднем встречаются раз в 10 часов в заданном месте (с превышением в два раза), так что наши оценки оказываются близкими теоретическим.

### Заключение

Приведены первые данные наблюдения аномально больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря за июнь – сентябрь 2009 г., полученных с помощью донной станции (глубина постановки 12 м). За время наблюдений зарегистрировано 394 аномально больших волны, высота которых в два и более раз превышает значительную высоту волны. Из них шесть случаев, когда превышение достигает 2,5. В этих шести событиях два раза волна-убийца имела вид одиночного гребня, а в других случаях в виде знакопеременной волны или цуга волн. Частота наблюдения аномальных волн, в зависимости от их амплитуды, описывается пуассоновским распределением, как это и следует из теории экстремальной статистики. Волны-убийцы в среднем встречается в этом районе дважды в день, что близко к оценке, следующей из теории для узкополосного «гауссова» моря.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216, 11-05-92002, 09-05-00971, 11-05-90740-моб\_ст), ДВО(11-III-Д-07-010, 11-III-В-01И-002), гос. контракта № 02.740.11.0732 и МК-4378.2011.5.

### Библиографический список

1. **Kharif, Ch.** Rogue Waves in the Ocean / Ch. Kharif [et al.] // Springer, 2009. – 216 p.
2. **Куркин, А.А.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский. – Нижний Новгород, ННГУ, 2004. – 157 с.
3. **Didenkulova, I.I.** Freak Waves in 2005 / I.I. Didenkulova [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006. Vol. 6. P. 1007–1015.
4. **Kharif, C.** Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon / C. Kharif [et al.] // European J Mechanics. B – Fluid. 2003. Vol. 22. N. 6. P. 603–634.
5. **Kharif, Ch.** Freak wave phenomenon: physical mechanisms and modeling. Chapter 3. Waves in Geophysical Fluids / Ch. Kharif [et al.]; Eds. Grue J. and Trulsen K. // CISM Courses and Lectures. 2006. N. 489. P. 107–172.
6. **Nikolkina, I.** Rogue waves in 2006–2010 / I. Nikolkina [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011.
7. **Nikolkina, I.** Catalogue of rogue waves reported in media in 2006–2010 / I. Nikolkina [et al.] // Natural Hazards. 2011.
8. **Slunyaev, A.** Rogue waters / A. Slunyaev [et al.] // Contemporary Physics. 2011.
9. **Куркин, А.А.** Физика волн-убийц в океане / А.А. Куркин [и др.] // [Нелинейные волны-2004. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 37–51.
10. **Доценко, С.Ф.** Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря / С.Ф. Доценко [и др.] // Доклады НАН Украины. 2009. № 9. С. 113–117.
11. **Доценко, С.Ф.** Связь образования волн-убийц и метеорологических условий в северо-

- западной части Черного моря / С.Ф. Доценко [и др.] // Доклады НАН Украины. 2010. № 12. С. 105–109.
12. **Дивинский, Б.В.** Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование / Б.В. Дивинский [и др.] // ДАН, 2004. Т. 395. № 5. С. 690–695.
  13. **Didenkulova, I.** Shapes of freak waves in the coastal zone of the Baltic Sea (Tallinn Bay) // *Boreal Environ Res* 16(suppl A). 2011. P. 138–148.
  14. **Didenkulova, I.** Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea / I. Didenkulova [et al.] // *Nat Hazard Earth Syst Sci*. 2010. 10: 2021–2029.
  15. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев и [ др.] // Доклады Академии Наук, 2008. Т. 421. №2. С. 1–4.
  16. **Ковалёв, П.Д.** Регистрация Симуширского и Невельского цунами в порту города Холмска / Ковалёв П.Д. [и др.] // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. №5. С. 36–43.
  17. **Левин, Б.В.** Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесённой сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии Наук 2009. Т. 427. № 2. С. 1–6.
  18. **Лидбеттер, М.** Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер, Х. Ротсен, Г. Линдгрэн. – М.: Мир, 1989. – 391 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.2012*

**A. Zaitsev**<sup>1,2,3</sup>, **A. Malashenko**<sup>1</sup>, **I. Kostenko**<sup>1</sup>, **E. Pelinovsky**<sup>2,3,4</sup>, **K. Kuznetsov**<sup>5</sup>

## **FREAK WAVES REGISTRATION IN THE ANIVA BAY, OKHOTSK SEA**

Special Design Bureau for Automation of Marine Research,  
Yuzhno-Sakhalinsk<sup>1</sup>  
Institute of Applied Physics<sup>2</sup>,  
Nizhny Novgorod State Technical University R.Y. Alexeev<sup>3</sup>,  
Higher School of Economics<sup>4</sup>,  
Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk<sup>5</sup>

**Purpose:** The goal of this paper is the study the characteristics of abnormal sea waves recorded in the Aniva Bay, Okhotsk Sea.

**Design/methodology/approach:** Within last three years continuous measurements of sea level changes in the Aniva Bay are carried out by Special Research Bureau of Automation of Marine Researches of the Russian Academy of Sciences using the ground gauge of hydrostatic pressure ARV-K12 converted into the water level displacement. The analysis of wave records is performed by methods developed in the ocean engineering: each 20-min segments are considered as the stationary random process and their statistical characteristics are calculated. Individual waves with amplitudes twice more then significant wave amplitude are identified as abnormal (freak) waves. Their shapes and occurrence probability are analyzed.

**Findings:** Totally 394 abnormal waves satisfied to criterion of the freak waves are recorded for period from June to September of 2009 near Aniva cape (southern coast of Sakhalin island). In the six events wave amplitude exceeds the significant wave amplitude in 2.5 times. Probability of occurrence of abnormal waves is well fitted by the Poisson distribution.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting point for further research of the abnormal wave characteristics in various areas of the Okhotsk Sea required for ship navigation and offshore platform design.

**Originality/value:** This is the first data proven the existing of the freak waves in the Okhotsk Sea. Their characteristics are similar on average to the characteristics of abnormal waves in the World Ocean. The regional features of the freak waves have to be analyzed using the system of the distributed sensors in the Okhotsk Sea.

*Key words:* measurement data, abnormal (freak) waves, Okhotsk Sea.

УДК 537.86

Н.В. Асеева, Е.М. Громов, В.В. Тютин

## О СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА КОРОТКИХ СОЛИТОНОВ В НЕКОНСЕРВАТИВНЫХ СРЕДАХ С НЕОДНОРОДНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики

**Цель работы:** Предложен новый механизм стабилизации коротких солитонов огибающей в рамках нелинейного эволюционного уравнения Шредингера третьего порядка

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

с учетом индуцированного рассеяния Рамана  $\mu$ , кубичной нелинейности  $\alpha$ , нелинейной дисперсии  $\beta$ , линейной дисперсии третьего порядка  $\gamma$ , пространственно неоднородной линейной дисперсии второго порядка  $q(\xi)$  и потерь  $\nu$ .

**Научный подход:** Исследование проведено с использованием адиабатического приближения, при котором волновой пакет распространяется с сохранением своей формы.

**Результат:** Показано, что при потерях, не превышающих критического значения  $\nu < \nu_*$ , возможна компенса-

ция рамановского смещения пространственного спектра солитонов в длинноволновую область  $k_\mu \approx -\mu A^4 < 0$  ( $A$  – амплитуда солитона) возрастающей линейной дисперсией второго порядка, смещающей пространственный спектр солитона в коротковолновую область  $k_q = (\partial q / \partial \xi)(k - k_0)^2 > 0$ . В этом случае найден устойчивый режим распространения коротких солитонов с неизменным пространственным спектром, постоянной амплитудой и протяженностью.

**Новизна:** Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для оптических волоконных линий связи с индуцированным рассеянием Рамана, переменной дисперсией второго порядка и потерями.

*Ключевые слова:* короткие солитоны, индуцированное рассеяние Рамана, пространственная неоднородность, линейная дисперсия второго порядка, нелинейная дисперсия, потери, адиабатическое приближение.

### Введение

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

Уменьшение протяженности высокочастотных волновых пакетов приводит к необходимости учета в модельных нелинейных уравнениях членов более высокого (третьего) порядка малости, соответствующих как линейным абберационным эффектам дисперсии третьего порядка (third-order dispersion), так и нелинейным эффектам укручения (nonlinear dispersion) [7] и индуцированного рассеяния Рамана (stimulated Raman-scattering) [8]. Это приводит к нелинейному уравнению Шредингера третьего порядка [9–15] как базовому уравнению

третьего приближения теории дисперсии нелинейных волн. В пренебрежении индуцированным рассеянием, солитонное решение в этом уравнении возникает в результате баланса линейного абберационного искажения волнового импульса, обусловленного линейной дисперсией третьего порядка и нелинейных изменений, обусловленных нелинейной дисперсией. Учет индуцированного рамановского рассеяния приводит к смещению спектра волнового пакета в область малых значений и нарушает устойчивость распространения коротких солитонов.

Так, индуцированное рамановское рассеяние во временном представлении, отвечающее запаздыванию нелинейного отклика, приводит к смещению частотного спектра волнового пакета в область малых частот [8]. В [16] рассматривалась возможность компенсации этого эффекта линейными полями излучения из солитонного ядра, ускоряющими ядро и, как следствие, увеличивающими частоту солитона. Возможность компенсации эффекта рамановского рассеяния в пространственно неоднородных средах рассматривалась для сред с периодическим законом изменения дисперсии второго порядка [17], с уменьшающейся по абсолютной величине аномальной дисперсией (dispersion decreasing fiber) [18] и сред со смещающейся точкой нулевой линейной дисперсии (zero dispersion point) [19].

Индуцированное рамановское рассеяние в пространственном представлении, отвечающее нелокальности нелинейного отклика, приводит к смещению пространственного спектра волнового пакета в длинноволновую область. В тоже время пространственная неоднородность параметров среды также приводит к изменению волнового числа [20]. Так, в геометрооптическом приближении скорость изменения волнового числа пакета при движении в плавно неоднородной среде описывается хорошо известным соотношением  $\dot{k} = -\omega'_{\xi}$ , где  $\omega = \omega(k, \xi)$  – линейное дисперсионное соотношение. В частности, при пространственной неоднородности линейной дисперсии второго порядка  $q = -\omega''_{kk}$  скорость изменения волнового числа пакета пропорциональна градиенту дисперсии  $\dot{k} = q'_{\xi}(k - k_0)^2$  и при  $q'_{\xi} > 0$  волновое число пакета растет. Баланс этих эффектов может приводить к стабилизации пространственного спектра коротких волновых пакетов.

В данной работе рассмотрено распространение коротких солитонов огибающей с учетом рамановского рассеяния в пространственном представлении в неконсервативных средах с монотонно меняющейся линейной дисперсией второго порядка и с потерями. Показана возможность стабилизации пространственного спектра коротких солитонов при возрастающей дисперсии и потерях, не превышающих критического значения.

### Основное уравнение

Рассмотрим динамику высокочастотного волнового поля  $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$  малой протяженности (в несколько длин волн) и малой длительности (в несколько периодов) в рамках модельного нелинейного эволюционного уравнения Шредингера третьего порядка с плавно неоднородной линейной дисперсией второго порядка, линейными потерями и индуцированным рамановским рассеянием в пространственном представлении:

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

где  $\omega = \omega(k, |U|^2)$  – нелинейное дисперсионное соотношение;  $q = -\partial^2\omega/\partial k^2$  – коэффициент линейной дисперсии второго порядка;  $\alpha = -\partial\omega/\partial(|U|^2)$  – коэффициент кубичной нелинейности;  $\gamma = -\partial^3\omega/(\partial k^3)$  – коэффициент линейной дисперсии третьего порядка;  $\beta$  – коэффици-

ент нелинейной дисперсии;  $\mu$  – коэффициент индуцированного рассеяния Рамана;  $\nu$  – коэффициент линейных потерь.

### Изменение энергии волнового пакета

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

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = -\frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} \left( U^* \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial U^*}{\partial \xi} \right) d\xi - \nu \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi. \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части (2) отвечает изменению энергии волнового пакета, обусловленному неоднородностью линейной дисперсии второго порядка, второе – линейными потерями.

### Изменение импульса волнового пакета

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

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

Правая часть (3) описывает изменение импульса волнового пакета: первое слагаемое обусловлено индуцированным рамановским рассеянием, второе – неоднородностью дисперсии, третье – потерями. Обозначая  $U = |U| \exp(i\varphi)$ , вводя локальное волновое число пакета  $\partial\varphi/\partial\xi = k$  и полагая масштабы неоднородностей дисперсии и волнового числа много большими масштаба неоднородности огибающей пакета  $L_{q,k} \gg L_{|U|}$ , соотношения (2) и (3) примут вид

$$N \frac{dk}{dt} = -\frac{\mu}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial q}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} \left( \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi - Nk^2 \right) - \nu kN, \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = \left( \frac{\partial q}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} kN - \nu N, \quad (5)$$

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

волнового пакета. Правая часть (4) описывает изменение волнового числа пакета: первое слагаемое в правой части (4) отвечает индуцированному рамановскому рассеянию, второе – неоднородности линейной дисперсии второго порядка, третье – линейным потерям. Состоя-

ние равновесия системы (4)–(5), определяемое условиями  $\dot{k} = \dot{N} = 0$ , для волновых пакетов амплитуды  $A$  и протяженности  $\Delta$  можно оценить следующим образом:

$$\mu A_*^2 \approx (q'_\xi)_\xi (1 - \Delta^2 k_*^2) - 2\nu k_* \Delta^2, \quad (6)$$

$$(q'_\xi)_\xi k_* \approx 2\nu. \quad (7)$$

С учетом (7) соотношение (6) примет вид

$$\mu A_*^2 (q'_\xi)_\xi \approx (q'_\xi)_\xi^2 - 8\Delta^2 \nu^2. \quad (8)$$

Так, для волновых пакетов с неизменной протяженностью  $\Delta = \text{const}$  и при  $\nu > 0$  (диссипативные среды) соотношение (8) реализуется при достаточно большой величине градиента дисперсии  $|(q'_\xi)_\xi| > 2\sqrt{2}\nu\Delta$ .

Для волновых пакетов, амплитуда и протяженность которых связаны солитоноподобным соотношением  $A\Delta = 1/\varepsilon = \text{const}$ , соотношение (8) примет вид

$$\mu (q'_\xi)_\xi A_*^4 - (q'_\xi)_\xi^2 A_*^2 + 8\varepsilon^2 \nu^2 = 0.$$

Данное уравнение имеет положительные решения  $A_*^2 > 0$  как при достаточно быстро возрастающей дисперсии  $(q'_\xi)_\xi > \sqrt[3]{32\mu\varepsilon^2\nu^2} > 0$ , так и при любой убывающей  $(q'_\xi)_\xi < 0$ .

В однородных стационарных средах при  $q'_\xi = q'_t = 0$  без учета индуцированного рассеяния Рамана ( $\mu = 0$ ) и потерь ( $\nu = 0$ ) уравнение (1) имеет солитонное решение [13–14]:

$$U(\xi, t) = \frac{A}{\cosh(A\varepsilon\xi)} \exp(i\Omega t + iK\xi), \quad (9)$$

где  $A$  – амплитуда солитона;  $\varepsilon = \sqrt{\beta/\gamma}$ ;  $K = (q\beta - \alpha\gamma)/(2\beta\gamma)$  – добавочное волновое число;  $V = \frac{1}{2} \left( \beta A^2 + Kq - \frac{3}{2}\gamma K^2 \right)$  – скорость движения солитона;  $\Omega = \alpha A^2 + \frac{\alpha\gamma}{2\beta} K^2$  – добавочная частота солитона. Решение (9) существует при одинаковых знаках коэффициентов нелинейной дисперсии и линейной дисперсии третьего порядка  $\beta\gamma > 0$ . Данное решение является единственным устойчивым локализованным решением (1) в пренебрежении индуцированным рассеянием, неоднородностью дисперсии и потерями [15]. Учет индуцированного рамановского рассеяния, неоднородности среды и потерь приводит к изменению параметров солитона (9). Вначале рассмотрим динамику коротких солитонов в рамках (1) в адиабатическом приближении.

### Адиабатическое приближение

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

$$|U(\xi, t)| = \frac{A(t)}{\cosh(A(t)\varepsilon\xi)}. \quad (10)$$

В качестве примера взаимного действия эффектов индуцированного рамановского рассеяния и неоднородности дисперсии среды на динамику волновых пакетов рассмотрим в

дальнейшем среды с постоянным градиентом линейной дисперсии второго порядка  $(q'_\xi)_\xi = q' = \text{const}$ . В этом случае система (4)–(5) с учетом (10) примет вид

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{4}{15}\varepsilon^2\mu A^4 + q'\left(\frac{1}{6}\varepsilon^2 A^2 - \frac{1}{2}k^2\right) - \nu k, \quad (11)$$

$$\frac{dA}{dt} = q'kA - \nu A. \quad (12)$$

Первое слагаемое в правой части (11) приводит к уменьшению волнового числа солитона и обусловлено индуцированным рамановским рассеянием, второе приводит к изменению волнового числа, обусловленному неоднородностью линейной дисперсии второго порядка, третье обусловлено линейными потерями. Нетрудно видеть, что при однородной дисперсии ( $q' = 0$ ) система (11)–(12) имеет состояние равновесия лишь при нулевой амплитуде солитона  $A = 0$ . В этой связи ниже проанализируем систему (11)–(12) при  $q' \neq 0$ .

### Возрастающая дисперсия

При  $q' > 0$  (возрастающая дисперсия) система (11)–(12) в результате замены  $\tau = tq'/2$ , и  $a = \varepsilon^2 A^2/3$  примет вид:

$$\frac{dk}{d\tau} = -pa^2 + a - k^2 - 2\nu k, \quad (13)$$

$$\frac{da}{d\tau} = 4ka - 4\nu a, \quad (14)$$

где  $p = 24\mu/(5q'\varepsilon^2) > 0$  – параметр отношения коэффициента индуцированного рамановского рассеяния к градиенту дисперсии второго порядка;  $\nu = \nu/q'$  – параметр отношения коэффициента линейных потерь к градиенту линейной дисперсии второго порядка.

### Консервативные среды

При  $\nu = 0$  и  $p > 0$  система (13)–(14) имеет два состояния равновесия:

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} \quad \text{– седло,} \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_0 = 1/p > 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} \quad \text{– центр.} \quad (16)$$

Фазовые траектории системы (15)–(16) описываются выражением

$$\sqrt{a} \cdot k^2 + \frac{p}{5}\sqrt{a^5} - \frac{1}{3}\sqrt{a^3} = C = \sqrt{a_0} \cdot k_0^2 + \frac{p}{5}\sqrt{a_0^5} - \frac{1}{3}\sqrt{a_0^3}, \quad (17)$$

где  $a_0 = a(0)$ ,  $k_0 = k(0)$  – значения амплитуды и волнового числа солитона в начальный момент времени. На рис. 1 приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (15)–(16) при  $\nu = 0$  и  $p = 1$ . Приведены траектории, соединяющие состояния равновесия (сепаратрисы). Траектория, проходящая через начало координат (сепаратриса), описывается уравнением эллипса

$$\left(a - \frac{5}{6p}\right)^2 + \frac{5}{p}k^2 = \left(\frac{5}{6p}\right)^2. \quad (18)$$

Внутри эллипса (18) реализуются локализованные траектории. В этом случае изменение волнового числа пакета носит периодический характер: смещение волнового числа вниз по спектру, обусловленное индуцированным рамановским рассеянием, компенсируется возрастающей дисперсией второго порядка, приводящей к увеличению волнового числа солитона. Наибольший интервал значений начальных волновых чисел  $k_0$ , при которых возможны локализованные траектории из (18) составляет  $|k_0| \leq (k_0)_{\max} = \sqrt{5/(9p)}$  и реализуется при начальной амплитуде солитона  $a_0 = 5/6p$ . Наибольший интервал значений начальных амплитуд солитона для реализации локализованных траекторий достигается при  $k_0 = 0$  и составляет  $0 \leq a_0 \leq 5/3p$ .

Вне эллипса (18) реализуются нелокализованные траектории. В этом случае изменение волнового числа пакета носит непериодический характер: возрастающая линейная дисперсия второго порядка не компенсирует эффекта индуцированного рамановского рассеяния, что приводит в итоге к уменьшению волнового числа пакета.

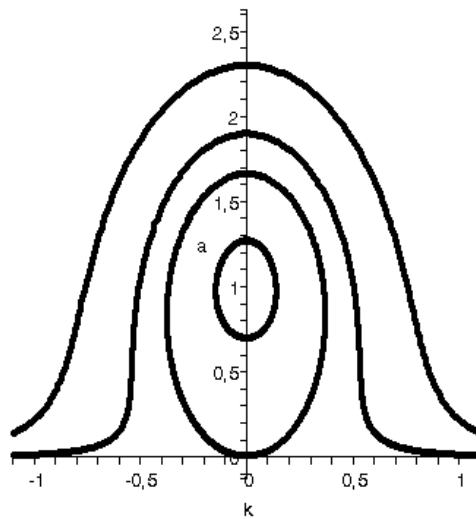


Рис. 1. Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при  $v = 0$  (консервативная среда) и  $p = 1$

### Неконсервативные среды

При  $v \neq 0$  состояния равновесия системы (13)–(14) удовлетворяют системе уравнений

$$a(1 - pa) - k(k - 2v) = 0, \tag{19}$$

$$a(k - v) = 0. \tag{20}$$

При нулевой амплитуде солитона система (19)–(20) имеет два состояния равновесия:

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} \text{ — устойчивый узел,} \tag{21}$$

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = -2v \end{cases} \text{ — седло.} \tag{22}$$

При  $12pv^2 < 1$  система (19)–(20) имеет еще два состояния равновесия при ненулевой амплитуде солитона:



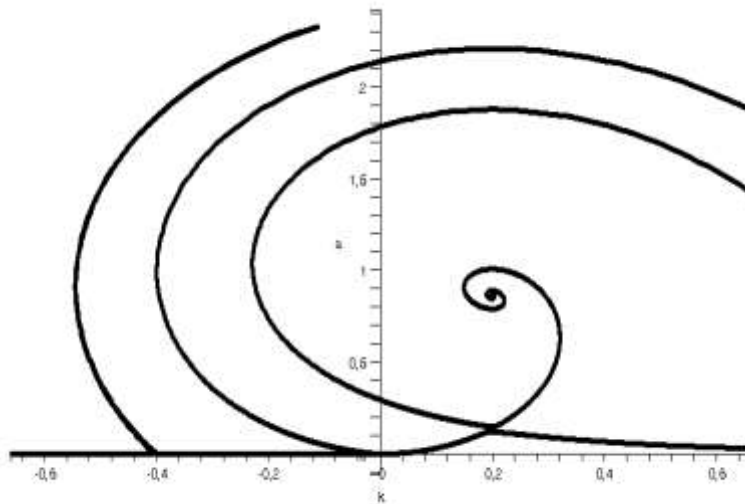
$$\begin{cases} a_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - 12pv^2}}{2p}, & \text{– седло,} \\ k_0 = v \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1 + \sqrt{1 - 12pv^2}}{2p}, \\ k_0 = v \end{cases} \quad (24)$$

Тип состояния равновесия (24) определяется величиной параметра  $pv^2$  и знаком  $v$ .

### 1. Диссипативные среды

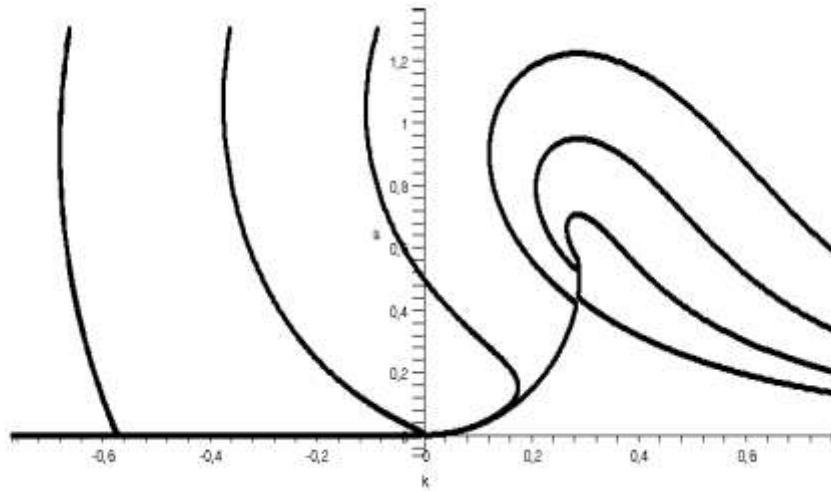
**1.1. Малые потери.** При  $v < v_1 = 2/7\sqrt{p}$  состояние равновесия (24) является устойчивым фокусом. На рис. 2 приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $v = 0,2$ , отвечающих малым потерям  $v < v_1$ . На рис. 2 приведены траектории, соединяющие состояния равновесия (сепаратрисы). В этом случае возможна компенсация индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов огибающей в неоднородно диспергирующих средах с потерями. Для такой компенсации начальные параметры солитона (амплитуда  $a_0$  и волновое число  $k_0$ ) должны лежать в области между сепаратрисами, идущими в правое седло (рис. 2).



**Рис. 2.** Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $v = 0,2$ , отвечающих малым потерям  $v < v_1$ .

Устойчивое состояние равновесия при ненулевой амплитуде солитона – фокус

**1.2. Промежуточные потери.** При  $v_1 < v < v_* = 1/2\sqrt{3p}$  состояние равновесия (24) устойчивый узел. На рис. 3 приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $v = 0,286$ , удовлетворяющих соотношению  $v_1 < v < v_*$ . В этом случае сохраняется возможность компенсации индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов в неоднородно диспергирующих средах с потерями (траектории, идущие в устойчивый узел). Для такой компенсации начальные параметры солитона (амплитуда  $a_0$  и волновое число  $k_0$ ) должны лежать в области между сепаратрисами, идущими в правое седло (рис. 3).

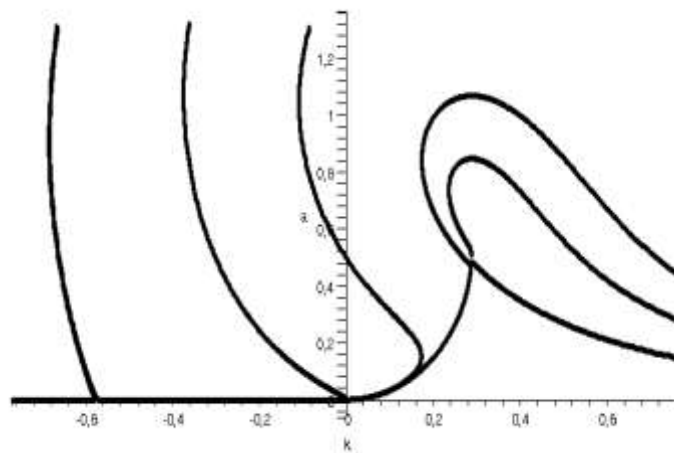


**Рис. 3.** Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $\nu = 0,286$ , отвечающих промежуточным потерям  $\nu_1 < \nu < \nu_*$ .  
Устойчивое состояние равновесия при ненулевой амплитуде солитона – узел

**1.3. Критические потери.** При критическом значении потерь  $\nu = \nu_*$  состояния равновесия (23) и (24) при ненулевой амплитуде солитона сливаются в одно

$$\begin{cases} a_0 = 1/(2p), \\ k_0 = \nu, \end{cases} \quad (25)$$

образуя устойчивый седло–узел. На рис. 4 приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $\nu = \sqrt{3}/6$ , отвечающих критическим потерям  $\nu = \nu_*$ . Это соответствует пограничному режиму, при котором еще сохраняется возможность компенсации эффекта индуцированного рамановского рассеяния в неоднородно диспергирующих средах с потерями. Для такой компенсации начальные параметры солитона (амплитуда  $a_0$  и волновое число  $k_0$ ) должны лежать в области между сепаратрисами, идущими в седло–узел (рис. 4).



**Рис. 4.** Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p = 1$  и  $\nu = \sqrt{3}/6$ , отвечающих критическим потерям  $\nu = \nu_*$ :  
два состояния равновесия сливаются, образуя устойчивый седло–узел

**1.4. Большие потери.** При потерях, превышающих критическое значение  $\nu > \nu_*$ , состояния равновесия (23) и (24) исчезают и система (13)–(14) имеет лишь два состояния равновесия (21) и (22) при нулевой амплитуде солитона. На рис. 5 приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p=1$  и  $\nu=0,4$ , отвечающих большим потерям  $\nu > \nu_*$ . В этом случае компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов огибающей в неоднородно диспергирующих средах с потерями не возможна. Волновое число солитона при больших временах стремится либо к  $-\infty$  либо к нулю при  $a \rightarrow 0$ .

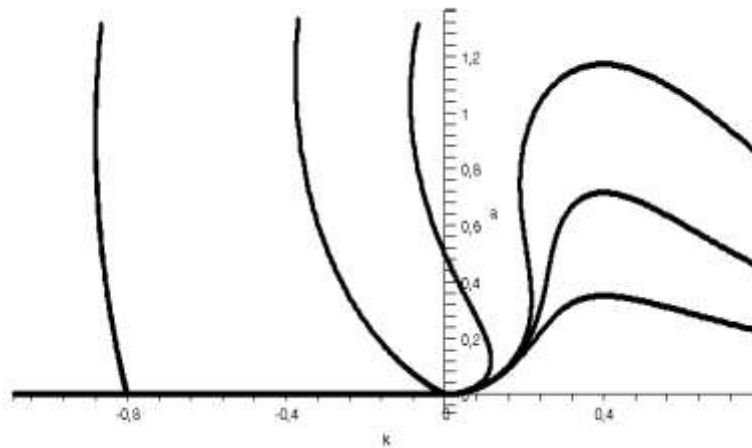


Рис. 5. Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при значениях параметров  $p=1$  и  $\nu=0,4$ , отвечающих большим потерям  $\nu > \nu_*$ .

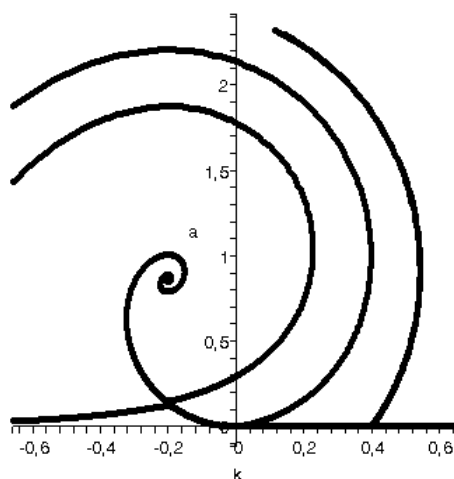


Рис. 6. Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при  $p=1$  и  $\nu=-0,2$  (активная среда). Состояния равновесия при ненулевой амплитуде солитона неустойчивы

## 2. Активные среды

При отрицательных значениях параметра  $\nu$  (активные среды) фазовые плоскости  $(a, k)$  системы (13)–(14) могут быть получены из фазовых плоскостей системы при положительных значениях  $\nu$  заменой  $k \rightarrow -k$  и изменением направления движения по фазовым траекториям на противоположное. Это следует из инвариантности системы (13)–(14) относительно одновременных преобразований  $\nu \rightarrow -\nu, k \rightarrow -k, \tau \rightarrow -\tau$ . В частности, при отрицательных значениях параметра  $\nu$  состояние равновесия (23) системы (13)–(14) – неустойчи-

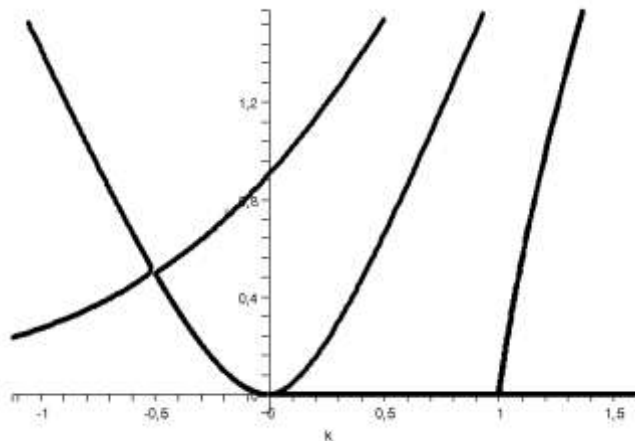
вый фокус либо неустойчивый узел. На рис. 6 в качестве примера приведена фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при  $p = 1$  и  $v = -0,2$ . При выбранных параметрах состояние равновесия (21) – неустойчивый фокус. Отсюда следует, что при распространении солитонов в активной среде с возрастающей линейной дисперсией второго порядка ( $q' > 0$ ) компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния не возможна: волновое число пакета на больших временах стремится либо к  $-\infty$ , либо к нулю при  $a \rightarrow 0$ .

### Убывающая дисперсия

При убывающей линейной дисперсии второго порядка  $q' < 0$  (в этом случае  $p < 0$ ) система (13)–(14) имеет два состояния равновесия (21) и (22) при нулевой амплитуде солитона и одно состояние равновесия при ненулевой амплитуде

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - 12pv^2}}{2p}, \\ k_0 = v, \end{cases} \quad (26)$$

которое является седлом. На рис. 7 приведена фазовая плоскость системы (13)–(14) при  $p = -1$  (убывающая дисперсия) и  $v = -0,5$ .



**Рис. 7. Фазовая плоскость  $(a, k)$  системы (13)–(14) при  $p = -1$  (убывающая дисперсия) и  $v = -0,5$ .**

**Состояние равновесия при ненулевой амплитуде солитона – седло**

При положительных значениях  $v$  фазовые плоскости  $(a, k)$  системы (13)–(14) могут быть получены из фазовых плоскостей системы при отрицательных значениях  $v$  заменой  $k \rightarrow -k$  и изменением направления движения по фазовым траекториям на противоположное. Это следует из инвариантности системы (13)–(14) относительно одновременных преобразований  $v \rightarrow -v, k \rightarrow -k, \tau \rightarrow -\tau$ . В том числе, при  $v > 0$  и  $p < 0$  состояние равновесия (26) остается седлом. Отсюда следует невозможность компенсации индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов огибающей в неконсервативных (как диссипативных, так и активных) средах с возрастающей линейной дисперсией второго порядка.

### Заключение

В данной работе рассмотрена динамика коротких солитонов огибающей в рамках уравнений Шредингера третьего порядка с учетом индуцированного рамановского рассеяния и неоднородной линейной дисперсией второго порядка. Рассмотрение проведено аналитиче-

ски с использованием адиабатического приближения, при котором волновой пакет распространяется с сохранением солитоноподобной формы. При потерях, меньших критического значения  $v \leq v^*$ , показана возможность компенсации рамановского смещения пространственного спектра солитонов в длинноволновую область возрастающей дисперсией второго порядка ( $q' > 0$ ), смещающей пространственный спектр пакета в коротковолновую область. В этом случае найден устойчивый режим распространения солитонов с постоянным волновым числом. При превышении критического значения потерь  $v^*$ , компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния невозможна. При распространении коротких солитонов огибающей в неконсервативных средах с убывающей дисперсией второго порядка стабилизация эффекта индуцированного рамановского рассеяния тоже невозможна.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проект 12-02-00436-а).

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. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang . – New York: Springer, 2001.
2. **Dickey, L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems / L.A. Dickey. – New York: World Scientific, 2005.
3. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S Kivshar, G.P. Agraval. – San Diego: Academic, 2003.
4. **Agraval G.P.** Fiber Optic Communication Systems / G.P. Agraval. – New York: Wiley, 2002.
5. **Zakharov, V.E.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / V.E. Zakharov, A.B. Shabat // Sov. Phys. JETP. 34 (1972). 62–69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. Lett. 23 (1973). 142–144.
7. **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). 4751–4755.
8. **Gordon, J.P.** Theory of the Soliton Self-frequency Shift // Opt. Lett. 11 (1986). 662–664.
9. **Kodama, Y. J.** Optical solitons in a monomode fiber // Stat. Phys. 39 (1985). 597–614.
10. **Zaspel, C.E.** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. Lett. 82 (1999). 723–726.
11. **Hong, B.** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation / B. Hong, D. Lu // Inter. Journal of Nonlinear Science 7 (2009). 360–367.
12. **Karpman, V.I.** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B 39 (2004). 341–350.
13. **Gromov, E.M.** Nonlinear Dynamics of Short Wave Trains in Dispersive Media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 110 (1996). 137; Sov. Phys. JETP. 83 (1996). 73–79.
14. **Gromov, E.M.** Short Optical Solitons in Fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 10 (2000). 551–558.
15. **Gromov, E.M.** Dynamics of wave packets in the frame of third-order nonlinear Schrödinger equation / E.M. Gromov, L.V. Piskunova, V.V. Tyutin, // Physics Letters A. 256 (1999). 153–158.
16. **Biancalama, F.** 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. E 70 (2004). 011615.
17. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultrashort solitons in high-speed communication systems. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers / R.-J. Essiambre, G.P. Agraval // Journal of the Optical Society of America B. 14 (1997). 314–322.
18. **Chernikov, S.** Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber / S. Chernikov [et al.] // Optics letters. 18 (1993). 476–478.

19. **Andrianov, A.** DDF-based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication range / A.Andrianov [et al.] // Laser Physics 17 (2007). 1296–1302.
20. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultrashort solitons in highspeed communication systems. II. Control of jitter by periodic optical phase conjugation / R.-J. Essiambre, G.P.Agrawal // Journal of the Optical Society of America B 14 (1997). 323–330.

Дата поступления  
в редакцию 25.01.2012

**N.V. Aseeva, E.M. Gromov, V.V. Tyutin**

## STABILIZATION OF SHORT SOLITON WAVE NUMBER SPECTRUM IN NON-CONSERVATIVE INHOMOGENEOUS DISPERSIVE MEDIA

National Investigate University – Higher School of Economics

**Purpose:** The new mechanism of short envelope solitons stabilization in the frame of the third-order nonlinear Schrodinger equations

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

taking into account stimulated Raman-scattering  $\mu$ , self-phase modulation  $\alpha$ , inhomogeneous second-order linear dispersion  $q(\xi)$ , third-order linear dispersion  $\gamma$ , nonlinear dispersion  $\beta$ , and losses  $\nu$  is proposed.

**Approach:** Soliton's dynamic investigated in adiabatic approximation.

**Findings:** Compensation of soliton's Raman self-wave number down shift  $\dot{k}_\mu \approx -\mu A^4 < 0$  ( $A$  – soliton's amplitude) by the increasing second-order linear dispersion giving soliton wave number up shift  $\dot{k}_q = (\partial q / \partial \xi)(k - k_0)^2 > 0$  and low losses  $\nu < \nu_*$  ( $\nu_*$  – critical losses value) is shown. The stable regime of soliton's propagation with invariable wave number spectrum, constant amplitude and length is found. The soliton is considered as a balance of stimulated Raman-scattering and increasing second-order linear dispersion. In medium with high losses ( $\nu > \nu_*$ ) or decreasing second-order linear dispersion ( $\partial q / \partial \xi < 0$ ) compensation of stimulated Raman-scattering by the inhomogeneous second-order linear dispersion is impossible. Critical losses value is found.

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

*Key words:* third-order nonlinear Schrodinger equation, stimulated Raman-scattering; inhomogeneous, second-order linear dispersion, third-order linear dispersion, nonlinear dispersion, losses, short solitons, adiabatic approximation.

УДК 551.465

Е.Г. Морозов, Т.А. Демидова, Л.В. Нечволодов

**ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ И УМЕНЬШЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА  
НАД КРУТЫМИ ПОДВОДНЫМИ СКЛОНАМИ**

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

**Цель работы:** Предложен новый механизм уменьшения толщины льда в Арктике за счет внутренних волн.**Научный подход:** Исследование основано на численной модели для расчета амплитуд внутренних волн над крутыми подводными склонами.**Результат:** Наблюдения показывают, что в морях российской Арктики образуются полыньи, и их положение приблизительно соответствует изобатам 15-30 м. Предложена модель начального уменьшения толщины ледяного покрова, который впоследствии разрушается ветровым воздействием, что приводит к формированию полыньи. Уменьшение толщины льда происходит за счет интенсификации внутренних волн, генерированных баротропным приливом.**Приложения:** Исследование дает основу для изучения механики льда и навигации в Арктике.**Новизна:** Исследование является оригинальным применением численного моделирования, которое может иметь практические приложения.*Ключевые слова:* арктические широты, численная модель, внутренние волны, подводные склоны, морской лед.**Введение**

В районе арктического побережья баротропный прилив обеспечивает генерацию внутреннего прилива, влияние которого наиболее сильно сказывается вблизи различных форм неровностей топографии. В работе [5] проведен расчет амплитуд внутренних приливов в Арктических морях России. Максимальные амплитуды обнаружены вдоль свала берегового шельфа на глубинах около 15-30 м. Расположение максимальных амплитуд внутреннего прилива в Карском море и море Лаптевых близко совпадает с положением Сибирской полыньи. Кроме того, многочисленные наблюдения показывают [1, 2], что в морях российской Арктики образуются и другие полыньи, и их положение приблизительно соответствует изобатам 15–30 м.

Как правило, делается вывод о том, что образование полыней связано с ветровыми условиями [1, 2, 3]. Мы не исключаем ветрового участия в образовании полыней, но предлагаем механизм начального уменьшения толщины ледяного покрова, который впоследствии разрушается ветровым воздействием, что приводит к формированию полыньи. Уменьшение толщины льда происходит за счет интенсификации внутренних волн, генерированных баротропным приливом. При определенной стратификации и рельефе дна возникают интенсивные вертикальные движения, связанные с внутренними волнами, которые и приводят к размыванию ледового покрова. Стратификация арктических вод такова, что в нижних слоях располагаются воды с более высокой соленостью, но зачастую с немного более высокой температурой, чем у поверхности, за счет поступления Атлантических соленых вод в подповерхностном слое. Поэтому подъем более теплых вод к ледяному покрову внутренними волнами усиливает размывание ледяного покрова.

В работе показывается, что в условиях морей российской Арктики максимальные амплитуды внутреннего прилива, а соответственно и связанных с ним вертикальных течений, приходятся на склон, где перепад глубин меняется от 15 до 30 м.

Существует основной механизм, поддерживающий существование полыней [3]. Океанское тепло в достаточном для поддержания открытой воды количестве поставляется в район полыньи за счет притока теплых вод. Образованные в результате полыньи называют по-

лыньями “явного тепла” [3]. Среди ветровых полыней скрытого тепла особое место занимает система полыней моря Лаптевых.

Система полыней моря Лаптевых представляет собой полосу открытой воды и молодых льдов, регулярно образующуюся за внешней кромкой припая. Несмотря на значительную межгодовую изменчивость гидрологических и метеорологических условий, предшествующих началу ледообразования и сопровождающих этот процесс, северная граница припая и соответственно южная граница полыней располагается вдоль изобаты 20–25 м [1, 2].

### **Влияние внутренних волн на образование полыней и численные расчеты**

Пространственное расположение полыней наводит на мысль, что в море Лаптевых существует постоянный механизм, препятствующий установлению припая над более крутыми склонами дна в районе прохождения изобат 20–25 м. Этот механизм, с одной стороны, должен быть связан с рельефом дна, а с другой – не должен сильно зависеть от изменчивой стратификации мелководной части моря Лаптевых. Процесс трансформации баротропного прилива во внутренние волны (в первом приближении), вполне отвечает предъявленным требованиям. Уменьшение толщины льда может происходить в результате подъема к поверхности более теплых и соленых вод на шельфе. Мнение о том, что существование полыней связано с деформацией баротропной приливной волны у материкового склона высказывалось в [4]. Поэтому нами была осуществлена серия численных экспериментов по проверке связи внутренних волн большой амплитуды с районом крутых подводных склонов в Арктических широтах. Расчеты производились с использованием характерных гидрологических параметров.

Ставится задача на основе полных уравнений гидродинамики, учитывающих нелинейность волнового процесса, а также турбулентный обмен, построить математическую модель генерации бароклинного прилива. Задается невозмущенное внутренними волнами поле плотности, которому соответствует распределение частоты Вьясыля-Брента  $N(z)$ .

Из открытой части моря на материковый склон набегает длинная приливная баротропная волна. Приливные течения, вызываемые этой волной, встречая на своем пути препятствие в виде материкового склона, получают вертикальные составляющие. Периодически изменяемые вертикальные составляющие течений вызывают вертикальные колебания изопикнических поверхностей, и за счет этого механизма возбуждаются внутренние волны приливного периода. Таким образом, по заданным параметрам возбуждающей волны, стратификации и рельефа решается задача расчета параметров бароклинных волновых возмущений. Расчеты по численной модели позволяют оценить амплитуду внутренних волн и потоки их энергии в непосредственной близости от района генерации.

Использована двумерная модель генерации и распространения внутренних волн в шельфовой зоне в координатах, направленных перпендикулярно к береговой черте и по глубине [6]. Внутренние волны считаются плоскими, распространяющимися перпендикулярно берегу. Принятие предположения о двумерности развивающихся волновых процессов практически не изменяет характеристик внутреннего волнового поля в районе шельфа и континентального склона, поскольку изменчивость внутренних волн в направлении, перпендикулярном берегу, обычно много сильнее, чем изменчивость вдоль береговой линии. Использование трехмерной модели потребовало бы применения мощных вычислительных средств и создания трехмерной модели.

Для перехода к трехмерному распределению свойств внутренних приливов использовался подход, который позволяет определить трехмерную картину поля возмущений на основании расчетов по двумерной модели с использованием так называемой «ленточной теории» (stripe theory). Эта теория применяется в аэродинамике для расчета обтекания самолетного крыла. Если изменения свойств явления или процесса по поперечной координате значительно меньше, чем по продольной координате, то область исследования разбивается на полосы с приблизительно одинаковыми свойствами поперек полос - лент и резко меняющимися вдоль полос. Таким образом, полосы для исследования прокладываются поперек изобат.



Расчеты выполнены по численной модели Власенко [6]. Численная модель построена на основе полных уравнений гидродинамики, учитывающих нелинейность волнового процесса, а также турбулентный обмен и диффузию плотности. Рассматривается двумерный  $(x, z)$  поток в непрерывно стратифицированном вращающемся океане переменной глубины. Для учета вращения вводится третья координата, однако изменчивость вдоль этой координаты не рассматривается. Используется правая система координат с осью  $Ox$ , направленной от берега, осью  $Oy$  – вдоль берега и осью  $Oz$  – вертикально вверх. Мы пренебрегаем градиентами глубины вдоль склона. Система уравнений движения, описывающая динамику стратифицированной жидкости на  $f$ -плоскости, сводится к уравнениям для функции тока  $\Psi$  ( $\Psi_z=U$ ,  $\Psi_x=-W$ ) и вихря  $\Omega = (\Psi_{xx} + \Psi_{zz})$ . Внутренние волны описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \Omega_t + J(\Omega, \Psi) - f V_z &= \frac{g \rho_x}{\rho_0} + K \Omega_{xx} + K(z) \Omega_{zz} + (K(z) \Psi_{zz})_z + (K(z))_z \Omega_z \\ V_t + J(V, \Psi) + f \Psi_z &= K V_{xx} + (K(z) V_z)_z \\ \rho_t + J(\rho, \Psi) + \frac{\rho_0 N^2(z)}{g} \Psi_x &= R \rho_{xx} + (R(z) \rho_z)_z + (R(z) \rho_{0z})_z \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\Omega = \Psi_{xx} + \Psi_{zz}$  – завихренность;  $\Psi$  – функция тока, ( $\Psi_z = u$ ;  $\Psi_x = -w$ ) ( $U, V, W$ ) – вектор скорости;  $N$  – частота Ваясяля-Брента;  $\rho$  – возмущение плотности за счет волнового движения;  $\rho_0$  – средняя плотность;  $f$  – параметр Кориолиса;  $J$  – якобиан;  $K(z)$ ,  $K$ ,  $R(z)$ ,  $R$  – вертикальные и горизонтальные коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии плотности;  $g$  – ускорение силы тяжести. Вместо уравнений диффузии тепла и соли и уравнения состояния используется уравнение диффузии плотности.

Мы рассматриваем только бароклинный отклик океана на воздействие баротропного прилива и принимаем условие «твердой крышки» на поверхности. Возмущения поверхности мы отождествляем с возмущениями самой верхней изолинии плотности в верхнем слое модели.

Граничными условиями на поверхности при  $z = 0$  являются:  $\rho_z = 0, \Omega = 0, \Psi = 0$ . Равенство нулю завихренности – отсутствие касательных напряжений на свободной поверхности, а равенство нулю функции тока означает отсутствие вертикальных движений жидкости при  $z = 0$ . Условие равенства нулю изменений плотности по вертикали на поверхности океана вытекает из предположения, что потоки тепла и соли через поверхность океана отсутствуют. Это условие означает пренебрежение осадками, испарением и ледообразованием для внутренневолновых процессов.

Замена граничных условий на возмущенной поверхности  $z = (x, t)$  условиями при  $z = 0$  равносильна замене набегающей приливной баротропной волны периодическим по времени и постоянным по глубине потоком жидкости или бездивергентной приливной волной. При длине набегающей приливной волны баротропного прилива, во много раз превышающей ширину подводного препятствия, такое допущение не вносит заметной погрешности в амплитуды бароклинных волн.

На дне задается отсутствие потока тепла и соли и непротекание через дно:  $z = -H(x)$ ,  $\partial \rho / \partial n = 0$ ,  $\Psi = \Psi_0 \sin \omega t$ , где  $\omega$  – приливная частота;  $n$  – нормаль к дну;  $\Psi_0$  – амплитуда потока массы в приливном течении баротропного прилива. Граничное значение завихренности на дне вычисляется при помощи уравнения  $\omega = \Delta \Psi$  с использованием значения поля  $\Psi$  на предыдущем временном шаге.

На боковых границах, расположенных далеко от неровностей топографии, волновые возмущения завихренности, функции тока и плотности предполагаются нулевыми. Расчеты прекращаются, когда волновые возмущения достигают боковых границ. Фазовая скорость

возмущений не превышает 2–3 м/с, что дает возможность вести счет достаточно большое количество шагов по времени. Расчеты начинались из состояния покоя, когда жидкость не движется и изопикны горизонтальны:

Баротропный прилив деформирует изопикнические поверхности над неровностью дна и генерирует внутренние волны, уходящие в обе стороны от источника возмущений. Если отнести боковые границы области на достаточно далекое расстояние, так чтобы передний фронт внутренней волны достигал боковых границ не раньше, чем после несколько периодов приливного цикла, то в окрестности неоднородного рельефа дна за это время установится квазипериодический режим движения, который можно интерпретировать как установившийся волновой режим колебаний.

Расчеты, проведенные по численной модели, показывают, что обычные уклоны дна, характерные для исследуемого района, могут приводить к возбуждению внутренних приливных колебаний относительно большой амплитуды над склонами.

В качестве исходных данных использовался массив глубин International Bathymetry Chart of the Arctic Ocean, (IBCAO, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>). Рельеф дна выбирался на меридиональных разрезах, расположенных примерно перпендикулярно к изобатам. Рельеф дна достаточно пологий, однако между изобатами 20 и 30 м уклон дна больше, чем на меньших и больших глубинах. Задавалось невозмущенное поле плотности через распределение частоты Брента-Вяисья. Для задания стратификации использовались данные Российско-Американского атласа Северного Ледовитого океана ([www.http://nsidc.org/data/g01961.html](http://nsidc.org/data/g01961.html)) [7]. Плотность воды у поверхности определялась температурой ( $T = -1,9^\circ$ ) и соленостью ( $S = 33,5$  епс), что соответствует плотности  $1,02697$  г/см<sup>3</sup>. На глубине 60 м плотность определялась температурой ( $T = -1,7^\circ$ ) и соленостью ( $S = 35,0$  епс), что соответствует  $1,02847$  г/см<sup>3</sup>. Перенос воды течениями баротропного прилива задавался на основании пересчета скоростей течений баротропного прилива в функцию тока. Течения баротропного прилива в четырех точках моря Лаптевых на изобате 20 м рассчитывались по данным спутниковых наблюдений TOPEX/POSEIDON из базы данных NASA в Университете штата Орегон (США). Использована глобальная обратная модель приливов TPXO.5.1 (<http://www.oce.orst.edu/po/research/tide/>) с усвоением спутниковых данных. Модель получена с помощью пакета прикладных программ OTIS (Oregon State University Tidal Inversion Software Model) [8]. По этим данным, амплитуда течений баротропного прилива составляет 9–11 см/с.

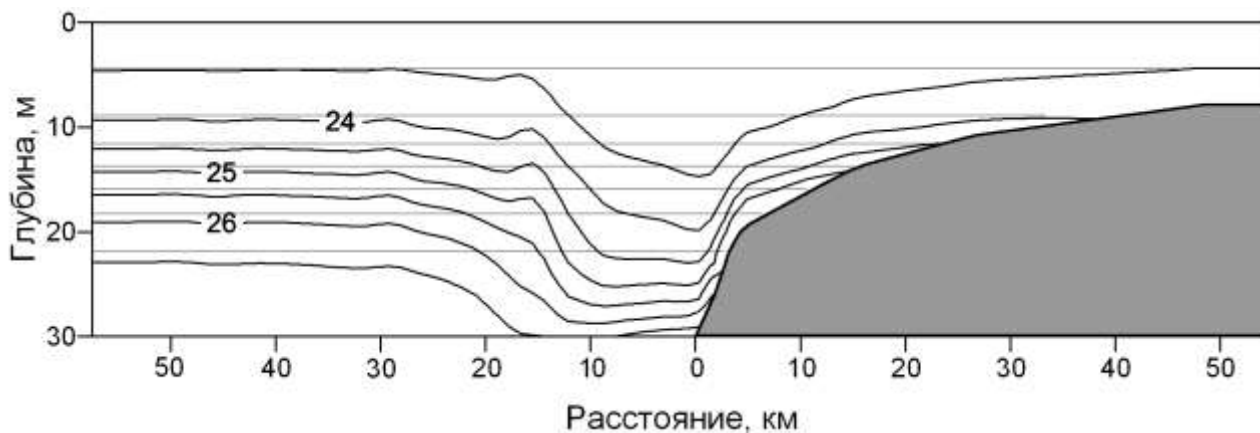
Для проведения расчетов по модели было выбрано рабочее поле протяженностью 300 км с шагом по горизонтали 125 м и 30 уровнями по вертикали. Шаг по времени равнялся 4,5 с. Коэффициенты горизонтальной вихревой вязкости и диффузии плотности задавались равными  $1,8$  м<sup>2</sup>/с, а соответствующие коэффициенты по вертикали равнялись  $0,0001$  м<sup>2</sup>/с. Для расчетов распространения внутренних волн в арктическом бассейне вблизи критической широты требуется, чтобы дисперсия вращения не подавляла нелинейность волн. В силу этого требования пришлось выбрать столь малый шаг по горизонтали.

### Обсуждение и заключение

Расчеты по модели показали, что если начинать расчеты из невозмущенного состояния океана, то для получения поля плотности, соответствующего картине развитого волнового движения, достаточно проводить вычисления в течение физического времени, соответствующего пяти-шести периодам полусуточной внутренней волны. После этого расчетное поле волны будет эволюционировать соответственно движениями, вызываемым прохождением внутренней волны над заданной топографией дна океана. При этом изменения стратификации будут вызываться внутриволновыми движениями. Таким образом, можно проследить генерацию внутренней волны над континентальным склоном.

Периодические изменения горизонтального потока за счет баротропного прилива с амплитудой скоростью около 10 см/с возбуждают внутреннюю волну. На рис. 1 показаны

изолинии плотности, соответствующие внутренним колебаниям в расчетной области. Приведены распределения плотности, соответствующие состоянию покоя и максимальному заглублению изолиний плотности над склоном.



**Рис. 1.** Изолинии плотности (от  $1,0235$  до  $1,0265$  г/см<sup>3</sup> через  $0,0005$  г/см<sup>3</sup>), соответствующие модельному расчету внутренних колебаний на склоне дна:

■ — дно океана; ——— — максимальное заглубление изопикнических поверхностей над склоном; - - - - - — состояние покоя

Согласно расчетам, амплитуда волновых колебаний на склоне близка к 10 м. Поскольку широта района исследований задавалась выше критической ( $76^\circ$ ) для внутреннего прилива M2, то есть частота вынуждающей силы меньше параметра Кориолиса, внутренняя волна с такой частотой не может развиваться в прогрессивную волну и интенсивные колебания наблюдаются только на склоне в районе генерации. Из-за интенсивных вертикальных колебаний плотности над склоном нижний слой льда размывается и становится тоньше. Вертикальные движения поднимают вверх более теплую воду. Скорость вертикальных движений оценивается 0,2 мм/с. Периодические дивергентные и конвергентные течения, вызываемые внутренними волнами над склоном, усиливают воздействие на лед. В итоге всех внешних воздействий тонкий лед получает трещины, и последующее действие ветра образует полыню.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 11-08-00076 и 10-08-01010. Авторы благодарны В.И. Власенко за возможность проводить расчеты по разработанной им численной модели и С.Ю. Ерофеевой за проведение расчетов приливных течений.

#### Библиографический список

1. Добровольский, А.Д. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. – М.: МГУ, 1982. – 192 с.
2. Гуков, А.Ю. Экосистема сибирской полыни / А.Ю. Гуков. – М.: Научный Мир, 1999. – 334 с.
3. Smith, S.D. Polynyas and Leads: An overview of physical processes and environment / S.D. Smith, R.D. Muench, C.J. Pease. – Geophys. Res. 1990. V. 95. № C6. P. 9461–9479.
4. Клепиков, В.В. Особенности гидрологии. Северный Ледовитый и Южный океаны / В.В. Клепиков, Э.И. Саруханян, Н.П. Смирнов. – Л.: Наука, 1985.
5. Морозов, Е.Г. Внутренние приливные волны в арктических морях России / Е.Г. Морозов, С.В. Писарев, С.Ю. Ерофеева // Поверхностные и внутренние волны в Арктических морях; под ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. – М.: Гидрометеоздат, 2002. С. 217–230.
6. Vlasenko, V.I. Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography / V.I. Vlasenko, K. Hutter // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. P. 1779–1793.

7. **Jakobsson, M.** New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers / M. Jakobsson [et al.] // EOS Transactions AGU. 2000. V. 81. № 9. P. 89–96.
8. **Egbert, G.D.** Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides / G.D. Egbert, S. Erofeeva // J. Atmos. Ocean Tech. 2002. V. 19. P. 183–204.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.2012*

**E.G. Morozov, T.A. Demidova, L.V. Nechvolodov**

## **INTERNAL WAVES AND THINNING OF THE ICE COVER OVER STEEP SUBMARINE SLOPES**

Institute of Oceanology n.a. P.P. Shirshov RAN

**Purpose:** The goal of the article is demonstrating a new mechanism of ice thinning caused by internal waves in the Arctic Region.

**Approach :** The research is based on the application of a numerical model to the calculations of tidal internal wave amplitudes over steep underwater slopes in the Arctic region.

**Findings:** Observations in the Russian Arctic show that polynyas are formed in the regions close to isobaths 15-30 m. We suggest a model of the initial ice thinning, which later is broken due to wind forcing. The results of calculations indicate that high amplitudes of tidal internal waves are formed over steep slopes, which can influence the ice cover and make it thinner. As a result, wind forcing leads to ice breaking and formation of polynyas.

**Implications:** This study provides grounds for further research that can be applied in the field of ice mechanics and Arctic navigation.

**Originality:** The study is an original research based on the interpretation of numerical calculation that can be applied in practical purposes.

*Key words:* Arctic latitudes, numerical model, internal waves, submarine slopes, sea ice.

# ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

## РЕКУРСИВНЫЙ АЛГОРИТМ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ С ПРИОРИТЕТНЫМ СТЕКОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описывается модернизированный метод обратной трассировки лучей, использующий стековую память объектов, пересекаемых отраженными и преломленными лучами, с учетом приоритетов замещения общих областей пространства.

*Ключевые слова:* трассировка лучей, стек, приоритет, алгоритм, рекурсия.

Настоящая работа продолжает статью [1], в которой рассматриваются вопросы компьютерного моделирования сцен с простыми и сложными оптическими эффектами визуализации, тени, отражения и преломления методом трассировки лучей (МТЛ). Во избежание повторений здесь излагается оригинальный материал с необходимыми ссылками на формулы и рисунки предыдущей работы.

Высокая реалистичность МТЛ достигается генерированием иерархии геометрических лучей, имитирующих распространение природных световых лучей в пространстве сцены. В процесс трассировки вполне органично вписывается идея *рекурсии*, согласно которой на некотором уровне *rec* алгоритм вызывает сам себя со значением  $rec + 1$  при каждом ветвлении падающего луча в точке его пересечения с ближайшим объектом сцены. При достижении тупиковой вершины дерева, соответствующей прохождению луча мимо всех объектов либо исчерпанию числа рекурсий, ветвление прекращается и происходит выход на предыдущий уровень рекурсии с возвратом либо черного цвета (при  $rec = 0$  – цвета фона), либо освещенности конечной поверхности.

Цвета, приходящие в узлы ветвления и, в конце концов, в корневую вершину дерева, суммируются до насыщения по каждой из трех цветовых компонент:  $r$ ,  $g$  и  $b$ . Полученный цветовой вектор  $\mathbf{c} = [r \ g \ b]$  определяет окраску экранного пиксела в окне вывода сцены. Совокупность таких пикселов составляет синтезированное изображение.

Рекурсивный алгоритм трассировки лучей должен решать следующие задачи:

- выводить результаты моделирования на проективную плоскость регулируемых размеров в желаемом ракурсе обзора сцены и работать с обоими типами наблюдателя – как дальним, так и ближним;
- оперировать с моделями различных геометрических объектов – плоских фигур, полиэдров и криволинейных поверхностей – и ориентировать их в пространстве сцены желаемым образом;
- находить точки пересечения лучей с ближайшими поверхностями, анализировать их свойства, определять необходимость и выполнять дальнейшее ветвление дерева трассировки до заданной глубины рекурсии отдельно для отраженного и преломленного лучей;
- обрабатывать сцены как с обособленными, так и с пересекающимися и вложенными друг в друга объектами;
- аккумулировать в каждой вершине дерева суммарную (фоновую, направленную от

неэкранированных источников света и пришедшую с отраженным и преломленным лучами) освещенность соответствующей точки ближайшей к наблюдателю поверхности с учетом затухания интенсивности лучей в зависимости от пройденного ими расстояния.

Рассмотрим последовательно способы решения перечисленных задач.

1. Совместим проективную плоскость с фронтальной плоскостью  $xу$  мировой системы координат (МСК) и зададим габариты прямоугольного проективного окна – ширину  $2X$  и высоту  $2Y$ , кратные размеру его рецептора  $d$  (рис. 1). В процессе генерирования первичных лучей  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$  координаты центров рецепторов  $\mathbf{p} = [x \ y \ 0]$  пробегает значения

$$x = \{-X, -X + d, \dots, X\}, \quad y = \{-Y, -Y + d, \dots, Y\}. \quad (1)$$

Тип близости наблюдателя зададим переменной  $nearS \in \{0, 1\}$ , определяющей формулу вычисления вектора направления проецирующего луча

$$\mathbf{V} = nearS \cdot \mathbf{p} - \mathbf{S} \quad (2)$$

и перспективные свойства изображения сцены:

- при  $nearS = 0$  строится параллельная проекция с вектором  $\mathbf{V} = -\mathbf{S}$ , постоянным для всех рецепторов;
- при  $nearS = 1$  строится центральная проекция с векторами лучей  $\mathbf{V} = \mathbf{p} - \mathbf{S}$ , исходящими из точки  $\mathbf{S}$ .

Пересчет мировых координат в экранные координаты точки  $\mathbf{p}_э = [x_э \ y_э \ 0]$  производится с помощью масштабного коэффициента  $\mu_э$  (пиксельной длины единичного отрезка) и экранных координат левого верхнего угла окна вывода  $\mathbf{p}_{лв} = [x_{лв} \ y_{лв} \ 0]$ :

$$\mathbf{p}_э = \mathbf{pM}(\mu_э, -\mu_э, 0) + [X \ Y \ 0]\mu_э + \mathbf{p}_{лв}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{M}(a, b, c)$  — матрица масштабирования по осям координат с коэффициентами  $a, b$  и  $c$  [2].

В МТЛ на каждом сканирующем первичном луче ищется точка  $\mathbf{q}$  поверхности ближайшего к наблюдателю объекта сцены. В цвет ее суммарной освещенности и окрашивается пиксел  $\mathbf{p}_э$ . В системе координат сцены (СКС)  $x_c y_c z_c$  это точка  $\mathbf{q}_c$ . Желаемое положение СКС достигается ее геометрическими преобразованиями в МСК. Например, два вращения вокруг осей  $y$  и  $x$  на углы  $\phi_y$  и  $\phi_x$  и перенос на вектор  $\mathbf{B}$  преобразуют точку  $\mathbf{q}_c$  следующим образом:

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_c \mathbf{R}_y(\phi_y) \mathbf{R}_x(\phi_x) + \mathbf{B}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{R}_\omega(\phi)$  — матрица вращения на угол  $\phi$  вокруг координатной оси  $\omega$  [2].

На рис. 2 показаны разноракурсные изображения одной и той же сцены.

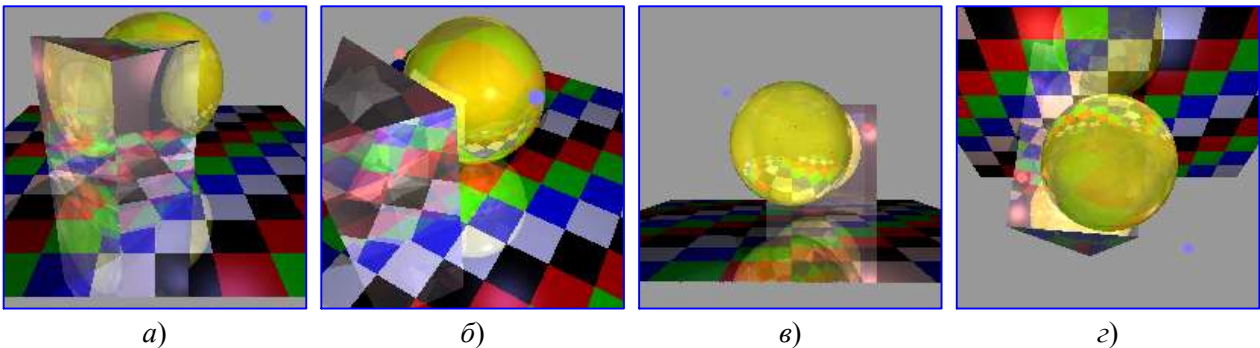


Рис. 2. Сцена в разных ракурсах:

$a$  – при  $\phi_y = 0^\circ$  и  $\phi_x = 25^\circ$ ;  $b$  – при  $\phi_y = -30^\circ$  и  $\phi_x = 45^\circ$ ;  $v$  – при  $\phi_y = 180^\circ$ ,  $\phi_x = 0^\circ$  и  $\mathbf{B} = [0 \ -r_c \ 0]$  ( $r_c$  – радиус сферы);  $z$  – при  $\phi_y = 0^\circ$ ,  $\phi_x = 150^\circ$  и  $\mathbf{B} = [0 \ r_c \ 0]$

2. Желаемое расположение в пространстве сцены отдельного объекта, заданного в своей объектной системе координат (ОСК)  $x_o y_o z_o$ , достигается геометрическими преобразо-

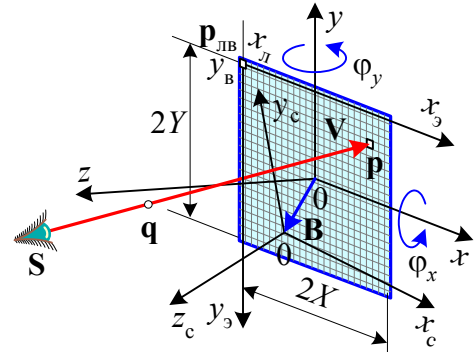


Рис. 1. Проективная плоскость

ваниями в СКС: масштабированием с коэффициентами  $m_x, m_y, m_z$ , вращениями на углы  $\psi_y, \psi_x, \psi_z$  и переносом на вектор  $\Delta$ :

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{q}_0 \mathbf{M}(m_x, m_y, m_z) \mathbf{R}_y(\psi_y) \mathbf{R}_x(\psi_x) \mathbf{R}_z(\psi_z) + \Delta. \quad (5)$$

Таким образом, последовательность преобразований (5)  $\rightarrow$  (4)  $\rightarrow$  (3) позволяет изобразить освещенность объектной точки  $\mathbf{q}_0$  в экранном пикселе  $\mathbf{p}_s$ .

Геометрия объектов, составляющих сцену на рис. 2, задается следующими моделями:

- поверхность *сферы* с радиусом  $r$  и центром в точке  $\mathbf{o}$  (рис. 3, а) описывается в СКС неявным уравнением  $f(\mathbf{q}) = 0$  с функцией  $f(\mathbf{q}) = (\mathbf{q} - \mathbf{o}) \circ (\mathbf{q} - \mathbf{o}) - r^2$  и имеет нормаль  $\mathbf{N} = \mathbf{q} - \mathbf{o}$ ;

- полиэдр треугольной *призмы* (рис. 3, б) задается в ОСК, согласно [2], списком шести вершин  $Q = \{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_6\}$  и группой списков пяти граней  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_5\}$ , где

$$\mathbf{q}_1 = [-1 \ -1 \ 0], \quad \mathbf{q}_2 = [1 \ -1 \ 1], \quad \mathbf{q}_3 = [1 \ -1 \ -1], \quad \mathbf{q}_4 = [-1 \ 1 \ 0], \quad \mathbf{q}_5 = [1 \ 1 \ 1],$$

$$\mathbf{q}_6 = [1 \ 1 \ -1];$$

$$G_1 = \{1,2,5,4,1\}, \quad G_2 = \{2,3,6,5,2\}, \quad G_3 = \{3,1,4,6,3\}, \quad G_4 = \{1,3,2,1\}, \quad G_5 = \{4,5,6,4\}.$$

Геометрические преобразования (5) применяются ко всем точкам списка  $Q$ . Вектор нормали  $i$ -й грани полиэдра находится по [2], как векторное произведение  $\mathbf{N}_i = \mathbf{v}_i \times \mathbf{w}_i$  векторов сторон грани  $\mathbf{v}_i = Q_{(G_i)_2} - Q_{(G_i)_1}$  и  $\mathbf{w}_i = Q_{(G_i)_3} - Q_{(G_i)_2}$ ;

- нормированная секция клетчатой *доски* определена в ОСК четырьмя вершинами  $\mathbf{q}_1 = [-1 \ 0 \ -1], \mathbf{q}_2 = [-1 \ 0 \ 1], \mathbf{q}_3 = [1 \ 0 \ 1], \mathbf{q}_4 = [1 \ 0 \ -1]$  и двумя числами клеток по сторонам  $k_x$  и  $k_z$  (рис. 3, в). Расширение доски по длине и ширине осуществляется соединением секций друг с другом боковыми сторонами. Желаемые размеры прямоугольной доски  $d_x = 2c_x m_x$  и  $d_z = 2c_z m_z$  задаются числами секций  $c_x, c_z$  и масштабными коэффициентами  $m_x, m_z$ , а ориентация в сцене устанавливается углами вращений  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$  и вектором переноса  $\Delta$  преобразования (5). Вектор нормали к плоскости доски вычисляется как векторное произведение  $\mathbf{N} = \mathbf{v} \times \mathbf{w}$  векторов сторон  $\mathbf{v} = \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1$  и  $\mathbf{w} = \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2$ .

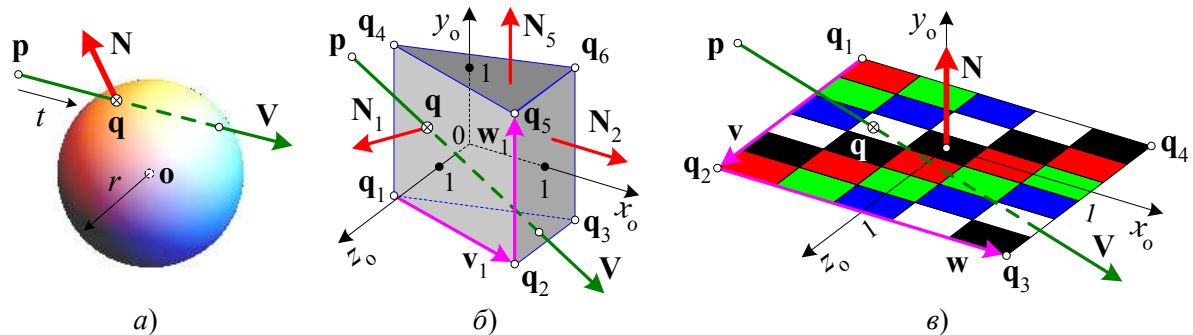


Рис. 3. Примеры объектов

3. Большая часть вычислений в МТЛ приходится на расчет пересечений световых лучей с поверхностями объектов, поэтому тщательной проработке этого вопроса уделяется самое пристальное внимание.

Прямая  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ , несущая обрабатываемый луч, может выступать в трех модификациях с соответствующим интервалом изменения параметра  $t$ :

- $mod = 0$  — прямая первичного (при  $rec = 0$ ) луча, идущего от дальнего (при  $nearS = 0$ ) наблюдателя (см. [1], рис. 1, а), с неограниченным в обе стороны параметром  $-\infty < t < \infty$ ;

- $mod = 1$  — односторонне ограниченный параметром  $t > -1$  первичный луч, идущий от ближнего наблюдателя (см. [1], рис. 1, б). В той же модификации с параметром  $t > 0$  генерируются все лучи на уровнях рекурсии  $rec > 0$ ;

- $mod = 2$  — двусторонне ограниченный неравенством  $0 < t < 1$  отрезок *теневого зонда* [3] между началом луча и точкой  $\mathbf{L}$  расположения источника света (см. [1], рис. 4, а).

Все эти варианты должны быть заложены в функциях расчета пересечения прямой  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$  с объектами сцены. В ее формальном шаблоне

$$cros*(par, \mathbf{p}, \mathbf{V}, mod, t, \mathbf{q}, \mathbf{N}), \quad (6)$$

символ \* заканчивает имена функций, разработанных для конкретных геометрических объектов. Входными аргументами являются список параметров объекта  $par$  и атрибуты прямой — точка  $\mathbf{p}$ , вектор направления  $\mathbf{V}$  и модификатор  $mod$ . Функция возвращает через имя признак пересечения  $cros^* \in \{0, 1\}$ , а при непустом результате  $cros^* = 1$  — выходные аргументы: параметр луча  $t$ , точку пересечения  $\mathbf{q} = \mathbf{p} + \mathbf{V}t$  и *нормированный* вектор нормали  $\mathbf{N}(\mathbf{q})$ .

Примером (6) может служить функция, основанная на решении квадратного уравнения  $at^2 + 2bt + c = 0$ , полученного подстановкой точки прямой  $\mathbf{q} + \mathbf{V}t$  в неявное уравнение сферы  $(\mathbf{q} - \mathbf{o}) \circ (\mathbf{q} - \mathbf{o}) - r^2 = 0$  [2].

```

☐ crosS({r,o},p,V,mod,t,q,N)
{ a = V∘V, b = V∘(p - o), c = (p - o)∘(p - o) - r2; // коэф-ты квадрат. уравнения
  d = b2 - ac; // дискриминант
  если d > 0, то ∀i=1,2 // есть пересечение
    { t =  $\frac{(-1)^i \sqrt{d} - b}{a}$ , q = p + Vt, N = (q - o) / r; // элементы пересечения
      s = {mod = 0} ∨ {mod = 1} ∧ {-(−rec) < t} ∨ {mod = 2} ∧ {0 < t < 1};
      если s ≠ 0, то возврат 1; // ближайшая точка
    }
  возврат 0; // нет пересечения
} ☐

```

Аналогично устроены функции расчета пересечения прямой со всеми  $n_{об}$  объектами сцены:  $cros2$  с плоскостью,  $cros3$  с треугольником,  $crosP$  с полигоном,  $crosH$  с полиэдром ... Имена этих функций составляют список  $cros = \{cros_1, \dots, cros_{n_{об}}\}$ . При добавлении в сцену нового  $k$ -го объекта в структуру данных добавляются новый список параметров  $par_k$  и ссылки на функцию  $cros_k$ . При удалении какого-либо объекта из сцены его параметры и ссылка на соответствующую функцию также удаляются из структуры данных.

Следующая функция перебирает объекты сцены и находит из них первый, пересекаемый по ходу луча  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ .

```

☐ cros_ray(par,pr_min,p,V,mod,t,q,N)
{ t = ∞, m = 0; // нет пересечения
  ∀i=1, n_об // перебор объектов
    { s = cros_i(par_i,p,V,mod,t',q',N'); // параметры пересечения
      если s ∧ {t' < t} ∧ {pr_i ≥ pr_min}, то m = i, t = t', q = q', N = N'; // ближайшая точка
    }
  возврат m; // номер ближайшего объекта
} ☐

```

В отсутствие пересечений луч ушел в пустоту, функция возвращает  $cros\_ray = 0$  и выходной аргумент  $t = \infty$ . Иначе возвращаются номер объекта  $m \in [1, n_{об}]$ , ближайшего к началу луча и соответствующие ему аргументы — конечный параметр луча  $t < \infty$ , точка пересечения  $\mathbf{q}$  и в ней *нормированный* вектор нормали  $\mathbf{N}$ .

Важнейшим визуальным аспектом алгоритма трассировки является анализ свойств поверхности в точке  $\mathbf{q}$ , хранящихся в списке параметров  $par_m$  и определяющих дальнейшую судьбу луча. Кроме геометрических параметров, список включает и *оптические* параметры:

- собственный цвет поверхности  $\mathbf{e}$  или список цветов  $E = \{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{n_{ц}}\}$  многоцветного объекта, например, клетчатой доски (см. рис. 3, в) или полиэдра с разноцветными гранями;
- коэффициент диффузного отражения фонового освещения  $k_{ф}$ ;
- коэффициенты диффузного  $k_{до}$  и направленного  $k_{но}$  отражений точечного источника, составляющие общий коэффициент отражения  $k_{отр} = k_{до} + k_{но}$ ;



- коэффициенты диффузного  $k_{дп}$  и направленного  $k_{нп}$  преломлений точечного источника, составляющие общий коэффициент преломления  $k_{пре} = k_{дп} + k_{нп}$ ;
- показатели диффузного рассеяния  $\nu$  и резкости бликов  $\mu$ ;
- показатель преломления материала  $n$ ;
- показатель экспоненциального затухания интенсивности света  $\lambda$  по закону Бугера

$$\delta(d) = \exp(-\lambda d) \leq 1. \quad (7)$$

Кроме геометрических и оптических свойств объектов, моделирующая программа должна располагать списком  $par_0$  параметров окружающей среды, в которой находится наблюдатель и возникают первичные лучи. Он содержит:

- собственный цвет среды  $\mathbf{e}_0 = [1 \ 1 \ 1]$ ;
- интенсивность фонового освещения  $\mathbf{I}_ф$ ;
- число источников света  $n_n$ , их интенсивности  $\mathbf{I}_1 \div \mathbf{I}_{n_n}$  и точки расположения  $\mathbf{L}_1 \div \mathbf{L}_{n_n}$ .

Для управления лампами введем флаг  $lamp$ , отключающий все источники нулем, включающий их при  $lamp \neq 0$ , а при  $lamp > 1$  выводящий изображения источников на экран;

- коэффициенты  $k_0, k_1, k_2$  ослабления интенсивности точечных источников от расстояния  $d$  по обратноквадратичной зависимости  $\kappa(d) = 1 / (k_0 + k_1 d + k_2 d^2)$ ;
- показатель преломления  $n_0$  (у воздуха  $n_{возд} \approx 1,003$ , у воды  $n_{вод} \approx 1,33$ );
- показатель  $\lambda_0$  затухания света по закону Бугера (7).

Возможность ветвления падающего луча определяется наличием у поверхности отражающих и преломляющих свойств. Для осуществления раздельного управления уровнями рекурсии, на которых прекращается генерирование отраженных и преломленных лучей, зададим максимальные уровни рекурсии  $r_{отр}$  и  $r_{пре}$ . Тогда:

- при выполнении условий  $\{k_{отр} > 0\} \wedge \{rec < r_{отр}\}$  по [2] рассчитывается направление отраженного луча  $\mathbf{M} = \mathbf{V} - 2\nu\bar{\mathbf{N}}$ , где  $\nu = \mathbf{V} \circ \bar{\mathbf{N}}$ , и запускается его трассировка на уровне рекурсии  $rec + 1$  в оптической среде падающего луча;
- при выполнении условий  $\{k_{пре} > 0\} \wedge \{rec < r_{пре}\} \wedge \{n_n |\bar{\mathbf{V}} \times \bar{\mathbf{N}}| < 1\}$  по обоснованному в [2] методу вычисляется направление преломленного луча

$$\mathbf{R} = n_n \mathbf{V} + \left( \sqrt{n_n^2 + (1 - n_n^2) |\mathbf{V}/\nu|^2} - n_n \right) \nu \bar{\mathbf{N}} \quad (8)$$

и производится его трассировка на уровне  $rec + 1$  в той среде, в которой он оказался.

Раздельное ограничение рекурсий позволяет как выборочно отключить построение отражений и/или преломлений, задав значения  $r_{отр} = 0$  и/или  $r_{пре} = 0$ , так и исследовать процесс наложения оптических эффектов путем последовательного увеличения значений  $r_{отр}$  и  $r_{пре}$ .

4. Вторым аргументом функции  $cros\_ray$  является минимальный приоритет  $pr_{min} > 0$  объектов, отбираемых для расчета пересечения с лучом. Суть и новизна в том, что сцена может содержать прозрачные *пересекающиеся* объекты, трассировка лучей в которых сталкивается с выбором показателя преломления области пространства, занятой обоими телами. Иногда (погруженные в жидкость инородные прозрачные тела, воздушные пузырьки в стекле и т. п.) интуитивно понятно, какая среда вытесняет собой другую. Но в сборных конструкциях, например, в ювелирных изделиях, выбор замещающей среды производится не из физических, а из технологических соображений путем изменения формы деталей. В компьютерном моделировании также нетрудно геометрически частично либо полностью вдвинуть прозрачные объекты друг в друга. Как же тогда без решения сложной задачи логического конструирования выбрать материал и показатель преломления области пересечения?

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

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

- при  $pr_m < pr_\sigma$  падающий луч пересекает поверхность менее приоритетного объекта и продолжает свой путь в прежнем направлении  $\mathbf{V}$  без добавления каких-либо освещенностей. В результате часть  $m$ -го объекта, погруженная в среду  $\sigma$ , становится *невидимой*;
- при  $pr_m \geq pr_\sigma$  генерируются отраженный  $\mathbf{q} + \mathbf{M}t$  и преломленный  $\mathbf{q} + \mathbf{R}t$  лучи, а к освещенностям, доставленным этими лучами, добавляются освещенности фоновым и точечными источниками света.

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

- начальное состояние  $pst = \{0\}$  соответствует зарождению первичного луча во внешней среде с показателем преломления  $n_0$ ;
- прохождение луча в среде  $m$ -го объекта с приоритетом  $pr_m < pr_\sigma$  изменяет ПСТ следующим образом:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Значения вершины стека  $\sigma$  до и  $\chi$  после его изменения используются для расчета относительного показателя преломления на поверхности раздела двух сред:

$$n_{\Pi} = n_{\sigma} / n_{\chi}. \quad (9)$$

Подробные схемы хода лучей в пересекающихся разноприоритетных объектах и результаты компьютерного моделирования МТЛ с ПСТ приведены в [1, рис. 14–17].

5. Последняя из решаемых задач состоит в расчете освещенности точки  $\mathbf{q}$  всеми возможными источниками света и передаче ее интенсивности в точку  $\mathbf{p}$  назад по лучу  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$  (рис. 4). Номер ближайшего пересеченного лучом объекта

$$m = \text{cros\_ray}(\text{par}, 1, \mathbf{p}, \mathbf{V}, \text{mod}, t, \mathbf{q}, \mathbf{N}) \in [1, n_{об}]$$

возвращает функция  $\text{cros\_ray}$  с приоритетом  $pr_{\min} = 1$ , запускающим поиск пересечений луча со *всеми* объектами сцены, и модификатором  $\text{mod} = \text{rec} \vee \text{nearS}$ .

При  $m = 0$  луч не пересек ни одного объекта и ушел в пустоту. Тогда на начальном уровне рекурсии  $\text{rec} = 0$  при значении флага  $\text{lamp} < 2$  пиксел экрана  $\mathbf{p}$ , найденный в (3), закрашивается фоновым цветом  $\mathbf{I}_\Phi$ . Однако, если задан флаг  $\text{lamp} \geq 2$  и

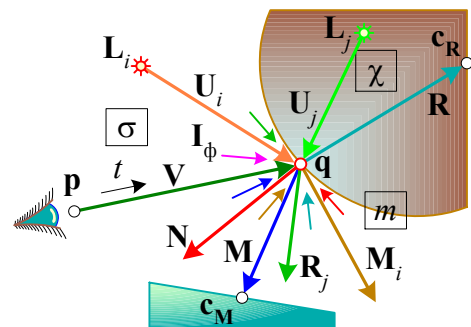


Рис. 4. Освещенность точки

ближайшей на пути луча оказалась точка источника  $\mathbf{L}_i$ , удовлетворяющая условию (3) из [1], то пиксел  $\mathbf{p}$ , закрашивается цветом  $\mathbf{I}_i$  (см. [1], рис. 5). Возврат числа  $m = 0$  на уровнях рекурсии  $rec > 0$  означает достижение тупиковой вершины дерева трассировки, не добавляющей в точку  $\mathbf{p}$  никакой освещенности.

При  $rec > 0$  и  $m \neq 0$  функция *cros\_ray* возвращает параметр  $t$ , точку  $\mathbf{q}$  пересечения падающего луча  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$  с  $m$ -м объектом и вектор нормали  $\mathbf{N}$  в этой точке. Запомнив вершину приоритетного стека  $\sigma = pst_1$ , переходим при  $pr_m \geq pr_\sigma$  к накоплению освещенности

$$\mathbf{c}_q = k_{отрm} \mathbf{c}_M + k_{отрm} \mathbf{c}_R + k_{фm} \mathbf{c}_\phi + \sum_{i=1}^{n_\pi} (k_{дом} \mathbf{c}_{доi} + k_{ном} \mathbf{c}_{ноi} + k_{дпт} \mathbf{c}_{дпи} + k_{нпт} \mathbf{c}_{нпи}) \kappa(\mathbf{U}_i) \delta_{\mathbf{U}_i}, \quad (10)$$

пришедшей в точку  $\mathbf{q}$  по каналам отражения, преломления и прямого освещения:

- освещенность  $\mathbf{c}_M$  возвращается по отраженному лучу  $\mathbf{M}$  с уровня рекурсии  $rec + 1$  при условии  $\{k_{отрm} > 0\} \wedge \{rec < r_{отр}\}$  активности эффекта отражения  $m$ -го объекта;

- освещенность  $\mathbf{c}_R$  возвращается по преломленному лучу  $\mathbf{R}$  с уровня рекурсии  $rec + 1$  при условии  $\{k_{прет} > 0\} \wedge \{rec < r_{прет}\}$  активности эффекта преломления  $m$ -го объекта. Для вычисления вектора луча по (8) нужно обновить стек, взять из его вершины номер преломленной среды  $\chi = pst_1$ , найти по (9) относительный показатель преломления  $n_\pi$  и убедиться в выполнении условия  $n_\pi |\bar{\mathbf{V}} \times \bar{\mathbf{N}}| < 1$  существования преломленного луча;

- прямая освещенность точки  $\mathbf{q}$  описывается усовершенствованной здесь моделью закраски Фонга [2, 3] и включает:

- ◇ отражение фонового освещения  $\mathbf{I}_\phi$  в среде  $\sigma$

$$\mathbf{c}_\phi = \mathbf{e}_m \mathbf{I}_\phi \mathbf{e}_\sigma |\bar{\mathbf{N}} \circ \bar{\mathbf{V}}|^{v_m},$$

возвращаемое функцией  $\mathbf{fo}(\mathbf{e}_m, \mathbf{I}_\phi \cdot \mathbf{e}_\sigma, \mathbf{N}, \mathbf{V}, v_m)$ ;

- ◇ диффузное отражение точечного источника  $\{\mathbf{L}_i, \mathbf{I}_i\}$

$$\mathbf{c}_{ддi} = \mathbf{e}_m \mathbf{I}_i |\bar{\mathbf{N}} \circ \bar{\mathbf{V}}|^{v_m} |\bar{\mathbf{N}} \circ \bar{\mathbf{U}}_i|,$$

возвращаемое функцией  $\mathbf{do}(\mathbf{e}_m, \mathbf{I}_i, \mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{U}_i, v_m)$  с падающим лучом  $\mathbf{U}_i = \mathbf{q} - \mathbf{L}_i$ ;

- ◇ направленное отражение точечного источника

$$\mathbf{c}_{ноi} = \mathbf{I}_i \left( -\bar{\mathbf{V}} \circ \bar{\mathbf{M}}_i \right)^{\mu_m},$$

возвращаемое функцией  $\mathbf{no}(\mathbf{I}_i, \mathbf{M}_i, \mathbf{V}, \mu_m)$  с отраженным лучом  $\mathbf{M}_i = \mathbf{U}_i - 2u_i \bar{\mathbf{N}}$ ,  $u_i = \mathbf{U}_i \circ \bar{\mathbf{N}}$ ;

- ◇ диффузное преломление точечного источника  $\mathbf{c}_{дпи} = \mathbf{do}(\mathbf{e}_m, \mathbf{I}_i, \mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{U}_i, v_m)$ ;

- ◇ направленное преломление точечного источника  $\mathbf{c}_{нпи} = \mathbf{no}(\mathbf{I}_i, \mathbf{R}_i, \mathbf{V}, \mu_m)$  с преломленным лучом

$$\mathbf{R}_i = n_\pi^{-1} \mathbf{U}_i + \left( \sqrt{n_\pi^{-2} + (1 - n_\pi^{-2}) |\mathbf{U}_i / u_i|^2} - n_\pi^{-1} \right) u_i \bar{\mathbf{N}}.$$

Все компоненты прямой освещенности, кроме фоновой, вычисляются при активном флаге  $lamp > 0$  и прямой видимости точки  $\mathbf{L}_i$  из точки  $\mathbf{q}$ , т. е. в отсутствие пересечений отрезка  $\mathbf{qL}_i$  с любым объектом, чей приоритет не меньше приоритета среды распространения луча  $\mathbf{q} - \mathbf{U}_i$ . Возложим проверку этого события на тест прямой видимости точки  $\mathbf{L}$  из точки  $\mathbf{q}$  в  $k$ -й среде:

$$vid(\mathbf{q}, \mathbf{L}, k) = cros\_ray(par, pr_k, \mathbf{q}, \mathbf{L} - \mathbf{q}, 2, t', \mathbf{q}', \mathbf{N}'). \quad (11)$$

В отсутствие пересечений отрезка  $\mathbf{qL}$  тест возвращает нулевое значение, сигнализирующее, что источник  $\mathbf{L}$  не загорожен от точки  $\mathbf{q}$ , никаким объектом, имеющим приоритет, не меньший  $pr_k$ . Наоборот, при  $vid \neq 0$  прямой луч источника не попадает в точку  $\mathbf{q}$  и в ней будет наблюдаться пониженная освещенность, т. е. тень. Таким образом, с помощью функции (11) реализуется глобальная модель освещенности.

Отраженные компоненты  $\mathbf{c}_{\text{доi}}$  и  $\mathbf{c}_{\text{ноi}}$  существуют при наличии у  $m$ -го объекта отражательных свойств и расположении всего отрезка  $\mathbf{qL}_i$  в той же среде  $\sigma$ , где находится точка  $\mathbf{p}$ :

$$\{k_{\text{отр}m} > 0\} \wedge \{vu_i > 0\} \wedge \{\text{vid}(\mathbf{q}, \mathbf{L}_i, \sigma) = 0\}. \quad (12)$$

Преломленные компоненты  $\mathbf{c}_{\text{дпi}}$  и  $\mathbf{c}_{\text{нпi}}$  вычисляются при наличии у  $m$ -го объекта преломляющих свойств, расположении всего отрезка  $\mathbf{qL}_i$  в преломленной среде  $\chi$  и условии существования преломленного луча  $\mathbf{R}_i$ :

$$\{k_{\text{прет}m} > 0\} \wedge \{vu_i < 0\} \wedge \{\text{vid}(\mathbf{q}, \mathbf{L}_i, \chi) = 0\} \wedge \{n_{\text{п}}^{-1} |\overline{\mathbf{U}}_i \times \overline{\mathbf{N}}| < 1\}. \quad (13)$$

В (12) и (13) использован индикатор  $vu_i = (\mathbf{V} \circ \overline{\mathbf{N}})(\mathbf{U}_i \circ \overline{\mathbf{N}})$  ориентации векторов  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{U}_i$  относительно касательной плоскости в точке  $\mathbf{q}$ . Он положителен для источников  $\mathbf{L}_i$ , видимых из точки  $\mathbf{p}$  отраженными, и отрицателен для источников, видимых преломленными.

Для повышения гибкости управления потерями энергии лучей при их распространении в оптических средах введем в алгоритм следующие элементы:

- флаг затухания  $zat \in \{0, 1\}$ , позволяющий переключать эффект затухания света;
- функцию относительного затухания интенсивности луча

$$\delta(\mathbf{V}, \lambda) = \text{if}(zat: \exp(-\lambda|\mathbf{V}|), 1),$$

совпадающую при  $zat = 1$  с законом рассеяния Бугера (7) и возвращающую единицу при  $zat = 0$ . С ее помощью составим коэффициент относительного затухания падающего луча  $\mathbf{V}$  от точки его испускания до точки  $\mathbf{q}$ :

$$\delta_{\mathbf{v}} = \text{if}(\text{rec}: \delta(\mathbf{q} - \mathbf{p}, \lambda_{\sigma}), \text{if}(\text{nearS}: \delta(\mathbf{q} - \mathbf{S}, \lambda_0), 1)).$$

Разберем порядок его вычисления:

- на нулевом уровне рекурсии  $\text{rec} = 0$  первичный луч проходит во внешней среде с показателем затухания  $\lambda_0$ . В сцене с ближним наблюдателем ( $\text{nearS} = 1$ ) относительное затухание  $\delta_{\mathbf{v}} = \delta(\mathbf{q} - \mathbf{S}, \lambda_0)$  определяется расстоянием между точками  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{q}$ . Удаление наблюдателя в бесконечность приводит к полному затуханию энергии луча и *теоретическому* значению  $\delta_{\mathbf{v}} = 0$ . Во избежание сплошной темноты примем в этом случае субъективное решение  $\delta_{\mathbf{v}} = 1$ , т. е. **отсутствие затухания первичных лучей в сцене с дальним наблюдателем**;

- на последующих уровнях рекурсии затухание вторичного луча, проходящего от точки  $\mathbf{p}$  до точки  $\mathbf{q}$ , определяется длиной вектора  $\mathbf{q} - \mathbf{p}$  и показателем затухания в  $\sigma$ -й среде  $\lambda_{\sigma}$ .

Множитель  $\delta_{\mathbf{v}} < 1$  используется при  $zat = 1$  для уменьшения двух величин:

- суммарной освещенности (10) точки  $\mathbf{q}$ , доходящей до точки  $\mathbf{p}$ :

$$\mathbf{c}_{\mathbf{p}} = \mathbf{c}_{\mathbf{q}} \cdot \delta_{\mathbf{v}}.$$

Визуально это создает эффект воздушной перспективы (см. [1], рис. 6);

- длины вектора направления луча по формуле

$$\mathbf{V} = \mathbf{V} \cdot \delta_{\mathbf{v}},$$

что позволяет завершить его трассировку по *условию затухания*  $|\mathbf{V}| \leq d_{\text{min}}$ , где  $d_{\text{min}}$  – заданный *порог затухания* энергии луча, например,  $d_{\text{min}} = 0.1$ . Для придания порогу относительного характера **нужно нормировать все векторы направлений первичных лучей**.

Учет рассеяния световой энергии луча точечного источника с вектором направления  $\mathbf{U}_i$  моделируется с помощью коэффициента  $\delta_{\mathbf{U}_i} = \delta(\mathbf{U}_i, \lambda_{\sigma}) \leq 1$ , который при  $zat = 1$  уменьшает интенсивность луча  $\mathbf{I}_i$  на пути длиной  $|\mathbf{U}_i|$  в среде  $\sigma$ . При  $zat = 0$  эффект затухания отключен.

Настало, наконец, время скомпоновать отдельные разработанные в [1] и данной статье элементы алгоритма в единую рекурсивную функцию  $\mathbf{ray}(\text{rec}, \mathbf{p}, \mathbf{V}, \text{pst})$  обратной трассировки луча  $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$  на уровне рекурсии  $\text{rec}$  с приоритетным стеком трассировки  $\text{pst}$  (рис. 5).

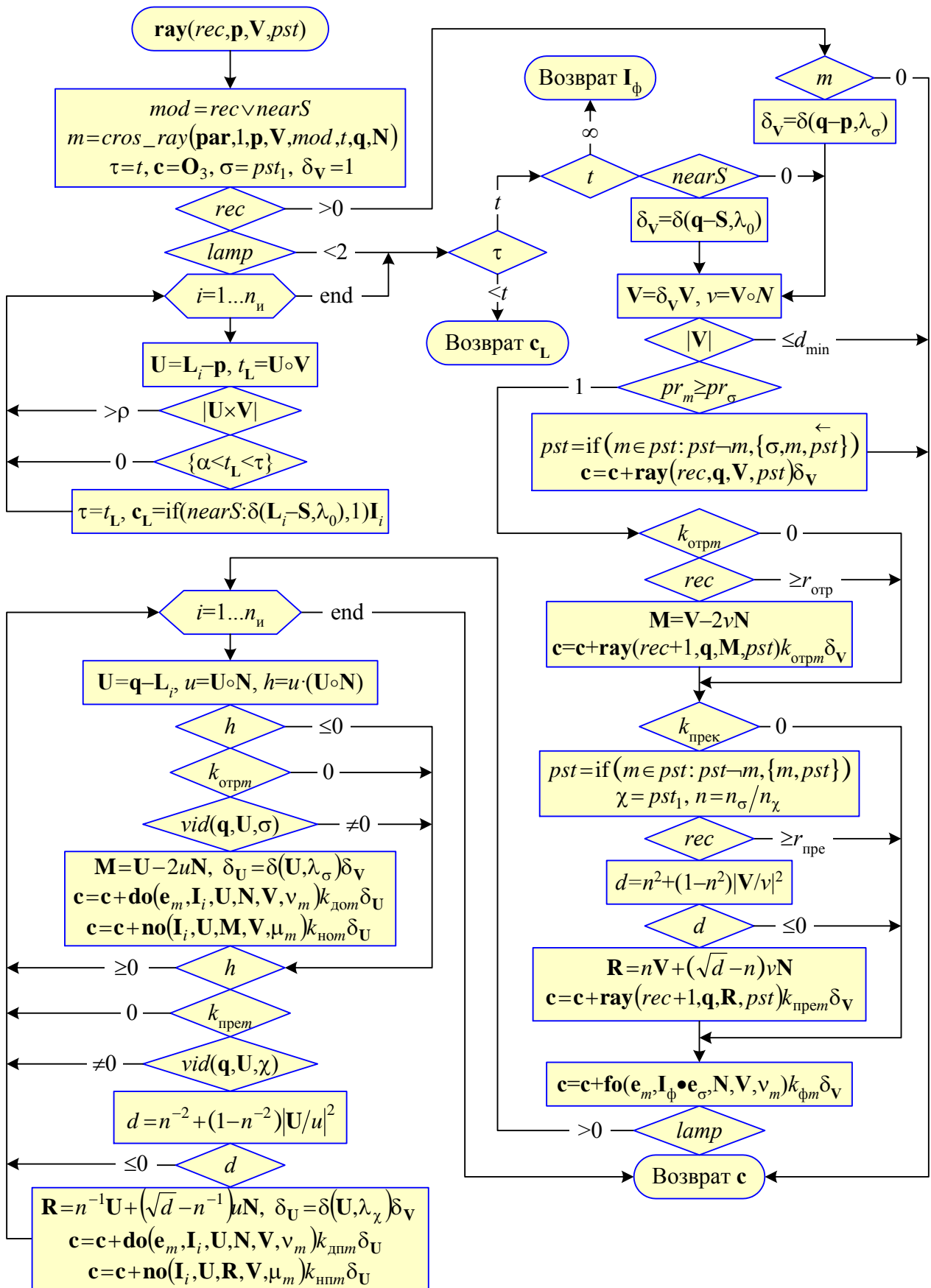


Рис. 5. Блок-схема функции трассировки лучей

Вызов функции в форме  $\mathbf{c} = \mathbf{ray}(0, \mathbf{p}, \mathbf{V}, \{0\})$  производится в циклах (1) сканирования рецепторов проективной плоскости  $\mathbf{p} = [x \ y \ 0]$  (см. рис. 1). Для каждого из них по (2) вычисляется и *нормируется* вектор направления первичного обратного луча  $\mathbf{V} = \overline{\mathbf{nearS} \cdot \mathbf{p} - \mathbf{S}}$ , задаются начальные значения уровня рекурсии  $rec = 0$  и приоритетного стека трассировки  $pst = \{0\}$ . Возвращенный функцией вектор цвета окраски рецептора  $\mathbf{c} = [c_r \ c_g \ c_b]$  подвергается покомпонентному ограничению  $c_\omega = \min\{c_\omega, 1\} \ \forall \omega \in \{r, g, b\}$ , преобразованию в вектор  $[r \ g \ b]$  желаемой  $\{n_r, n_g, n_b\}$ -разрядной цветовой палитры и выводу в экранный пиксел (3).

Исчерпывающие иллюстрации работы описанного здесь рекурсивного метода трассировки лучей приведены в [1].

### Обозначения

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

$\overline{\mathbf{V}} = \mathbf{V}/|\mathbf{V}|$  — нормированный вектор  $\mathbf{V}$  единичной длины.

$\mathbf{V} \circ \mathbf{W}$  — скалярное произведение векторов  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{W}$ .

$\mathbf{V} \times \mathbf{W}$  — векторное произведение векторов  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{W}$ .

$\mathbf{V} \bullet \mathbf{W}$  — поэлементное произведение векторов  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{W}$ .

$\underline{x} = \max\{x, 0\}$  — неотрицательное усечение числа  $x$ .

### Библиографический список

1. **Никулин, Е.А.** Компьютерное моделирование оптических эффектов // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е.Алексеева; НГТУ. – Н. Новгород. 2011.
2. **Никулин, Е.А.** Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: учеб. пособие для вузов / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург. 2005. – 560 с.
3. **Роджерс, Д.** Алгоритмические основы машинной графики / Д. Роджерс. – М.: Мир. 1989. – 512 с.

Дата поступления  
в редакцию 20.01.2011

**Е.А. Nikulin**

### RECURSIVE RAYTRACING ALGORITHM WITH PRIORITY STACK

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

Describes an improved reverse raytracing method which utilises a stack-organized memory containing objects pierced by reflected and refracted rays regarding object intersection area processing priority.

*Key words:* raytracing, stack, priority, algorithm, recursion.

УДК 519.25

Э.С. Соколова, А.И. Пашковский

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ГРАФ-МОДЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Проведен анализ требований, предъявляемых к программному обеспечению автоматизации построения граф-моделей, предложены структуры данных для решения задач обработки граф-моделей.

*Ключевые слова:* граф-модель, архитектурный компонент, списочная структура данных, хеш-набор.

### Введение

В настоящее время в качестве математических моделей при решении прикладных задач в различных областях науки и техники широко используются граф-модели и их матричные представления. Разнообразное применение графов связано с тем, что они применимы для представления любой информации, которую можно промоделировать в виде объектов и связей между объектами. Само программирование нельзя представить себе без разработки и использования аппарата граф-моделей и теоретико-графовых алгоритмов - выполнение программы представляет собой процесс обработки данных, определяемый графом по управлению или графом потока данных. Методы теории графов используются для исследования структуры программы, определения ее параметров, верификации, организации хранения и поиска данных, распределения памяти и решения других вопросов, возникающих в прикладном и системном программировании [1]. Таким образом, графы являются основной конструкцией для программиста.

Преимущества представления сложных структур и процессов графами становятся еще более ощутимыми при наличии хороших средств их визуализации. Поэтому неслучайно в последнее время в мире растет интерес к методам и системам автоматизации построения графов и граф-моделей. Многие программные системы, особенно те, которые используют информационные модели, включают элементы визуальной обработки граф-моделей объектов. Среди них — системы и окружения программирования, системы принятия решения, системы автоматизации проектирования и многие другие.

Графы являются существенным элементом математических моделей в самых разнообразных областях науки и практики. Они помогают наглядно представить взаимоотношения между объектами или событиями в сложных системах. В этом случае алгоритмические задачи часто формулируются как задачи, так или иначе связанные с графами, когда требуется построить граф с заданными свойствами, провести его анализ, выделить часть графа, удовлетворяющую некоторым требованиям, модифицировать граф в соответствии с требованиями.

В настоящее время разработано большое количество программ, библиотек и специализированных пакетов для автоматизации построения графов (крупнейшие из них – graphviz от AT&T Labs, MSAGL от Microsoft, yFiles от yWorks). Однако существующие разработки недостаточно функциональны, узко направлены, не имеют возможности расширения для применения их к ряду технических задач. Кроме того, часть программных продуктов закрыты и имеют высокую стоимость.

Изложенное позволяет сделать вывод, что проблема разработки структур данных и алгоритмов для автоматизации построения граф-моделей, обладающих свойствами расширения, добавления новых функциональностей, адаптации к изменяющимся условиям в настоящий момент весьма актуальна.

### Постановка задачи

В работе решается задача создания и оптимизации структур данных для реализации алгоритмов обработки и визуализации граф-моделей, хранящих информацию о топологии и характеристиках элементов объекта исследования. Структура данных должна легко адаптироваться к решению прикладных задач, т.е. виду и характеристикам вершин и дуг граф-модели.

При разработке структур данных, хранящих информацию о графе, и автоматизации алгоритмов их обработки в виде пакета прикладных программ сформулируем следующие требования:

- 1) возможность расширения функциональности программного пакета;
- 2) эффективность при обработке графов больших размеров (обработки больших объемов информации);
- 3) возможность применения для решения технических задач, в которых объекты представляются граф-моделями с набором характеристик вершин и дуг.

Выполнение этих требований значительно расширяет границы использования данных представлений граф-моделей реальных процессов.

### Архитектура модели программного приложения

Исходя из требования расширяемости выбран модульный принцип построения модели программного средства. В основу его архитектуры положено три модуля – модель, представление и контроллер (рис. 1).

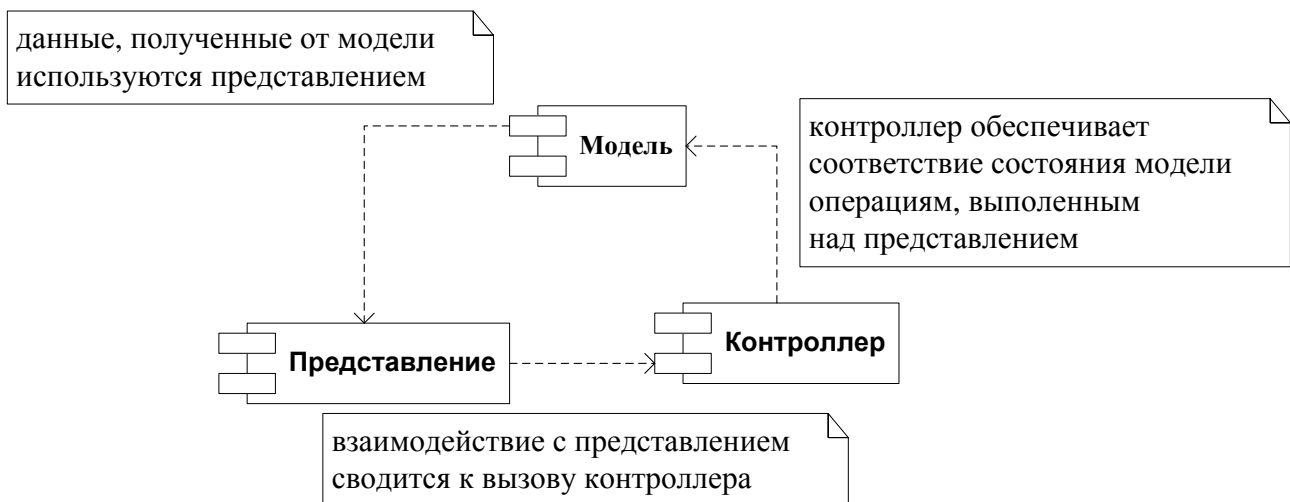


Рис. 1. Схема взаимодействия между компонентами архитектуры

Компонент модели хранит текущее состояние графа и включает в себя алгоритмы, изменяющие состояние модели. Когда происходит изменение состояния модели, компонент уведомляет другие компоненты о случившемся изменении. Компонент контроллер обеспечивает соответствие состояния модели операциям, выполненным над представлением. Интерфейсный компонент контроллер обрабатывает пользовательский ввод и производит изменение внутреннего состояния модели посредством ее интерфейсных методов. Представление использует данные модели. Интерфейсный компонент представление обеспечивает визуализацию текущего состояния графа.

Цель применения такого подхода к построению архитектуры приложения – облегчить создание дополнительных модулей и обеспечить возможность оптимизации алгоритмов автоматизации построения графов и интерфейсных компонентов независимо друг от друга. Кроме того, в результате применения такой архитектуры, легко сделать структуры данных и



алгоритмы переносимыми между различными системами, например, для использования в мобильных версиях необходимо реализовать только интерфейсные алгоритмы компонентов контроллер и представление, оставив без изменений остальные алгоритмы и структуры данных.

Для того, чтобы создание новых компонентов не приводило к необходимости изменений в модели, явные связи между моделью и интерфейсными компонентами были заменены неявными. Явная связь, представляющая собой вызов интерфейсного метода, оставлена лишь между компонентами контроллера и модели. Неявная связь представляет собой реализацию модели широковещательной рассылки сообщений – обмена сообщениями издатель-подписчик. Такая архитектура имеет следующие характеристики:

- подписчик подписывается на определенные уведомления;
- издатель публикует свое сообщение. Его получают все подписчики этой темы;
- получатель должен работать и должен быть подписан в момент отправки сообщения.

В роли издателя выступает компонент модель, в роли подписчиков – интерфейсные компоненты. Модель оповещает все компоненты, подписанные на получение сообщений каждый раз, когда происходит изменение внутреннего состояния. Таким образом, для создания нового компонента, использующего данные модели, необходимо знать лишь ее интерфейс.

Типичная схема взаимодействия компонентов архитектуры выглядит следующим образом:

1) контроллер перехватывает событие извне и в соответствии с заложенной в него логикой, реагирует на это событие, изменяя модель посредством вызова интерфейсного метода модели;

2) после изменения модель уведомляет всех подписчиков о произошедшем изменении;

3) компоненты, подписанные на получение уведомлений от модели, получив сообщение, обрабатывают его согласно заложенной в них логике.

### **Выбор структуры данных для хранения свойств граф-модели**

Актуально требование эффективности при обработке больших граф-моделей, особенно в автоматизированных системах решения технических задач в режиме реального времени, когда критична не только память, но и время обработки данных с целью своевременной реализации управляющих воздействий.

Большое влияние на производительность алгоритмов построения, обработки и корректировки граф-моделей имеет их внутреннее представление. Оптимальным с точки зрения представления граф-модели, ее обработки и хранения является список смежности. Он представляет собой структуру данных, которая для каждой вершины графа хранит список смежных с ней вершин. Список представляет собой массив указателей,  $i$ -й элемент которого содержит указатель на список вершин, смежных с  $i$ -й вершиной. Этот способ является достаточно эффективным и удобным при решении многих задач из-за компактного хранения данных, где исключено хранение нулевых элементов.

Однако такое представление граф-модели не является оптимальным в алгоритмах, направленных на работу со структурой графа, так как обработка списочных структур большого размера требует затрат времени. Кроме того, исходя из требований решаемой нами задачи, как будет показано далее, ребро графа должно существовать как отдельная сущность, и использование списка смежности потребовало бы хранения в отдельной структуре ребер, что приводит к дублированию данных и дополнительным накладным расходам памяти. По этой причине предлагается оптимальная с точки зрения выдвинутых требований реализация представления граф-модели – в виде двух отдельных структур, хранящих информацию о вершинах и ребрах графа.

Так как алгоритмы обработки граф-моделей реализуют большое число операций доступа к вершинам графа, остается требование минимизации временных затрат на обращение к элементам вершин графа.

В результате проведенного анализа и сравнения различных структур данных с точки зрения времени доступа к элементу структуры и памяти, затрачиваемой на хранение элемента структуры, был выбран хеш-набор для хранения вершин графа. Такая структура хранит неповторяющиеся элементы данных, поиск и выборка элементов происходят по значению хеш-функции, что позволяет минимизировать время выборки элемента и сделать его независимым от размерности множества. Хеш-функция вычисляется на основе идентификационного номера вершины, причем алгоритм создания вершины обеспечивает уникальность идентификационного номера. Следует отметить, что в хеш-наборе изменение размера контейнера происходит не каждый раз при добавлении нового элемента. Память выделяется при достижении отношения наполнения меньше единицы. Это значит, что как только хеш-набор заполнен на фиксированный процент, происходит увеличение его емкости. Таким образом, распределение памяти происходит не каждый раз при добавлении нового элемента, что существенно снижает временные затраты при работе с хеш-набором. Блок-схема алгоритма обработки структуры, хранящей вершины графа, представлена на рис. 2.

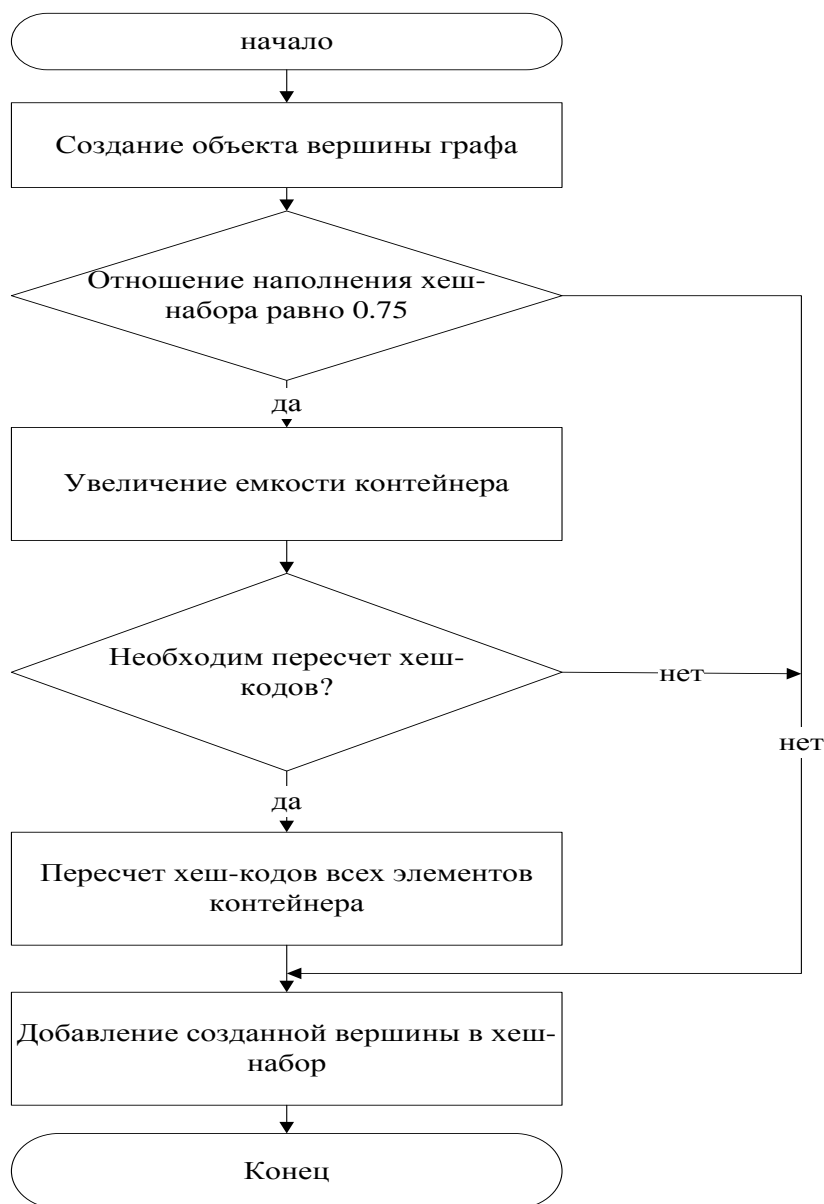


Рис. 2. Алгоритм обработки набора вершин графа

Если в результате увеличения емкости контейнера текущее значение идентификаци-

онного номера, на основании которого происходит распределение хеш-кодов, достигает максимально возможного, необходимо произвести пересчет хеш-функций для всех вершин графа. Выбор такой структуры данных для хранения вершин графа позволяет уменьшить время доступа к элементу графа в среднем на 20% по сравнению с использованием списочных структур данных.

Для хранения ребер графа организована структура список. Время доступа к элементу такой структуры описывается функцией  $O(1)$ , то есть линейно зависит от размерности, и добавление элемента или удаление его также требует временных затрат, оцениваемых функцией  $O(1)$ . Структура списка позволяет хранить повторяющиеся элементы, что дает возможность оперировать мульти-графами. Для связанных графов список позволяет экономить память, так как элемент структуры занимает мало места.

Моделирование показало, что выбор описанных структур данных для хранения граф-модели обеспечивает заметный выигрыш в скорости обработки данных и используемой памяти.



Рис. 3. Алгоритм создания элемента графа

### Расширение функциональности модели

Для обеспечения широкой области применения разработанных алгоритмов автоматизации построения граф-моделей реализована возможность добавления свойств элементам графа – его вершинам и дугам. Данная функциональность в сочетании с обширной областью применения граф-моделей обеспечивает множество задач, решение которых можно облегчить с помощью представленного проекта. Гибкость модели при ее адаптации к прикладным задачам решается с помощью такой структуры данных, как хеш-таблица. Хеш-таблицы обеспечивают уникальность добавляемого свойства посредством применения хэш-кода и

дают максимально возможную скорость выборки, не зависящую от размерности структуры данных. Структура данных для реализации дополнительных свойств представляет собой две глобальные хеш-таблицы, которые хранят информацию о свойствах, добавленных к вершинам и ребрам графа. В такой хеш-таблице ключ рассчитывается на основе имени свойства, а значение принимает тип добавленного свойства. С каждым элементом графа ассоциируется локальная хеш-таблица свойств. Она хранит значения добавленных свойств, уникальных для каждой вершины или ребра. В этом случае хеш-функция рассчитывается на основе названия свойства, а значение содержит заданную величину. Алгоритм добавления свойства включает в себя редактирование глобальной хеш-таблицы и синхронизацию с локальными хеш-таблицами элементов графа. При добавлении нового элемента графа происходит создание локальной хеш-таблицы и ее инициализация согласно глобальной таблице. Блок схема алгоритма, представленного на рис. 3, описывает алгоритм добавления нового ребра в модель и соответствующие действия по обновлению хеш-таблиц.

Таким образом, разработанная архитектура модели и предложенные структуры данных решают задачу гибкости, адаптации и широкой применимости разработанных алгоритмов автоматизации построения граф-моделей.

#### Библиографический список

1. **Соколова, Э.С.** Построение автотрассировочного графа для тестирования вычислительных алгоритмов / Э.С. Соколова, Д.В. Дмитриев // Системы управления и информационные технологии. №1 (31). – Москва-Воронеж, 2008. С. 47–51.
2. **Вирт, Н.** Алгоритмы и структуры данных / Н. Вирт. – СПб.: Невский Диалект, 2008. – 352 с.
3. Алгоритмы: Построение и анализ / Т.Х. Кормен [и др.]. – М.: Вильямс, 1990. – 893 с.
4. **Ахо, А.** Структуры данных и алгоритмы / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М.: Вильямс, 2000. – 384 с.

*Дата поступления  
в редакцию 20.01.2011*

**E.S. Sokolova, A.I. Pashkovskiy**

#### OPTIMIZATION OF DATA STRUCTURES FOR GRAPH MODEL STORING AND PROCESSING

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The article analyzes the requirements for graph models build automation software and proposes data structures for solving the problems of graph models processing.

*Key words:* graph model, architectural component, list data structure, hash set.

УДК 681.518.54

С.Н. Капанов, О.П. Тимофеева

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАТРАТ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ ПО КРИТЕРИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ДО- СТИЖИМОСТИ ГРАФ-МОДЕЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается влияние топологии граф-модели исследуемого объекта на мощность множества диагностической информации для контроля и диагностики состояний.

*Ключевые слова:* диагностика, контролепригодность, коэффициент глубины поиска, коэффициент достижимости

Методы контроля и диагностирования технических состояний разрабатываются и закладываются на этапе проектирования объекта и поддерживаются при его эксплуатации. Контролепригодность характеризует приспособленность объекта к проведению контроля заданными методами и средствами технического диагностирования. Обеспечение приспособленности конструкций к проведению проверок методами и средствами контроля связано с дополнительными затратами. Решение задачи оптимизации контролепригодности, привязанное к имеющейся структуре объекта, на практике часто приводит к невозможности реализации полученного решения из-за больших затрат.

В то же время процедура проектирования технического объекта некоторого класса включает решение задач синтеза его конструкции, синтеза параметров и структуры объекта. При проектировании и разработке структуры объекта с учетом требований по надежности решаются задачи оптимизации состава его элементов, объединения элементов в конструктивно законченные блоки, выбор архитектуры и способов резервирования, а также закладываются требования по контролепригодности.

В общем виде это решение задачи минимизации множества назначаемых точек контроля с целью сокращения затрат, связанных с установлением дополнительных датчиков, нормализаторов сигналов, коммутаторов, устройств обработки сигналов и т.д., а также сокращение объемов передаваемой и хранимой информации, необходимой для определения оценки состояния технического объекта, если элементы данного объекта сильно разнесены в пространстве (например, газотранспортных сетей).

При условии возможности синтеза структуры проектируемого объекта необходимо провести исследования влияния топологии его структуры на затраты, связанные с обеспечением свойств контролепригодности.

В работе предлагается метод анализа затрат на контролепригодность объектов, структуру которых можно представить граф-моделью.

Для решения задачи обеспечения контролепригодности технический объект представляется двузначной логической моделью или графом причинно-следственных связей, вершины которого соответствуют возможным дефектам, дуги – связям между ними.

Пусть  $G = (V, A)$  – ориентированный упорядоченный граф без контуров и петель, где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество вершин графа,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\} = \{(v_i, v_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}\}$  – множество дуг графа.

Обозначим  $V^{in} = \{v_1^{in}, v_2^{in}, \dots, v_m^{in}\}$  – множество входных вершин графа  $G$ ,  $V^{out} = \{v_1^{out}, v_2^{out}, \dots, v_p^{out}\}$  – множество выходных вершин графа  $G$ .

При решении задач синтеза контролепригодных объектов в качестве целевой функции  $Q$  используются значение коэффициента глубины поиска  $\hat{E}_{\bar{A}\bar{I}}$  ( $0 \leq \hat{E}_{\bar{A}\bar{I}} \leq 1$ ) или время восстановления  $T_g$ , зависящее от глубины диагностирования. Эти параметры вычисляются по матрице эквивалентных дефектов  $U$  [2], т.е. зависят от её вида:

$$Q = f_Q(U), \quad (1)$$

Матрица  $U$  состоит из строк, являющихся строками матрицы достижимости  $D$  с номерами, соответствующими входным вершинам графа, и столбцов матрицы достижимости  $D$  с номерами, соответствующими выходным вершинам графа. Таким образом, получаем, что матрица эквивалентных дефектов  $U$  есть функция, зависящая от трёх величин:

$$U = f_U(D, V^{in}, Z^{out} = Z \cup V^{out}), \quad (2)$$

где  $D$  – матрица достижимости исследуемого графа;  $V^{in}$  – множество входных вершин исследуемого графа, на которые подаются диагностические воздействия;  $Z^{out}$  – множество диагностических параметров, включающее множество исходных точек съёма информации  $V^{out}$  и множество назначаемых точек контроля  $Z$ .

Учитывая (2), выражение (1) примет вид

$$Q = f_Q(f_U(D, V^{in}, Z^{out})) = f_Q(D, V^{in}, Z^{out}), \quad (3)$$

т.е. критерий оптимальности определяется значением матрицы достижимости, множеством входов, на которые подаются диагностические сигналы, и множеством точек съёма диагностической информации.

В качестве критерия оптимальности был выбран коэффициент глубины поиска.

При решении задачи синтеза контролепригодных объектов ведётся поиск минимального множества  $Z$  диагностических параметров, которое зависит от требуемого значения  $\hat{E}_{\bar{A}\bar{I}}$  и числа вершин граф-модели. Но для различных структур графов при числе вершин, равном  $n$ , она может значительно варьироваться.

Для определения зависимости между структурой исследуемого объекта и минимально необходимым числом контрольных точек было проведено численное моделирование. При этом априорно заданными величинами являются: число вершин граф-модели, множество входных вершин графа исследуемого объекта и значения  $\hat{E}_{\bar{A}\bar{I}}$ . В качестве переменной, варьируемой вычислительной программой, выступает матрица достижимости  $D$ . Матрица достижимости строится по матрице смежности, являющейся эквивалентом графа. Но матрица достижимости не является математическим эквивалентом структуры рассматриваемого объекта. Это означает, что различным графам может соответствовать одна матрица достижимости, но различным матрицам достижимости всегда соответствуют различные графы.

Значение  $\hat{E}_{\bar{A}\bar{I}}$  вычисляется по матрице эквивалентных дефектов. Особенность вычисления данного коэффициента заключается в том, что он будет иметь тем большую величину, чем больше в матрице  $U$  несовпадающих между собой столбцов. Данное разнообразие напрямую зависит от соотношения долей ненулевых и нулевых элементов матрицы  $U$ . Если доли нулевых и ненулевых элементов в матрице  $U$  будут примерно одинаковы, то вероятность различимости всех столбцов матрицы эквивалентных дефектов будет достаточно высока, т.е. близка к 1. При увеличении одной доли и соответственно уменьшении другой, возрастает вероятность наличия в матрице  $U$  совпадающих столбцов. При этом не важно, доминирование какой доли элементов будет происходить в матрице эквивалентных дефектов. Исходя из того, что матрица  $U$  строится по матрице  $D$ , вид матрицы эквивалентных дефектов будет напрямую зависеть от вида матрицы достижимости, множеств входных и выходных вершин графа (3). Следовательно, чем больше отличаются доли нулевых и ненулевых элементов в матрице  $D$ , тем больше множество контрольных точек необходимо назначить для обеспечения различимости дефектов.

Введём для классификации топологии структур исследуемых графов коэффициент достижимости вида

$$K_D = \frac{k}{\frac{n^2 - n}{2}}, \quad (4)$$

где  $n$  – размерность матрицы  $D$ ;  $\frac{n^2 - n}{2}$  – общее число элементов в матрице  $D$  выше главной диагонали;  $k$  – число ненулевых элементов в матрице  $D$  выше главной диагонали. Отметим, что речь идёт об упорядоченных ориентированных графах, для которых матрица  $D$  имеет верхний правый треугольный вид.

Данный коэффициент определяет долю заполнения матрицы  $D$  ненулевыми элементами выше главной диагонали и является величиной, противоположной разреженности матрицы. Чем больше разрежена матрица  $D$ , тем меньше значение  $K_D$ .

При исследовании топологии граф – модели с целью выделения путей, дающих диагностическую информацию, отметим следующую особенность. Пусть путь от некоторого входа  $v_1^i$  к некоторому выходу  $v_{ki}^i$  соответствует упорядоченному множеству вершин графа  $M_i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_{ki}^i\}$ , где  $v_1^i$  – вершина, принадлежащая множеству входных вершин графа;  $v_{ki}^i$  – вершина, принадлежащая множеству его выходных вершин.

Тогда, если существует два пути  $M_i$  и  $M_j$ , и множество вершин пути  $M_j$  принадлежит множеству вершин пути  $M_i$ , то путь  $M_j$  не даёт никакой диагностической информации.

Таким образом, если в графе добавляется новая дуга от вершины  $v_i$  к вершине  $v_j$ , которая принадлежит хотя бы одному уже существующему пути (существует маршрут от  $v_i$  к  $v_j$ ), то эта дуга не изменит вида матрицы достижимости  $D$  и соответственно значения коэффициента достижимости  $K_D$ .

Рассмотрим граф - модель, имеющую один вход и один выход. Минимальное значение  $K_D$  будет соответствовать графу, имеющему в матрице достижимости минимальное число ненулевых элементов:

$$K_D = \frac{(n-2)_{in} + (n-2)_{out}}{\frac{n^2 - n}{2}}, \quad (5)$$

где  $(n-2)_{in}$  – количество ненулевых элементов в первой строке (из первой вершины существуют переходы во все вершины, кроме первой и последней);  $(n-2)_{out}$  – количество ненулевых элементов в последнем столбце (нет захода в последнюю вершину из первой вершины и из последней). Тогда минимальное значение  $\hat{E}_{\hat{\lambda}}$  для модели, имеющей один вход и один

выход, будет равно  $K_D = \frac{4(n-2)}{n(n-1)} \approx \frac{4}{n}$ . При увеличении числа вершин графа минимальное значение  $K_D$  будет уменьшаться и стремиться к 0.

При приближении структуры графа к параллельному виду, показанному на рис. 1, а, когда все вершины связаны с входом и выходом и не связаны между собой, значение  $K_D$  будет уменьшаться и число назначаемых контрольных точек для обеспечения различимости дефектов будет увеличиваться и стремиться к  $n$ . Очевидно, что в этом случае для различимости дефектов следует использовать в качестве диагностических параметров выходы всех вершин графа.

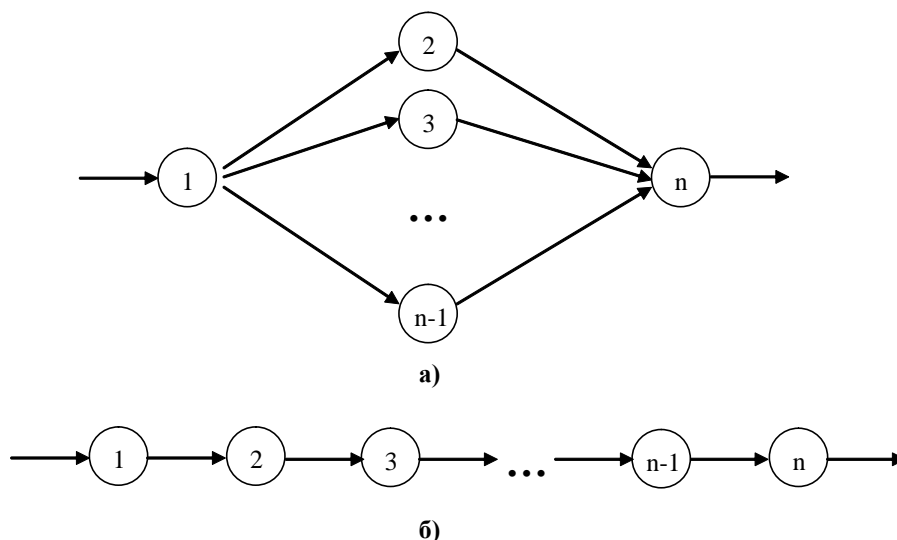


Рис. 1. Параллельная (а) и последовательная (б) структуры графа

Максимальное значение  $K_D$  будет соответствовать графу, имеющему в матрице достижимости максимальное число ненулевых элементов:

$$K_D = \frac{\frac{n^2 - n}{2}}{n^2 - n} = 1. \quad (6)$$

При приближении структуры графа к линейной структуре (рис. 1, б) значение  $K_D$  будет увеличиваться и стремиться к 1, при этом, как и в случае уменьшения значения  $K_D$ , число назначаемых контрольных точек для обеспечения различимости дефектов будет увеличиваться и стремиться к  $n$ . В этом случае для различимости дефектов следует использовать в качестве диагностических параметров выходы всех вершин граф-модели.

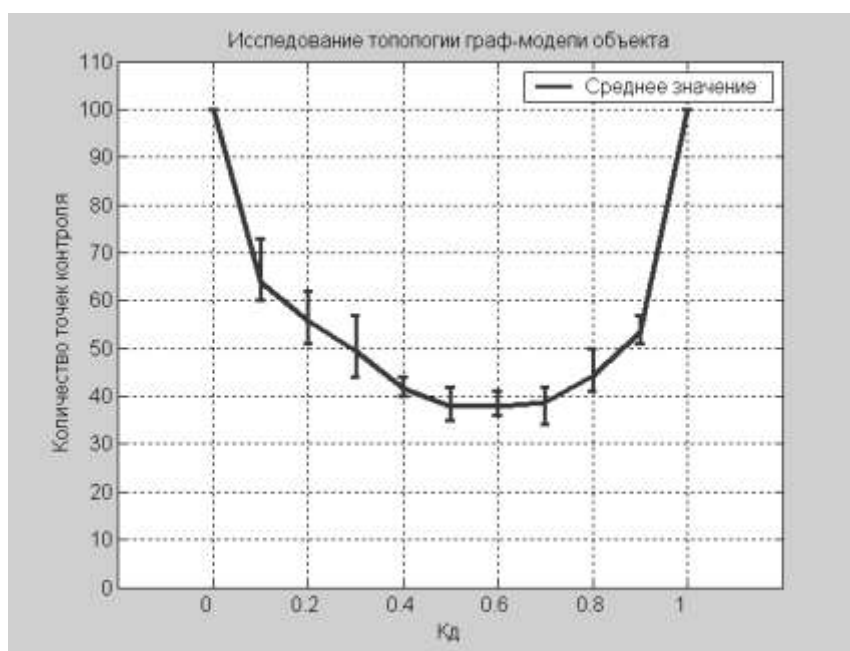
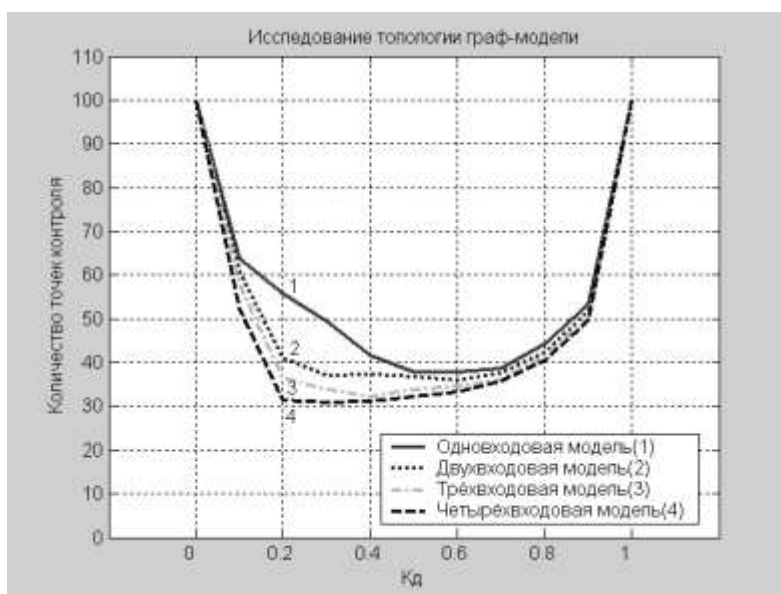


Рис. 2. Зависимость минимального числа точек контроля, необходимых для обеспечения одноразличимости одиночных дефектов, от коэффициента достижимости для одновходовых граф-моделей, состоящих из 100 вершин





**Рис. 3. Зависимость минимального числа точек контроля, необходимых для обеспечения одноразличимости одиночных дефектов, от коэффициента достижимости для одно-, двух-, трёх- и четырёхходовых граф-моделей, состоящих из 100 вершин**

Рассмотрим предельный случай, когда необходимо определить одноразличимость всех одиночных дефектов, т.е.  $K_{ГП} = 1$ . С помощью разработанного программного обеспечения было проведено моделирование для графов различных структур с числом вершин  $n = 100 - 1000$ , построены зависимости минимального числа назначаемых точек контроля для обеспечения одноразличимости дефектов от топологии объекта, характеризуемой коэффициентом достижимости (рис. 2, рис. 3).

Таким образом, на начальном этапе проектирования объекта с учетом обеспечения его контролепригодности можно определить требуемое количество контрольных точек для различимости дефектов, а также оценить затраты, связанные с их реализацией. Если прогнозируются значительные затраты, связанные с обеспечением контролепригодности, и возможна модификация объекта, следует оптимизировать структуру объекта для снижения затрат, связанных с назначением и реализацией необходимой совокупности диагностических параметров.

#### Библиографический список

1. **Соколова, Э.С.** Адаптация генетических алгоритмов к решению задач назначения точек контроля в объектах с большим числом состояний / Э.С. Соколова, С.Н. Капранов, Д.В. Дмитриев // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2007. №11. С. 59–64.
2. **Соколова, Э.С.** Разработка алгоритма локализации дефектов на назначенной совокупности контрольных точек / Э.С. Соколова, М.А. Степаненко // *Контроль. Диагностика*. 2006. №9. С. 41–44.

Дата поступления  
в редакцию 20.01.2011

**S.N. Kapranov, O.P. Timofeeva**

#### **EXPENSES PREDICTION OF CONTROLLABILITY SUPPORT USING CRITERION OF GRAPH MODEL REACHABILITY COEFFICIENT**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

Influence of topology of graph-model of investigating object to a cardinal number of diagnostic information for check and diagnostics of states.

*Key words:* diagnostics, controllability, resolution of search, reachability coefficient.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.7

П.Э. Букин<sup>1</sup>, И.Н. Фролова<sup>1</sup>, А.И. Лаптев<sup>2</sup>

### К ВОПРОСУ ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

ОАО ПКО «Теплообменник»<sup>1</sup>,  
ОАО «Гидромаш»<sup>2</sup>

Решение проблемы ускорения выпуска новой продукции на промышленном предприятии напрямую связано с заменой ручного труда работников на автоматическую работу современных программ. Одной из наиболее проблематичных областей на данном пути является автоматизация на уровне технологической подготовки производства.

*Ключевые слова:* поверхность, станочное приспособление, автоматизация, классификация поверхностей, кодирование.

В современном машиностроении все больше и больше становится очевидным необходимость повышения уровня автоматизации производственных процессов. На данный момент достаточно серьезно развиваются системы, позволяющие облегчить работу инженерно-технического персонала. Но в основном это базы данных, ускоряющие работу инженера, и лишь в редких случаях заменяющие ее программными средствами. Одной из наименее развитых областей в машиностроении является область технологической подготовки производства, она практически не алгоритмизирована. Причиной данной ситуации является отсутствие четких алгоритмов проектирования технологических процессов и оснастки, большая зависимость алгоритмов от конкретно сложившихся на данном предприятии условий, причем не только технических, но и «морально-исторических». Перечисленные и многие другие проблемы привели к тому, что автоматизации данной области почти не уделяется должного внимания.

Одной из основных частей технологической подготовки производства является конструирование технологической оснастки. В современном машиностроении зачастую данный процесс выглядит примерно следующим образом:

1) конструктору КБ оснастки приходит заявка на разработку приспособления на конкретную деталь для определенной(ых) операции;

2) конструктор пытается найти приспособление-аналог. Здесь возможны варианты: или конструктор спрашивает у коллег (если у него мало опыта), или пытается вспомнить, как он поступал при проектировании похожих приспособлений, или производит поиск в бумажном или электронном архиве аналогов. Но при этом он пользуется исключительно зрительным фильтром (просматривает «глазами все подряд»), что крайне снижает эффективность поиска;

3) если получается найти приспособление-аналог, то вновь создаваемое приспособление может оказаться лишь простой модификацией оно, но часто из-за юридических формальностей появляется оснастка-дубликат под новым индивидуальным кодом. Если же не

получается найти аналог, то изделие конструируется, исходя из навыков конструктора. При этом процесс конструирования осуществляется ручным способом, т.е. конструктор «изымает» поверхности (особое внимание при этом уделяется базирующим поверхностям) обрабатываемой детали и переносит их в файл нового приспособления, а затем постепенно достраивает данную деталь элементами оснастки.

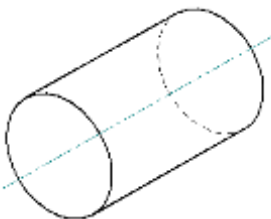
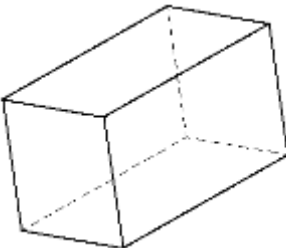
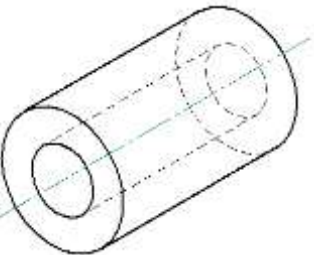
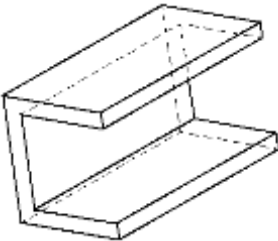
Данные три шага имеют сразу два очевидных минуса:

- поиск аналогов осуществляется вручную, а значит, повышает количество приспособлений-дублеров, особенно на предприятиях с большой номенклатурой, в силу невозможности конструктора просмотреть весь архив ранее разработанной на предприятии оснастки
- конструктор при проектировании пользуется определенным алгоритмом, который состоит из нескольких последовательных действий. Но при этом каждое из этих действий содержит достаточно большое количество возможных решений.

Таким образом, процесс конструирования оснастки неминуемо требует обращения к системам автоматизации и алгоритмизации процессов конструирования. Например, первую задачу (поиск аналогов) можно решить при помощи системы кодов. Закодировать можно как все характеристики обрабатываемой детали, так и только геометрическую конфигурацию. Фундаментом процесса кодирования является присвоение каждому уникальному элементу своего персонального кода (табл. 1).

Таблица 1

Пример кодирования простейших элементов

Пример детали	Код элемента	Пример детали	Код элемента
	001		101
	002		102
...	...		

Таким образом, можно любую геометрию детали закодировать в определенную буквенно-цифровую последовательность, добавив в нее любую необходимую информацию. Например, деталь, представленную на рис. 1, можно записать в виде кода:

15 002 305 56,

где коды обозначают: 15 – тело вращения; 002 – труба; 305 – внутренняя метрическая резьба; 56 – заготовка – пруток.

Но самое важное для реального использования кодирования, это удобство (для конструктора) присвоения кода и его распознавания. Конструктор не должен видеть математическую интерпретацию, а должен иметь возможность формировать код в режиме диалога. Примером может служить следующая иллюстрация формирования кода в режиме диалога (рис. 2).

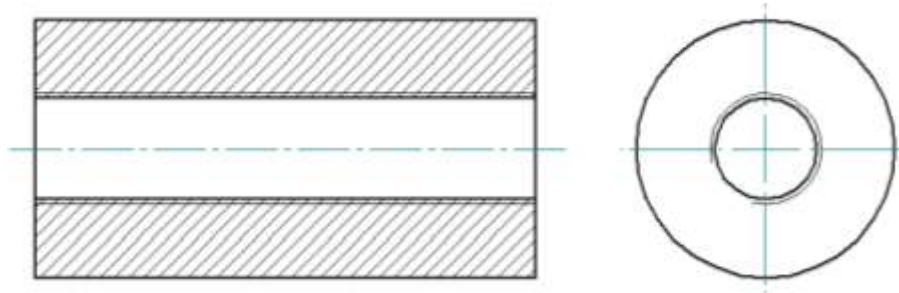


Рис. 1. Деталь для примера кодирования

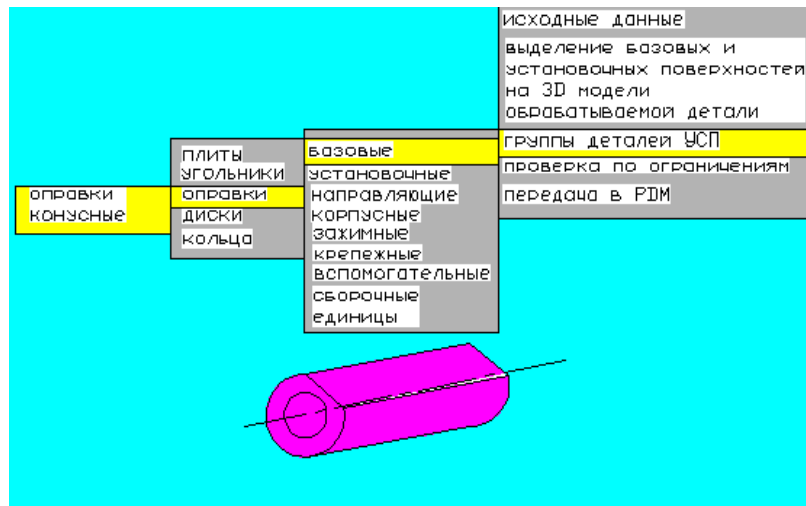


Рис. 2. Пример кодирования детали в режиме диалога

При помощи данной технологии во многом снимается проблема поиска аналога приспособления, так как, определив в специальном приложении код детали, из технического задания конструктор сразу сможет получить все детали-аналоги, а следовательно, и ссылки на искомые приспособления.

Кодирование деталей необходимо осуществлять на этапе проектирования изделия, а не на этапе проектирования приспособления. В этом случае уже на этапе проектирования изделия можно будет уменьшить номенклатуру изготавливаемых деталей и, как следствие, приспособлений. Однако конструктор изделия часто не нуждается в аналоге (с него это не требуют), и поэтому не нуждается в коде детали. Конструктор не будет кодировать детали. Этот код нужен на этапе технологической подготовки производства, поэтому кодирование переадресуется в технологические службы. Каждая технологическая служба имеет свои представления о том, какую классификацию необходимо заложить в код детали и также не хочет кодировать ненужную ей информацию. Именно это противоречие не позволяет внедрить кодирование на предприятиях, особенно, многономенклатурных.

Вторую же проблему (алгоритмизация действий конструктора) можно разделить на две самостоятельные задачи. Это создание алгоритма сборки элементов приспособлений (в том числе, и алгоритма создания уникальных элементов) и создание структуры базы данных деталей оснастки.

Первая составляющая строится на работе со схемами базирования, определении погрешностей базирования и выборе наиболее оптимальной схемы базирования, позволяющей обеспечить наиболее качественное сочетание сразу нескольких параметров как технических, так и экономических. При решении данного вопроса очень важна универсальность оценки параметров для наиболее широкого спектра охвата возможных вариантов станочных приспособлений.

Вторую же составляющую можно построить по тому же принципу кодирования, что и решение первой задачи, продемонстрированное выше. Для начала нужно классифицировать поверхности элементов приспособления, используя (по возможности) какие-либо объединяющие признаки. Во многом данная задача перекликается с кодированием составных элементов деталей (табл. 2).

Таблица 2

**Пример кодирования поверхностей элементов приспособления**

Пример поверхности	Код элемента
Глухое отверстие	301
Сквозное отверстие	302
Открытый шпоночный паз	501
Закрытый шпоночный паз	502
Палец	701
Срезанный палец	702

После этого крайне важно определить, какие поверхности могут контактировать друг с другом. Для этого необходимо составить схемы связанности, позволяющие определить возможные связи между элементами приспособления (табл. 3). При составлении данной таблицы необходимо учитывать, что некоторые коды могут совмещаться с идентичными себе, а некоторые – нет. Например: наружная плоская поверхность одной детали может совмещаться с наружной плоской поверхностью другой детали без посредников, а две внутренних цилиндрических поверхности между собой без «посредников» совмещаться не могут.

Таблица 3

**Пример вариантов совмещения кодов элементов приспособления**

Код элемента	Коды элементов, возможных для совмещения
301	105, 125, 146, 198, 375
001	005, 009, 075, 032, 064
005	005, 009, 031, 049, 064
029	017, 256, 985
175	013, 085, 259, 345
...	...

Для создания базы данных элементов приспособления необходимо применять кодирование каждой детали приспособления и каждого элемента детали приспособления по заранее разработанной системе классификации.

После определения системы кодирования детали и элементов деталей приспособления любую составляющую единицу оснастки можно представить в виде графа связей (рис. 3), где непрерывной линией обозначены связи кода детали приспособления с кодами имеющихся на этой детали поверхностей, а прерывистыми – возможные связи этих поверхностей с ответными поверхностями других элементов приспособления.

Таким образом, получив графы возможной связанности элементов приспособления можно обеспечить создание удобной для работы базы элементов оснастки.

В конечном итоге данные технологии позволяют создать приспособление, которое схематически всегда можно заменить графом, представленном на рис. 4, где под шариками подразумеваются детали приспособления, а под палочками – связанность одной поверхности первой детали оснастки с ответной поверхностью второй детали оснастки.

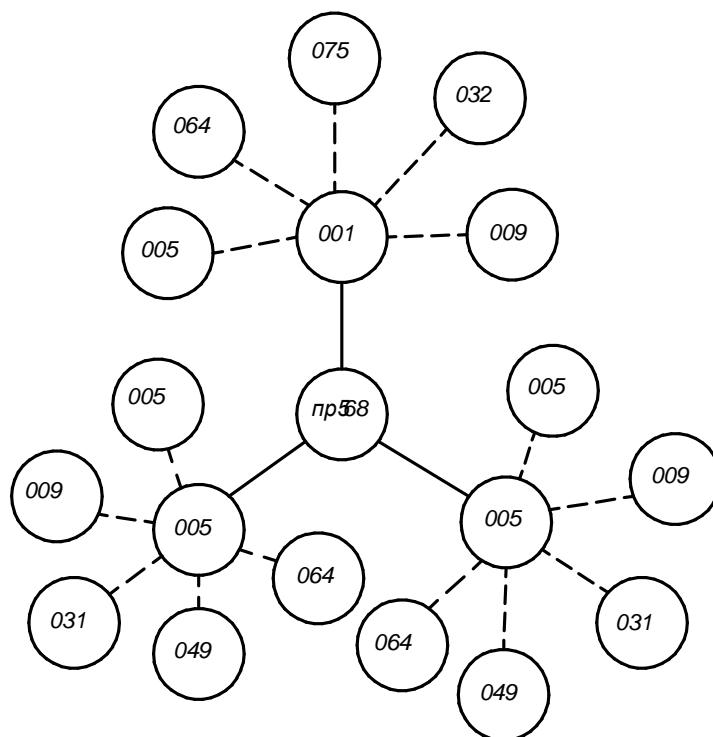


Рис. 3. Пример кодирования соединительных связей элемента приспособления

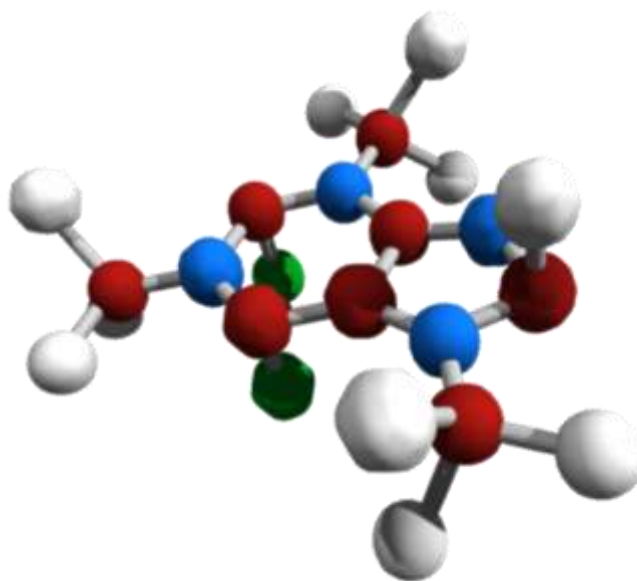


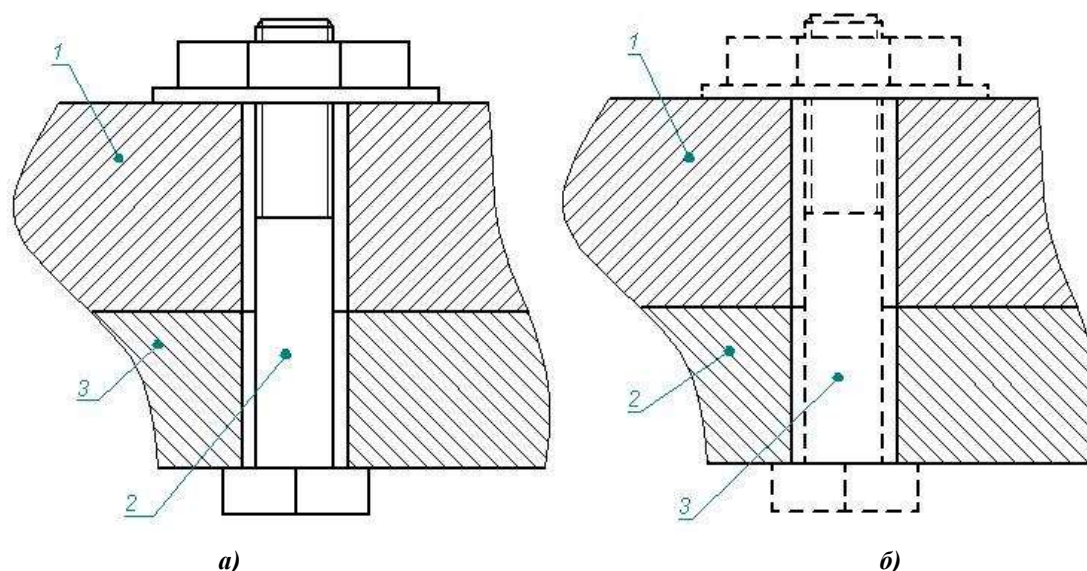
Рис. 4. Пример схематического построения конструкции приспособления

Дополнительным плюсом данной технологии представления приспособления является возможность закодировать не только отдельные части оснастки, но и всю ее в целом с указанием, какими поверхностями и какими способами детали собраны между собой.

При сборке данного приспособления из таких «шариков» надо всегда учитывать, что возможны два варианта:

- с учетом соединительных деталей как самостоятельных элементов приспособления. В этом случае процесс соединения происходит в последовательности деталь – крепежный элемент – деталь, в последовательности сборки изделия.
- без учета соединительных деталей как самостоятельных элементов приспособления. В

этом случае процесс соединения происходит в последовательности деталь – деталь – крепежный элемент, т.е. сначала производится выравнивание поверхностей деталей, а затем в данную сборку уже помещается крепеж. Данный способ наиболее характерен для систем автоматизированного проектирования, при этом в материальной среде без дополнительных приспособлений в большинстве случаев не осуществим. Особенностью данного варианта является жесткое разделение всех деталей приспособления на две крупные группы: собственно детали технологической оснастки и крепежные детали, при этом вторая группа (крепежные детали) формируется исключительно по признаку обеспечения функции соединения основных деталей.



**Рис. 5. Варианты соединения деталей приспособления:**

*a* – в последовательности деталь 1 – крепежный элемент 2 – деталь 3;

*б* – в последовательности деталь 1 – деталь 2 – крепежный элемент 3

Для алгоритмизации процесса технологической подготовки наиболее эффективен второй способ по причине работы с поверхностями основных деталей напрямую, без участия вспомогательных деталей, а значит, алгоритм упрощается.

Данная методика является лишь шагом на пути автоматизации технологической подготовки производства, но шагом неотъемлемым и позволяющим решить ряд проблем, дающим возможность построить алгоритм автоматизации конструирования станочного приспособления.

Дата поступления  
в редакцию 24.01.2012

**Р.Е. Bukin, I.N. Frolova, A.I. Laptev**

## **ON THE DESIGN AUTOMATION MACHINETOOL EQUIPMENT**

Public corporation «Heat exchanger»

Public corporation «Hydromash»

Solution of a problem of acceleration of release of new production at the industrial enterprise directly it is connected with replacement of manual skills of workers by automatic work of modern programs. One of the most problematic areas on the given way is automation at level of technological preparation of manufacture.

*Key words:* a surface, machine tools the adaptation, automation, classification of surfaces, coding.

УДК 621.787

Н.М. Тудакова, О.И. Кутилова, В.В. Крайнов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены теоретические исследования технологического процесса формирования комплексного антифрикционно-упрочненного поверхностного слоя внутренних цилиндрических поверхностей деталей нанесением покрытия из состава суспензии дорнованием.

*Ключевые слова:* моделирование, качество, трение, дорн, суспензия, антифрикционный, упрочнение.

Моделирование технологических процессов, направленных на повышение качественных характеристик поверхностного слоя, позволяет не только описывать те или иные стороны изучаемого объекта, явления или процесса, но и раскрывает новые стороны реально исследуемых процессов [1].

При традиционном дорновании СОЖ подается в зону обработки путем свободного обтекания инструмента и внутренней поверхности заготовки или с противодавлением [2] при одноэлементном инструменте. При свободном обтекании количество жидкости, которое увлекается в зону деформации, имеет определенный объем, в начальный момент равно объему вместимости пространства смазывающего клина. Вследствие прямолинейного поступательного движения деформирующего элемента количество жидкости в зоне клина будет уменьшаться, так как увеличивается поверхность деформированного отверстия и соответственно ее расход на поддержание слоя смазки. В результате возникает разрежение в зоне смазывающего клина, толщина слоя будет зависеть от способности смазки сопротивляться разрыву, т.е. вязкости, характеризуемой коэффициентом вязкости  $\eta$ . Увеличение разрежения за счет непрерывного уменьшения объема смазывающей жидкости в процессе дорнования приводит к разрушению смазывающего клина и разрыву смазки. При переходе некоторого критического значения толщины слоя наступает граничное и полусухое трение, влияние которых неблагоприятно проявляется при большой протяженности обрабатываемой поверхности.

Для обработки длинномерных внутренних цилиндрических поверхностей, например отверстий в деталях гидроцилиндров, разработан инструмент – дорн, позволяющий формировать антифрикционно-упрочненный поверхностный слой из суспензии антифрикционного порошка и связующего поверхностно-пластическим деформированием дорнованием [3].

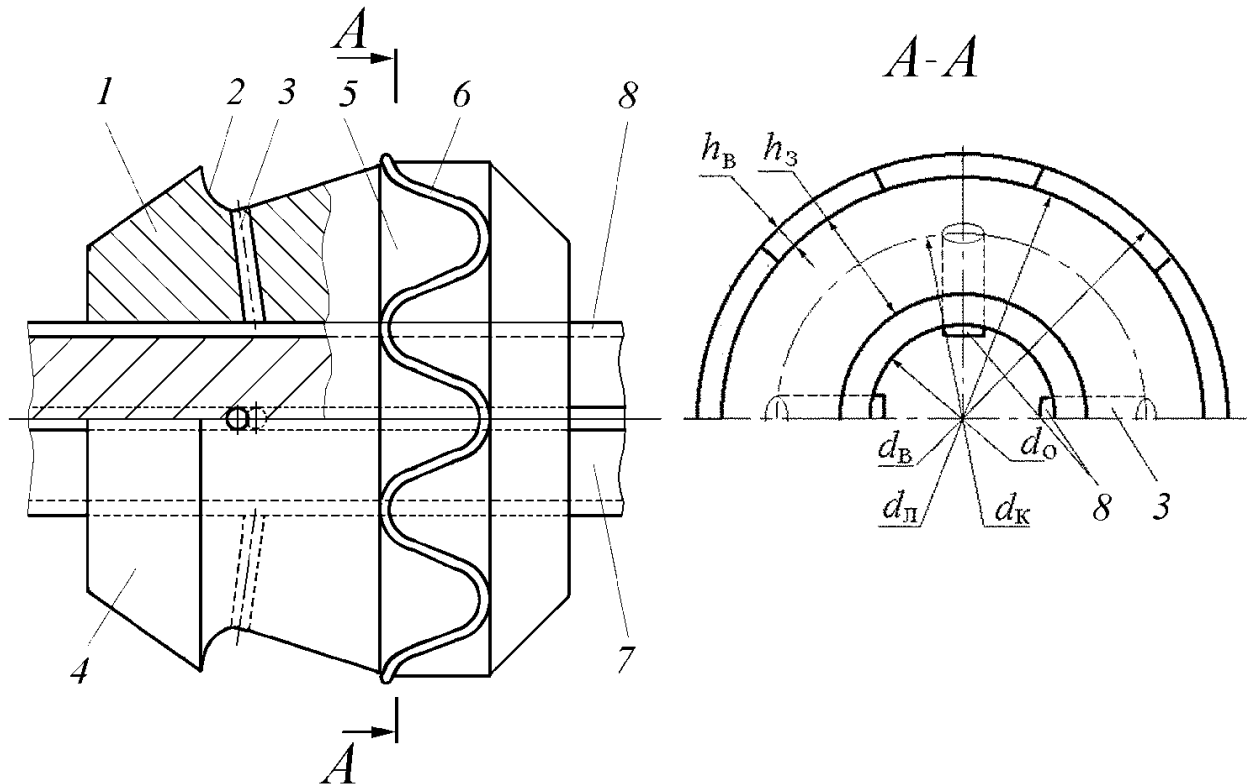
На рис. 1 показан предлагаемый инструмент – дорн 1 с кольцевой канавкой 2 и радиальными каналами 3 в заборной части 4 дорна. На ленточке 5 дорна 1 расположена синусоидальная выточка 6, а сам дорн установлен на оправке 7 с осевыми пазами 8.

Обработку внутренних цилиндрических поверхностей осуществляют следующим образом. Дорну 1 сообщают рабочее движение. В момент соприкосновения заборной части 4 с обрабатываемой поверхностью по каналам 3 и кольцевой канавке 2 под давлением подается суспензия, состоящая из мелкодисперсного порошка и антифрикционного материала, например дисульфида молибдена и меди, и связующего – глицерина. Дорн под действием усилия дорнования внедряется поверхностью синусоидальной выточки в обрабатываемую поверхность в режиме скольжения со скоростью  $v_{дорн}$ .

Количество суспензии, которое увлекается в зону деформации конической (заборной) частью дорна в начальный момент времени имеет постоянный объем, равный вместимости



пространства. При поступательном движении деформирующего элемента в зону контакта между поверхностями детали и инструмента по каналам 3 и кольцевой канавке 2 подается суспензия, состоящая из порошка антифрикционного материала и связующего, которая в результате диффузионного взаимодействия материала частиц суспензии, подаваемого под давлением к поверхности детали и поверхностно-пластической деформации, образует антифрикционно-упрочненный поверхностный слой. При этом клин суспензии оказывает пластифицирующее воздействие деформирующего элемента за счет подачи ее под давлением.



**Рис. 1. Дорн для формирования антифрикционно-упрочненного поверхностного слоя:**

1 – дорн; 2 – канавка кольцевая; 3 – радиальный канал; 4 – заборная часть дорна;  
5 – ленточка дорна; 6 – синусоидальная выточка; 7 – оправка; 8 – осевой канал;  
 $d_{\text{п}}$  – диаметр цилиндрической ленточки дорна;  $d_{\text{в}}$  – выточки дорна;  $d_0$  – диаметр оправки;  
 $d_{\text{к}}$  – диаметр осевых каналов;  $h_{\text{в}}$  – высота выточки;  $h_3$  – заборной конической части дорна

При дальнейшем перемещении деформирующего элемента – дорна 1 в зоне контакта его синусоидальной выточки 6, расположенной на цилиндрической ленточке 5, происходит увеличение нормальной составляющей деформирующей силы и значительное повышение удельных нагрузок и локальных температур. Последующее упругое восстановление очага деформации приводит к возникновению сжимающих остаточных напряжений.

Процесс комплексного формирования антифрикционно-упрочненного поверхностного слоя протекает на первом этапе в объеме вместимости пространства суспензии в условиях жидкостного трения, на втором этапе без наличия жидкостного слоя в условиях граничного и полусухого трения. Этот процесс смешанного трения, который может быть представлен в виде условной удельной силы трения  $\tau$  [4]:

$$\tau = T_{\text{ж}} + T_{\text{г-п}} = \gamma \eta d v_{\text{см}} / dh + \mu q (1 - \gamma), \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;  $v_{\text{см}}$  – скорость втекания суспензии;  $dh$  – толщина слоя суспензии;  $q$  – давление суспензии;  $\gamma$  – коэффициент непрерывности слоя суспензии.

Обе составляющие удельной силы трения включают коэффициент непрерывности слоя суспензии, характеризующей их взаимное влияние. При  $\gamma = 1$  толщина жидкостного слоя не будет уменьшаться в процессе обработки ниже критической. Она полностью разделяет поверхность заготовки и инструмента, т.е. наблюдается жидкостное трение, и процесс поверхностной пластической деформации отсутствует. При  $\gamma = 0$  будет наблюдаться сухое трение, при котором частицы антифрикционного материала покрытия ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$  и т.п.) будут отсутствовать в зоне контактирования.

Первая составляющая учитывает силу трения при наличии жидкостного слоя

$$T_{\text{ж}} = \gamma \eta dv / dh. \quad (2)$$

Сопrotивляемость жидкости (суспензии) скольжению или сдвигу характеризует коэффициент динамической вязкости  $\eta$ . В состав суспензии входит глицерин, примерно 70...80%, являющийся ньютоновской жидкостью, динамическая вязкость которой не зависит от скорости деформации и составляет для глицерина при температуре  $T = 20^\circ\text{C}$   $\eta_{\text{гл}} = 1,49$  Па·с, поверхностное натяжение глицерина при той же температуре  $\sigma = 64,7 \cdot 10^{-3}$  Н/м. Поскольку глицерин представляет собой слабый электролит, он обеспечивает возможность интенсивного растворения активных компонентов суспензии на активированных участках при трении [5].

Жидкостное трение между инструментом и деформируемой поверхностью обеспечивается гидродинамическим эффектом суспензии, возникающим при определенных соотношениях эффективной вязкости и обрабатываемых свойств металла, геометрии инструмента и частиц суспензии, скорости взаимного перемещения контактирующих поверхностей, принудительной под давлением подачи суспензии в зону очага деформации [5].

Гидродинамическое давление  $p$  суспензии

$$p = \frac{3 \eta_0 v_{\text{дорн}} e^{cP}}{\text{tg} \alpha} \frac{B_1^2}{h_{\text{кр}} \left( \frac{h_{\text{кр}}}{\text{tg} \alpha} + B_1 \right)^2}, \quad (3)$$

где  $\eta_0$  – вязкость суспензии при начальных условиях;  $c$  – пьезокоэффициент вязкости;  $v_{\text{дорн}}$  – скорость дорнования;  $B_1$  – длина участка переднего конуса инструмента, участвующая в образовании гидродинамического клина:

$$B_1 = B - N_{\text{д}} / \text{tg} \alpha, \quad (4)$$

где  $B$  – длина переднего конуса инструмента;  $\alpha$  – угол переднего конуса инструмента;  $N_{\text{д}}$  – натяг дорнования;  $h_{\text{кр}}$  – критическая толщина слоя суспензии, необходимая для обеспечения жидкостного трения:

$$h_{\text{кр}} = R_z + R_{z\text{д}}, \quad (5)$$

где  $R_z$  – высота микронеровностей обрабатываемой детали;  $R_{z\text{д}}$  – высота микронеровностей дорна.

Принято считать, что жидкостное трение существует, когда толщина жидкостного трения  $h_{\text{кр}}$  достаточна для сохранения свойств жидкостного трения, т.е. имеет место закон Ньютона [4]:

$$T = \eta v F / h, \quad (6)$$

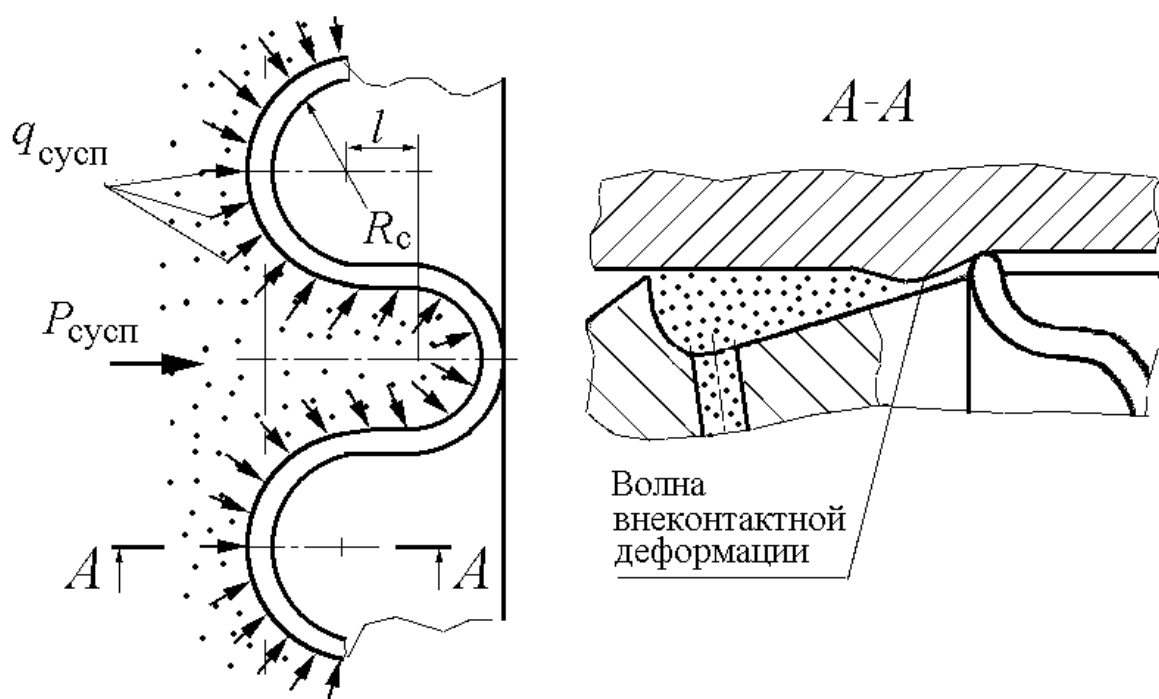
где  $T$  – сила трения;  $\eta$  – коэффициента вязкости;  $v$  – скорость течения суспензии;  $F$  – поверхность деформируемой зоны.

Стремление к энергетической минимизации за счет замены граничного трения жидкостным позволяет более полно использовать пластические свойства металла и снизить силы контактного трения. Для этого необходимо учитывать весь комплекс явлений.

При дальнейшем уменьшении толщины слоя  $h_{кр} \leq R_z + R_{zд}$  происходит его разрыв и появляется контакт между шероховатостями, локальные сварки, диффузионные процессы в пластифицируемую среду поверхности заготовки, т.е. процесс описывается второй составляющей уравнения (5):

$$T_{г-п} = \mu q(1 - \gamma). \quad (7)$$

Синусоидальная выточка *б* обеспечивает уменьшение усилия дорнования за счет уменьшения площади контактирования в радиальном направлении - масштабный фактор, а также за счет улучшения условия смазывания поверхностей уменьшается коэффициент трения (рис. 2). Синусоидальная форма выточки *б* позволяет затекать суспензии в зону цилиндрической ленточки *5* по большому периметру, увеличивая площадь контактирования суспензии с обрабатываемой поверхностью перед поверхностно-пластическим деформированием, обеспечивая большую смачиваемость поверхности.



**Рис. 2. Схема процесса диффузионного распределения суспензии:**  
 $P_{сусп}$  – давление суспензии;  $q_{сусп}$  – распределенное давление суспензии;  
 $R_c$  – радиус синусоиды выточки;  $l$  – высотный параметр выточки

Выдавленный деформирующим элементом материал заготовки образует волну по краям очага деформации, с гребнем которой контактирует струя суспензии (рис. 2, *A-A*). Величина волны внеконтактной деформации очень мала. В пределах ее поверхностный слой получает прогиб в связи с выпучиванием и сдвигом и испытывает деформацию растяжения с соответствующим его удлинением, при этом формируется активная дислокационная структура с высокими растягивающими напряжениями, что увеличивает химическую активность поверхности. Максимальные растягивающие напряжения возникают на гребне волны, в этом случае химическая активность поверхности еще больше повышается.

Поведение суспензии, взвешенной в жидкости, заполняющей замкнутый объем, показывает, что частицы суспензии не только увлекаются жидкостью посредством перемещения дорна, но и совершают весьма сложные движения относительно нее. Возникновение сложных пространственных движений частиц суспензии относительно жидкости и формируемого комплексного упроченного поверхностного слоя зависит от геометрических характеристик

замкнутого объема между обрабатываемой поверхностью отверстия и выполняющим его поверхностную пластическую деформацию дорном, от динамической и кинематической вязкости суспензии, ее плотности, а также от параметров внешних форм воздействия (скорости дорнования, давления подачи суспензии в отверстия), которые возбуждают определенные формы движения.

Если принять  $\eta_{\text{гл}}$  за динамическую вязкость глицерина, а  $\eta_{\text{д}}$  за вязкость дисперсных частиц антифрикционных материалов  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Cd}$  и т.п., то относительная вязкость суспензии

$$\eta_{\text{о}} = \frac{\eta_{\text{гл}}}{\eta_{\text{д}}}. \quad (8)$$

В триботехнике применяют понятие кинематическая вязкость, как отношение динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

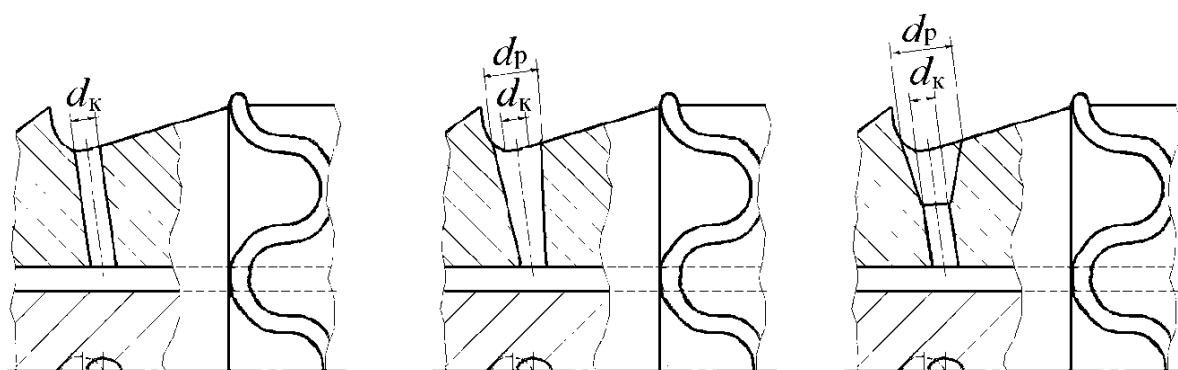
При формировании комплексного упрочненного слоя необходимо определить условия, при которых частицы суспензии могут проникать с поверхности канала во внутренние области течения и достигать любой точки перемещающегося объема. Причем коэффициент вязкости суспензии можно определить [6, 7].

$$\mu = \mu_{\text{ж}} [1 + 4,5(1 - \epsilon)], \quad (10)$$

где  $\mu_{\text{ж}}$  – коэффициент вязкости жидкой среды, Па·с;  $\epsilon$  – доля жидкой фазы в единице объема суспензии, д.е.; 4,5 – поправочный коэффициент

При наличии радиальных  $\mathcal{Z}$  и осевых каналов  $\delta$  (рис. 1), по которым суспензия подается в зону контактирования под давлением, можно не только поддерживать давление суспензии в замкнутых зонах между зубьями дорна, но и регулировать измерением приращение давления при обработке в процессе формирования комплексного упрочненного ПС.

От площади сечения отверстия, конкретной от его конфигурации, зависит не только скорость, но и ускорение истечения суспензии (рис. 3).



**Рис. 4. Варианты конструктивного исполнения отверстий подачи суспензии:**

$d_{\text{к}}$  – диаметр отверстия;  $d_{\text{р}}$  – диаметр расширения отверстия

Расчет гидростатодинамического процесса должен быть основан на системе уравнений, включающей уравнение Рейнольдса, и уравнений, описывающих гидравлические сопротивления синусоидального элемента.

Основным условием работоспособности устройства является обеспечение требуемой несущей способности и жесткости слоя суспензии. Несущая способность зависит от давле-

ния в карманах. Распределение по длине кармана может быть определено из уравнения Рейнольдса для потока жидкости, записанного с учетом следующих допущений [8, 9]:

- суспензия по совокупности – смазывающее вещество – представляет собой ньютоновскую жидкость;
- силы инерции и объемные силы в жидкости малы по сравнению с силами давления и трения;
- изменение давления по толщине суспензии мало ( $\partial p / \partial y = 0$ );
- вязкость и плотность суспензии постоянны;
- стенка отверстия малоподвижна.

Уравнение имеет вид

$$h(x)^3 \frac{\partial^2 h(x, z)}{\partial x^2} + h(x)^3 \frac{\partial^2 h(x, z)}{\partial z^2} = -12\eta \left[ v_{yk} + v_{xk} - \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right], \quad (11)$$

где  $x$  – координата вдоль слоя суспензии;  $y$  – координата, перпендикулярная к слою суспензии;  $z$  – координата вдоль оси оправки;  $p(x, z)$  – давление в кармане;  $h(x)$  – зазор в кармане, определяемый разностью текущих координат поверхностей отверстия ( $y_0$ ) и кармана ( $y_k$ );  $v_{xk} = 0$  – окружная скорость оправки.

$$h(x) = y_0 - y_k, \quad (12)$$

$$y_0 = \sqrt{R_0^2 - x^2},$$

где  $R_0$  – радиус отверстия;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости (суспензии).

Скорость истечения жидкости из проводящего суспензию отверстия

$$v_{yk} = Q_k / S, \quad (13)$$

где  $Q_k$  – расход суспензии из отверстия;  $S$  – площадь сечения отверстия.

Проведенные зависимости были проверены на практике, они соответствуют эксплуатационным данным с расхождением 20%. В частности в результате данной обработки формируется антифрикционно-упрочненный поверхностный слой толщиной 0,1...0,3 мм с глубиной проникновения элементов покрытия 0,010...0,025 мм, шероховатостью поверхности  $R_a = 0,63...0,8$  мкм, остаточными напряжениями сжатия  $\sigma_{ост} = 100...300$  МПа.

### Библиографический список

1. **Тудакова, Н.М.** Повышение качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей многосвязных ушковых соединений, работающих в условиях фреттинг-коррозии, на основе комбинированной упрочняющей (на примере стыковых соединений планера самолета). Дисс. ... канд. техн. наук. – Н. Новгород: НГТУ, 2002. – 190 с.
2. **Пат. № 2063861 В24В39/02, В23Д43/02** Способ деформирующе-режущее-выглаживающего прошивания-редуцирования поверхностей и устройство для его осуществления / А.В. Шедрин, М.И. Грошев. 20.07.1996.
3. Дорн для формирования антифрикционно-упрочненного поверхностного слоя / В.М. Сорокин [и др.] // Патент на полезную модель 109689 В24В39/00, С23С24/06 от 27.10.11.
4. Гидропластическая обработка металлов / К.Н. Богоявленский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
5. **Сивцев, Н.С.** Самоорганизация контактного трения и точность обработки при дорновании // Вестник машиностроения. 2003. №1. С. 57–61.
6. **Плановский, А.Н.** Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
7. **Пат. № 2343452С2** Способ определения вязкости суспензии / Ю.И. Шмигин, А.Н. Плановский. 10.01.2009.

8. **Ведерников, Ю.А.** Устройство для обработки внутренних торцовых поверхностей в корпусных деталях / Ю.А. Ведерников, Р.М. Хусаинов, А.В. Передерий // СТИН. 2008. №7. С. 9–14.
9. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. Т. 2. – 416 с.

*Дата поступления  
в редакцию 24.01.2012*

**N.M. Tudakova, O.I. Kutilova, V.V. Krainov**

**MODELING OF PROCESSES  
COMPLEX FORMING APERTURES**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

Theoretical research of the technological process of forming of the complex antifriction strengthened surface crating of inner cylinder surface of details by striking the crating out of suspension composition by mandreling.

*Key word:* modeling, quality, friction, mandrel, suspension, antifriction, strengthening.

УДК 621.9

С.В. Куликов<sup>1</sup>, С.А. Манцеров<sup>2</sup>, А. Ю. Панов<sup>2</sup>**РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Основным предметом анализа в настоящей статье выступают системы принятия решений единого информационного пространства машиностроительного предприятия. Развитие системы принятия решений путем использования механизма круглого стола с указанием перечня информации для его участников.

*Ключевые слова:* единое информационное пространство, системы принятия решений, моделирование, круглый стол, проектирование.

Создание единого информационного пространства (ЕИП) на машиностроительном предприятии является весьма сложной задачей, решение которой осуществляется в соответствии с современными стандартами управления жизненным циклом изделия. Построение ЕИП производится в соответствии с концепцией CALS[1], согласно которой необходимо автоматизировать информационную поддержку всех этапов жизненного цикла изделия. Очень важной стратегией развития современного ЕИП машиностроительного предприятия является включение в его состав интеллектуальных подсистем, обеспечивающих поддержку принятия решений. В связи с этим к составу и структуре ЕИП предъявляются качественно новые требования, затрагивающие как функциональность всех компонентов программного обеспечения, так и методики работы с ними [3]. Поскольку ЕИП содержит всю информацию, необходимую для поддержки принятия решений, а современные решения все чаще должны приниматься коллегиально, в результате совместной обработки актуальных данных группой лиц, целесообразно обеспечить взаимодействие этих лиц, принимающих решения также средствами ЕИП предприятия. Это означает, что, помимо интеграции информационных ресурсов, необходимо реализовать такую функциональность, которая позволила бы согласованно принимать решения при удаленном взаимодействии между удаленными лицами в процессе обработки данных. В частности, именно на обеспечение эффективного взаимодействия ориентированы новейшие разработки в области автоматизации управления жизненного цикла изделия и конструкторско-технологической подготовки производства.

В широком смысле под решением понимают процесс выбора одного или нескольких вариантов действий из множества возможных. Принятие решений – основная функция управления. Она пронизывает организацию снизу вверх. Принимать решения приходится руководителям, специалистам, рабочим, экспертам, консультантам, аналитикам – всем участникам ЕИП предприятия. В настоящее время существует множество информационных технологий, позволяющих предельно облегчить жизнь и помочь в решении проблем, связанных с процессами принятия решений в различных предметных областях. В частности, очень распространены сейчас системы поддержки принятия решений на основе метода анализа иерархий (МАИ), разработанного американским ученым Т. Саати.

В связи с этим необходимо предложить такие графические и методические инструменты, которые позволили бы формализовать и выявить описание взаимодействия пользователей ЕИП в информационной среде.

Все бизнес-процессы на предприятии являются источниками потребления и производства информации. Соответственно, требование по обеспечению своевременного предо-



ставления этой информации средствами информационно-коммуникационных технологий отражено как в международных, так и в внутренних стандартах, в связи с внедрением различных систем автоматизации и управления качеством. Следовательно, система управления, построенная на базе ЕИП, должна обладать всеми необходимыми и достаточными ресурсами для эффективной работы. Но для этого, в первую очередь, требуется создание эффективной системы управления и взаимодействия информационных потоков в рамках самого ЕИП[2].

Однако в настоящее время повсеместно при организации ЕИП предприятия в первую очередь обращают внимание не на то, каким образом хранимая информация будет способствовать принятию согласованных решений, а на упорядочивание имеющихся данных и создание электронного архива. В связи с этим используемые методы создания ЕИП, в большинстве своём, основываются на упорядоченной интеграции различных баз данных и обслуживании хранилищ. Такой принцип построения ЕИП зачастую накладывает отпечаток на схему управления организацией, усиливая иерархичность, жесткость конструкции модулей управления и детерминированность процессов принятия решений.

В связи с таким подходом к организации ЕИП, при дальнейшем его использовании, а также при разработке и встраивании интеллектуальных систем поддержки принятия решений проектанты и аналитики сталкиваются с проблемами:

- одностороннее видение всех процессов, например только с точки зрения управленцев высшего звена;
- сложность организации мониторинга исполнения решений, когда «наверх» поступает лишь информация по факту, например, о завершении процессов или ошибках и сбоях;
- большие сроки принятия распределенных решений в случае необходимости привлечения нескольких экспертов;
- сложность формализации и учета интересов всех исполнителей;
- исключение руководства высшего звена из работы в электронном информационном пространстве, когда многие решения для утверждения и согласования требуют формирования бумажной документации, что не позволяет принимать решения в режиме реального времени.

Решить проблему ограниченных возможностей систем управления на основе данных ЕИП поможет иной подход в организации ЕИП. Оно должно создаваться как открытое и самоорганизующееся пространство, с возможностью адаптации к внешним событиям и эволюции на основе происходящих изменений внешней среды. При этом основные и базовые алгоритмы и принципы ЕИП, отраженные в российских и международных стандартах, должны сохраняться. К плюсам таких управленческих схем можно отнести:

- уменьшение времени, требуемого для принятия управленческих решений и способность перехода к системам принятия решений в режиме реального времени;
- возможность перехода к схемам принятия распределенных решений с вовлечением всех участников процесса согласования и утверждения решения к взаимодействию средствами единого информационного пространства, что приведет к повышению эффективности управленческой работы;
- адаптивность и конфигурируемость структуры ЕИП в соответствии с результатами непрерывного развития предприятия;
- гибкое и адаптивное распределение полномочий в соответствии с требованиями решаемых проблем.

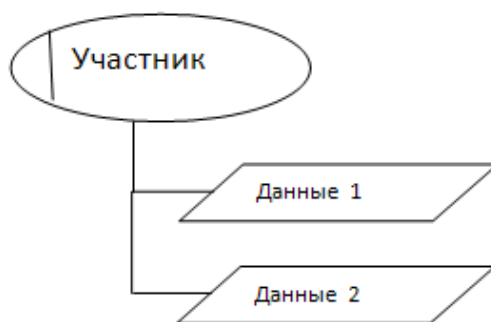
Гибкость системы, многовариантность реакции на события также должны отражаться на процессе принятия решений. При появлении многовариантности действий возникает потребность в принятии, а прежде всего, обсуждении решения. За счет быстрой и четкой системы организации всех заинтересованных лиц в обсуждении задачи может быть повышено качество связей. Оказать помощь в решении проблемы эффективной организации взаимодействия призван механизм круглого стола.

Идея Round Table (RT) – круглого стола базируется на том, что часто и почти во всех организациях работникам приходится принимать решения в условиях неопределенности. Недостаток информации, компетенции, ограничения по времени может существенно снизить качество принимаемых решений. В связи с этим при проектировании ЕИП особое внимание следует уделять поддержке принятия распределенных решений наиболее компетентными сотрудниками за счет создания так называемого виртуального круглого стола – по принципам он-лайн конференцией, но со своим четким регламентом и структурой, ответственными за создание, ход и конечное решение. Это позволит не только существенно снизить время для принятия решений и повысить их качество, но и перейти на другой уровень организации и взаимодействия между сотрудниками.

По аналогии с реальным круглым столом виртуальный создается по особым правилам: каждый участник выполняет свою особую роль, ход процесса обсуждения и результаты четко регламентированы, то есть требуется создание четкой нотации круглого стола. В ней должны быть ответы, прежде всего, на организационные вопросы: в каких случаях можно созвать круглый стол, полномочия по созыву круглого стола.

Для решения всех поставленных задач существуют разработанные авторами А.В. Иващенко, С.С. Кожевниковым и М.Е. Кременецкой два взаимосвязанных компонента: RTS (Round Table Structure) – структура круглого стола и RTI (Round Table Interaction) – взаимодействия круглого стола. Они в полной мере описывают внутреннюю структуру круглого стола, регламент и порядок принятия решений.

Однако все участники должны вносить максимальный вклад в решение проблемы. Существенен также регламент и контроль над процессом обсуждения, которое, например, может проходить либо в заданном заранее режиме, либо под руководством модератора. Поэтому необходимо обеспечить выполнение регламента круглого стола, четкое понимание целей и результатов, четкое описание организационной структуры, а также полное обеспечение участников необходимой информацией. Для этого предлагается расширить структуру RTS добавлением объекта, отражающего перечень информации, которой должен обладать участник круглого стола для успешного принятия решения.



**Рис. 1. Добавление объекта, отражающего данные для участника круглого стола**

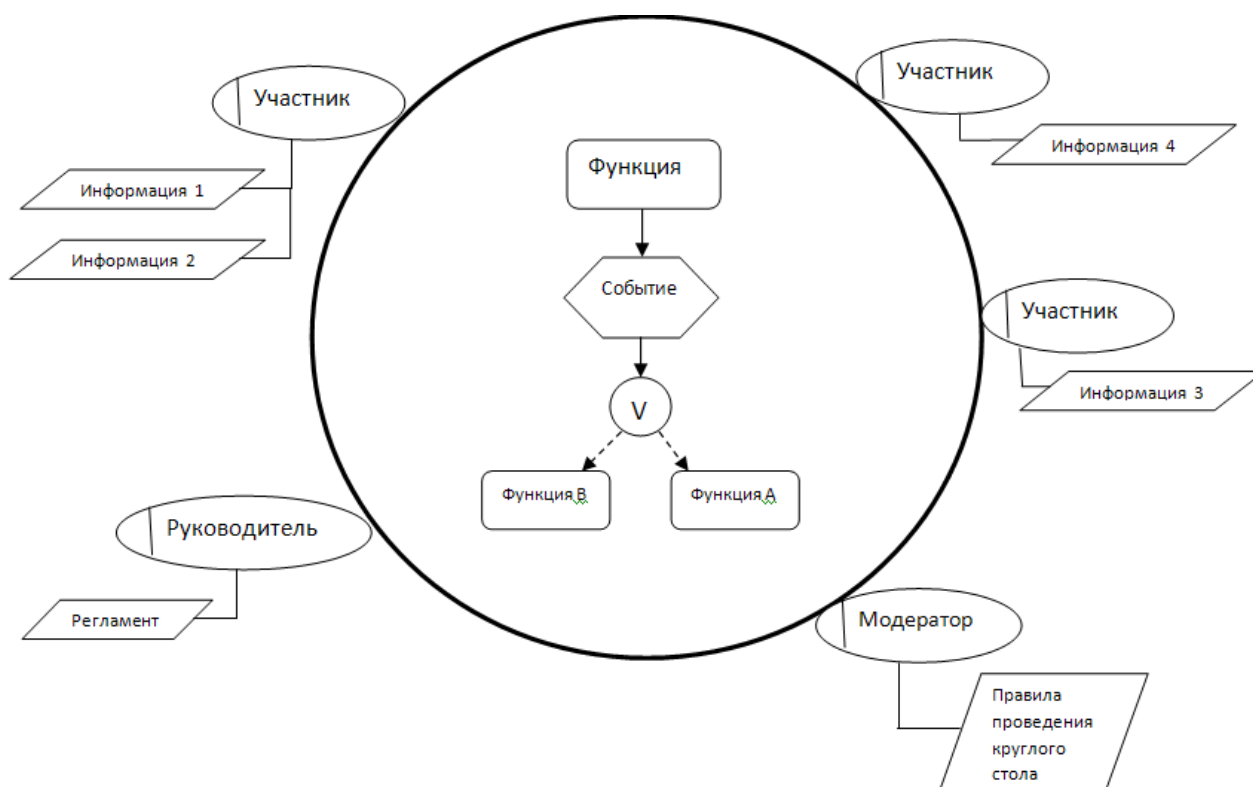
Для графического описания данного объекта круглого стола используются определенные элементы информационных данных и особые правила их применения. Суть описания RTS заключается, построении композитного решения, где значимые компоненты располагаются в центре, а внешние сущности по краям. К сущностям (участникам) добавляется один или несколько элементов, отражающих перечень информационных данных, которыми должен обладать участник круглого стола (рис. 1). Иницирующим действием по созданию круглого стола может быть любое событие. Если это событие возникает, то информация об иницировании круглого стола приходит к пользователям, которые имеют к этому событию отношение. Фактически, круглый стол является определенной организационной структурой,

привлекающей к участию людей или активные (интеллектуальные) информационные системы. Они являются внешними сущностями.

Использование структуры круглого стола позволяет наделить ЕИП предприятия механизмом принятия обоснованных решений. При этом четко могут быть определены необходимые участники, их роли, регламент, цель, результат и четкий перечень информационных данных, которые требуются для принятия верного решения.

Такая схема (рис. 2) позволит перейти на новый уровень взаимодействия, когда управленческие решения принимаются в кратчайшие сроки в режиме реального времени, без задержки или остановки производства, а главное, принимаются наиболее компетентными и подготовленными в этой области сотрудниками.

Расширенные диаграммы RTS описывают лишь возможности взаимодействия пользователей ЕИП, определяя, какие лица, принимающие решения, должны быть уведомлены при возникновении определенного события, какими данными они должны обладать и с кем требуется произвести обмен информацией. Для каждого такого круглого стола может быть описана логика взаимодействия пользователей, в целях создания четкой системы организации всех заинтересованных лиц в обсуждении задачи. Решить проблему эффективной организации взаимодействия призвана структура, описывающая взаимодействие с помощью виртуального круглого стола RTI (Round Table Interaction) [2].



**Рис. 2. Схема круглого стола, построенного с учётом описания перечня информации для участников**

RTI описывает процедуру общения в рамках виртуального круглого стола. Основной задачей такой диаграммы является построение системы саморазвивающейся, придание ей свойств гибкости и возможности изменения в зависимости от различных начальных условий. RTI позволяет так описать цепочку событий, чтобы была возможность «проиграть» множество возможных ситуаций.

Диаграммы RTI строятся в виде таблиц, где столбец таблицы – это исполнитель или

ответственный. У каждого исполнителя есть присущая ему роль, которую он играет в данном варианте круглого стола. При различных условиях и в различных ситуациях созыва круглого стола исполнители могут играть различные роли. В столбцах отображаются функции ответственных работников. Связь функции осуществляется путем соединения их стрелками, обозначающими сообщения. По вертикальной оси отслеживается время.

Для графического отображения диаграмм RTI используются элементы диаграммы EPC, элементы матрицы ответственности RACI (Responsible, Accountable, Consult, Inform) (рис. 3).

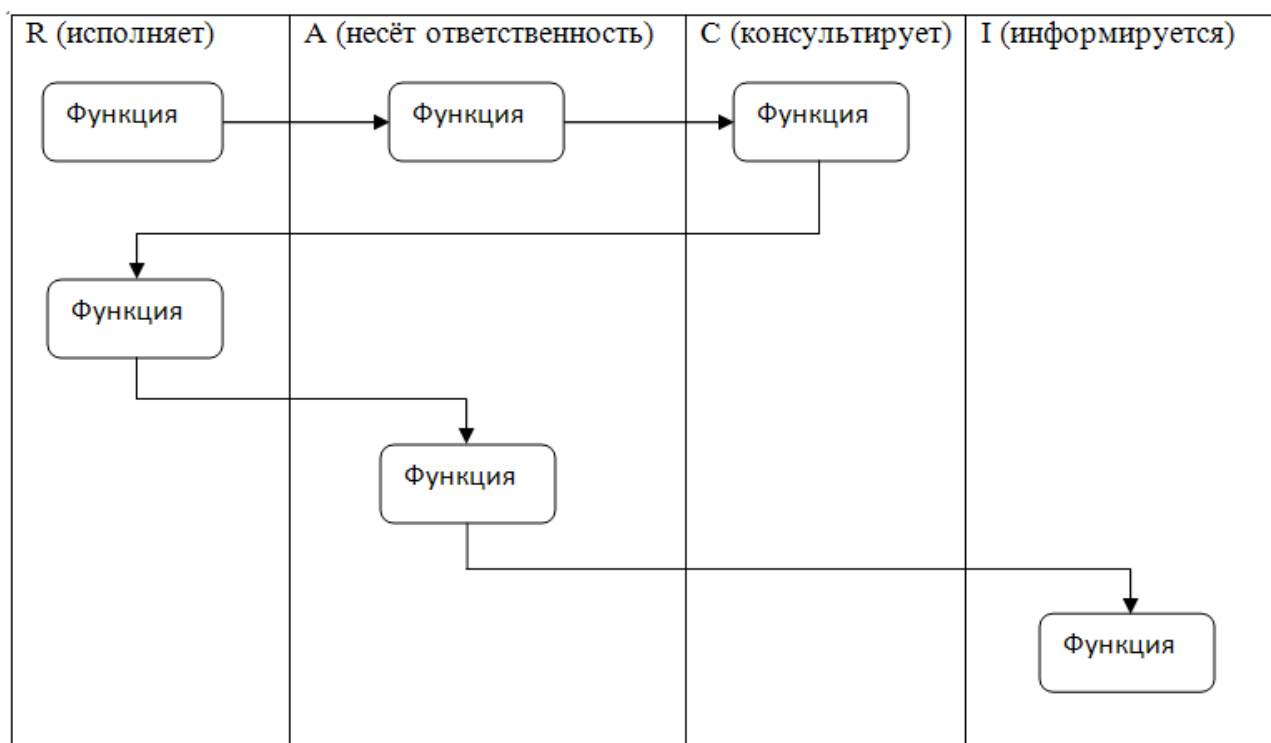


Рис. 3. Структура диаграммы RTI

Основной целью создания ЕИП промышленного предприятия является обеспечение эффективного взаимодействия участников процесса проектирования и производства, а также лиц, принимающих решения при управлении предприятием. Особенности такого взаимодействия включают необходимость работы с большими объемами неструктурированных и иногда противоречивых данных и потребность в преодолении постоянно возникающих коммуникационных барьеров между всеми участниками жизненного цикла изделия. Решение данных вопросов возможно делегированием некоторых организационных полномочий системе управления. Это позволит структурировать деятельность организации, верно и понятно разделить полномочия, определить ответственных за процессы, ввести ключевые показатели эффективности тех или иных процессов или работников и, главное, всё будет проходить в автоматизированном режиме.

#### Библиографический список

1. **Манцеров, С.А.** Структурная систематика единого информационного пространства машиностроительного кластера / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2008. Т. 4. № 1. С. 37–42.
2. **Иващенко, А.В.** Интегративное проектирование единого информационного пространства предприятия / А.В. Иващенко, С.С. Кожевников, М.Е. Кременецкая. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2010. – 100 с.

3. **Дязитдинова, А.Р.** Автоматизированная поддержка принятия коллективных решений на основе организации виртуального круглого стола / А.Р. Дязитдинова, А.В. Ивашенко, П.О. Скобелев // Инфокоммуникационные технологии. 2008. № 4. С. 67–75.
4. **Манцеров, С.А.** Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж, 2007. Т. 3. № 11. С. 171–176.

*Дата поступления  
в редакцию 24.01.2012*

**S.V. Kulikov, S.A. Mantserov, A. Y. Panov**

**DEVELOPMENT OF SYSTEMS OF DECISION-MAKING OF UNIFORM  
INFORMATION FIELD OF THE MACHINE-BUILDING ENTERPRISE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

As the basic subject of the analysis in the present article systems of decision-making of uniform information field of the machine-building enterprise act. Development of system of decision-making by use of the mechanism of a round table, with instructions of the list of the information for its participants.

*Key words:* Uniform information field, decision-making systems, modeling, a round table, designing.

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

---

УДК 621.039.577

М.А. Большухин, А.В. Будников, Д.Н. Свешников, В.И. Фомичев, В.П. Крепков

### АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ CFD КОДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

**Цель:** Разработка технологии CFD кодов для описания неизотермических потоков.

**Методология / подход:** Применение запатентованной технологии тепловизора для измерения температуры использования в поле течения.

**Результаты:** Технология позволяет качественно оценивать нестационарные поля температур и воспроизводить пульсации температуры в потоке с частотой до ~ 5 Гц. Описаны результаты проведенных экспериментов, которые были получены с помощью CFD кодов. Показано, что обеспечивается правильное воспроизведение температуры поля формы и спектра температура пульсации с частотой до 2 Гц ~.

**Применение:** Адаптация и верификация CFD кодов.

**Оригинальность / значение:** Технология позволяет значительно улучшить качество проектов атомной энергетики, сократить сроки и затраты за счет уменьшения экспериментальной стадии проекта.

*Ключевые слова:* вычислительная гидродинамика, смешение потоков, ядерная энергетика, экспериментальные установки, тепловизор.

Развитие знаний о физических явлениях, появление новых теорий и инструментов аналитического анализа этих явлений всегда определяют необходимость постановки и проведения новых экспериментальных исследований. Развитие и взаимное влияние методов аналитического анализа и эксперимента – основой метода научного познания. Современные условия характеризуются появлением большого количества методов и систем измерений, основанных на совершенно новых принципах (например, использование лазеров для измерения трехмерных полей температур и скоростей, тепловизоров для измерения поля температур поверхности), что существенно расширяет возможности измерений. Это дает экспериментатору возможность постановки и проведения ранее невозможных исследований, направленных на формирование знаний, востребованных в науке и технике.

Одним из бурно развивающихся в настоящее время направлений, определяющих требования к новым экспериментальным данным, является задача внедрения и использования программ вычислительной гидродинамики (CFD) для целей анализа и обоснования объектов использования атомной энергии.

Математические модели и численные методы решения уравнений, используемые в CFD программах, развиваются и используются с конца XIX в., однако активное промышленное использование CFD программ началось только в 70-ых годах прошлого века, вслед за развитием средств вычислительной техники. Первоначально эти программы использовались в основном в авиации и автомобилестроении. Их применение позволило существенно сократить объем экспериментальных исследований, заменив «продувку» конструкций численным расчетом. Из этого направления программы и получили свое название – «вычислительная

гидродинамика», отражающее их преимущественное применение к описанию изотермических течений.

Вследствие дальнейшего развития программ вычислительной гидродинамики и вычислительной техники (надо сказать, что эти два направления чрезвычайно сильно влияют друг на друга) актуальной стала задача использования CFD программ в других инновационных отраслях промышленности, в частности, в атомной энергетике.

Специфика атомной энергетике в высокой актуальности применения CFD программ для описания неізотермических течений, существенно определяющих такие важные характеристики объектов атомной энергетике, как надежность, ресурс, экономичность и безопасность. О перспективности указанного направления свидетельствует и объем его государственной поддержки, координируемой в развитых западных странах такими организациями, как OECD (Организация экономического сотрудничества и развития) и МАГАТЭ.

Важность и необходимость направления хорошо понимается и руководством нашей страны. В частности, решением комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России от 22.07.2009 одобрен проект создания и внедрения в инновационных отраслях промышленности РФ суперкомпьютерных технологий. В рамках этого проекта выполняются работы по двум базовым направлениям (создание высокопроизводительных многопроцессорных компьютеров и создание вычислительных программ, адаптированных к работе на СуперЭВМ) и по направлению внедрения разрабатываемых технологий в промышленности. Главным исполнителем работ по проекту и исполнителем работ по базовым направлениям проекта является ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» является одним из главных исполнителей работ по направлению внедрения суперкомпьютерных технологий в атомной энергетике. Важной задачей этого направления является развитие и внедрение отечественной программы CFD расчета ЛОГОС.

Общей проблемой на пути внедрения CFD в атомной энергетике является практически полное отсутствие представительных экспериментальных данных, необходимых для создания и обоснования технологии применения программ для описания неізотермических течений. Эта проблема актуальна для вновь создаваемой программы ЛОГОС. Для ее решения в ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» создана специализированная лаборатория гидродинамических испытаний, выполняющая экспериментальные исследования, представительные с точки зрения адаптации и верификации CFD программ.

В настоящее время в лаборатории гидродинамических испытаний осваивается и применяется технология измерений температурных полей с использованием тепловизора [1]. По этой технологии уже выполнена серия экспериментальных исследований смешения неізотермических потоков в Т-образное соединение.

Модель Т-образного соединения представляет собой соединение двух металлических труб прямоугольного сечения, одна из которых расположена горизонтально, другая – вертикально (рис. 1). Эта модель аналогична моделям, использовавшимся в уже ставших классическими работах [2, 3]. В работе [2] исследуется смешение изотермических потоков, отличающихся концентрацией растворенной примеси. Для измерения концентрации используются сеточные датчики, позволяющие измерить поле концентрации в сечении трубы. В работе [3] измерялись поля скоростей методом лазерного измерения скоростей мелких частиц (PIV) и температур потока в выделенных точках с использованием безинерционных термодпар.

Уникальность выполненных исследований заключается в использовании тепловизора для измерения поля температур, что обеспечивает возможность определения и анализа характера распределения температур в потоке. В связи с тем, что тепловизор измеряет температуру внешней поверхности модели, эта поверхность выполнена из специально подобранного материала минимальной технической возможной толщины, обеспечивающего минимальные инерционность и перетечки тепла вдоль поверхности стенки.

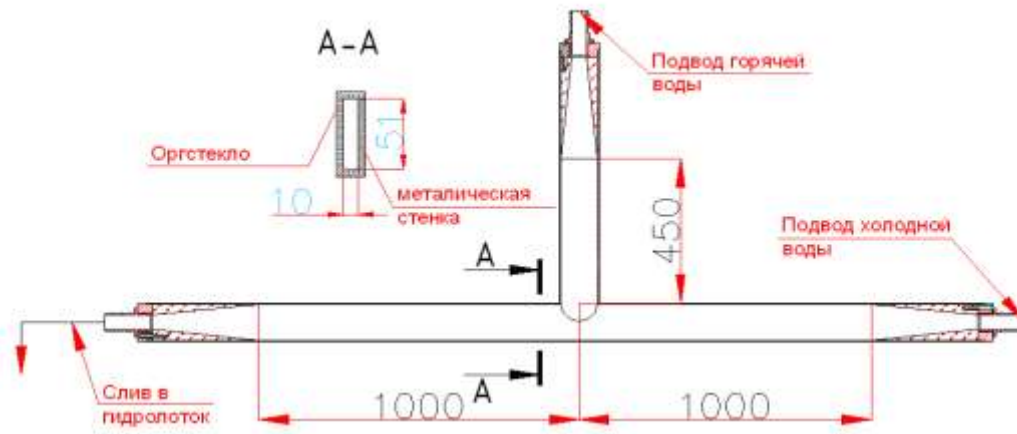


Рис. 1. Общий вид экспериментальной модели Т-образного соединения

Длины входных участков модели обеспечивают качественный турбулентный профиль скоростей. В отличие от модели [2], экспериментальная модель Т-образного соединения является плоской, что обеспечивает двумерность течения.

Таким образом, измеряя температуру внешней поверхности экспериментальной модели, мы получаем данные о пространственном и временном распределении температур в потоке.

В качестве примера выполненных исследований на рис. 2 приведены результаты измерения мгновенного поля температур и зависимость температуры в характерной точке экспериментальной модели от времени.

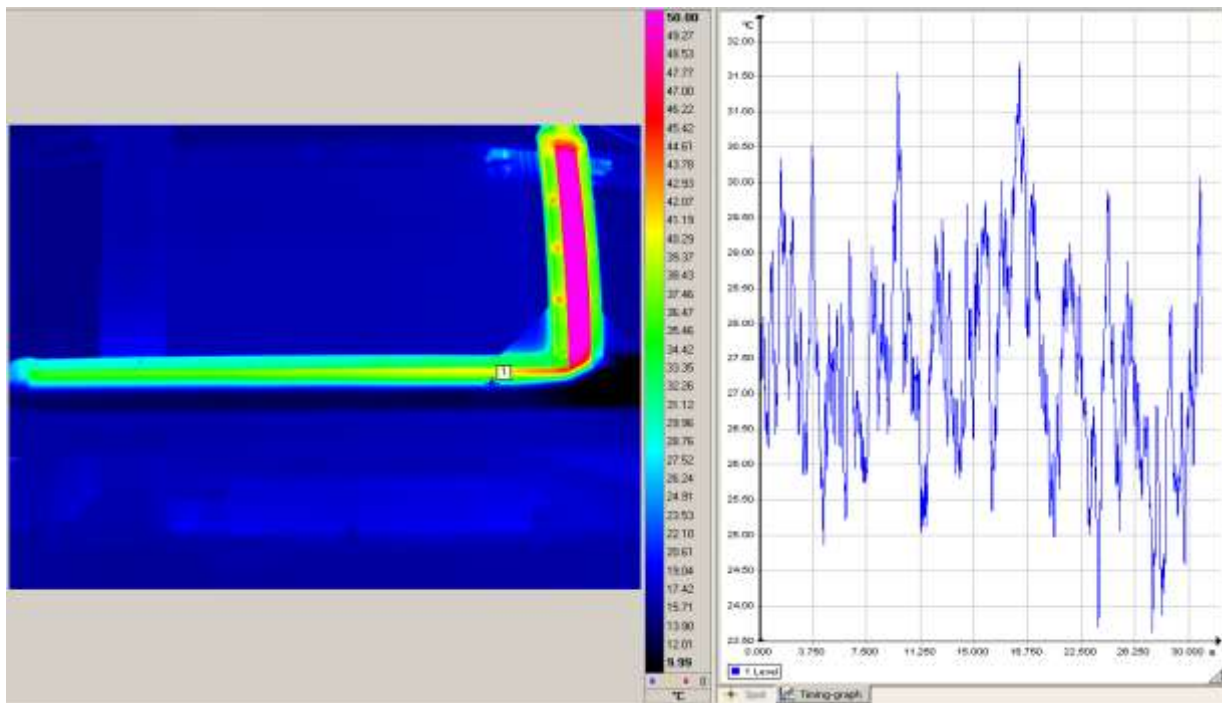
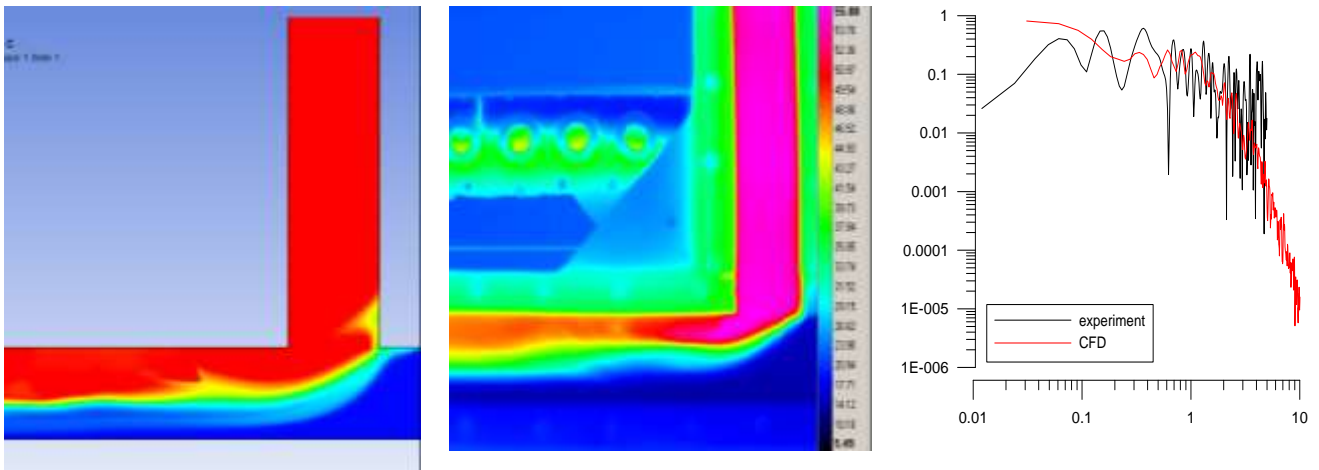


Рис. 2. Результаты эксперимента

Результаты экспериментальных исследований использовались для верификации CFD программ. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для одного из экспериментальных режимов представлено на рис. 3. Как видно из приведенных рисунков, имеет место

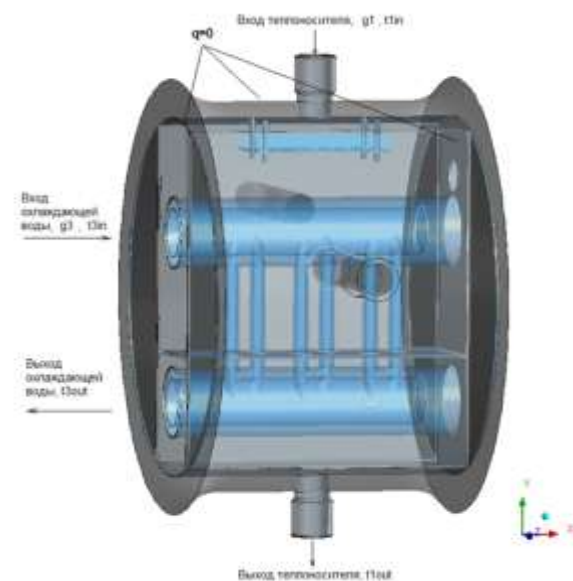


хорошее качественное и количественное совпадение осредненных (мгновенных) полей температур, полученных в расчете и экспериментально. Можно также отметить удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных частотных спектров вплоть до частот  $\sim 3-4$  Гц. Для более высоких частот расчетная амплитуда пульсаций оказывается существенно ниже экспериментальной. Этот эффект обусловлен недостаточно подробной сеткой, использованной в расчете. Однако, учитывая, что с инженерной точки зрения интерес представляют пульсации с частотами до  $1-2$  Гц, результаты расчета нестационарного поля температур также могут быть признаны удовлетворительными. Приведенные результаты подтверждают также эффективность примененного метода использования тепловизора для измерения пульсаций температур с частотами вплоть до  $\sim 5$  Гц.



**Рис. 3.** Расчетное (а), экспериментальное (б) мгновенное поле температур, расчетные и экспериментальные частотные спектры (в)

Верификационные расчеты экспериментальных задач, выполненных на геометрически простых моделях, качественно воспроизводящих отдельный физический эффект, являются важным этапом верификации CFD программ.



**Рис. 4.** Общий вид стенда (а) и расчетная модель (б)

Следующий необходимый этап верификации – сопоставление с экспериментальными данными, полученными на экспериментальных установках, воспроизводящих режимные параметры и конструктивные особенности элементов оборудования реакторных установок. Такие эксперименты проводятся в НГТУ им. Р.А. Алексеева по заказу ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова». В качестве примера можно привести экспериментальные исследования на стенде, моделирующем нестационарные температурные пульсации в коллекторе теплообменника. Общий вид стенда и расчетная модель, используемая в CFD расчете, приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведены характерные результаты расчета мгновенного (осредненного) поля температур и сравнения расчетных и экспериментальных частотных спектров. CFD расчеты таких экспериментов выполняются с учетом требований к пространственно-временной дискретизации и используемым моделям турбулентности, формируемым на описанном этапе верификации. Как видно из представленных результатов, хорошее совпадение расчетных и экспериментальных частотных спектров имеет место вплоть до частоты  $\sim 2$  Гц, что является достаточным с инженерной точки зрения.

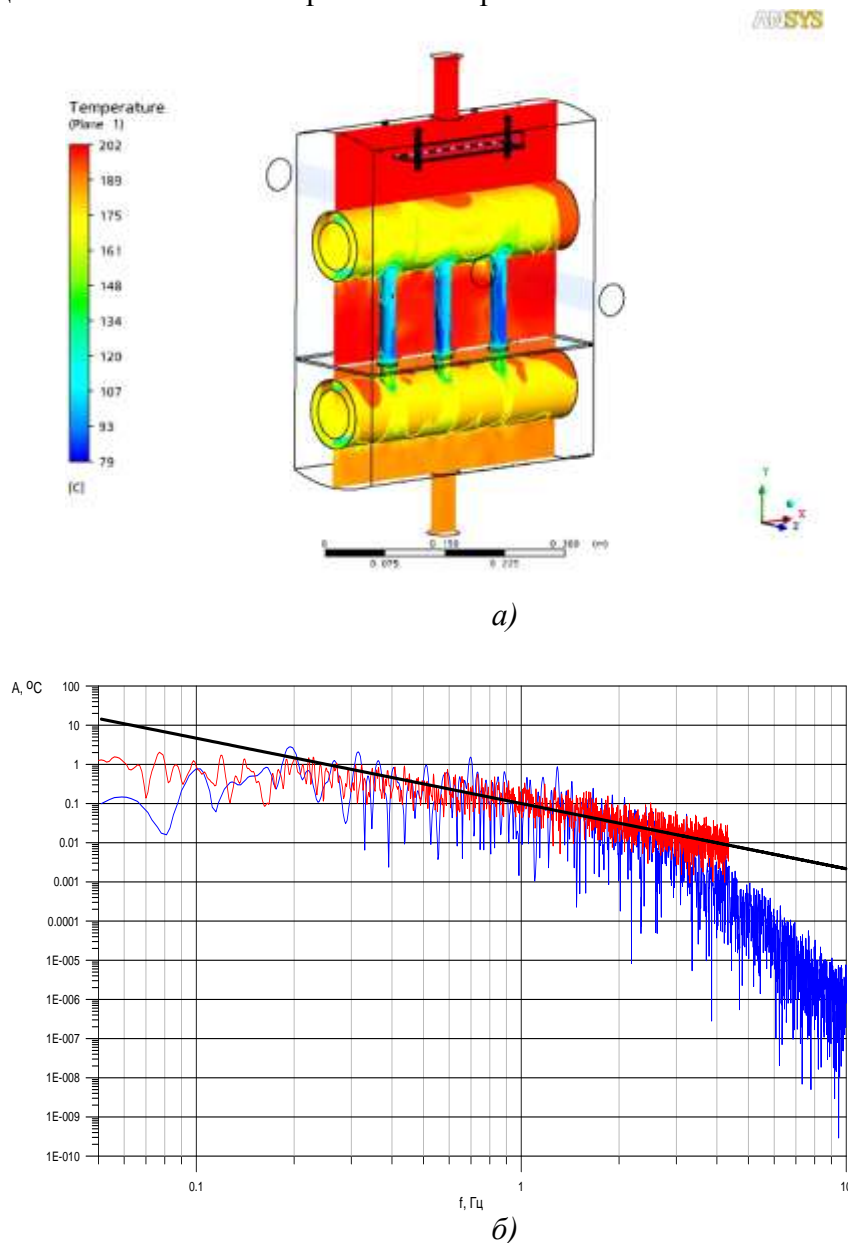


Рис. 5. Результаты расчета мгновенного поля температур (а) и сравнения расчетных и экспериментальных частотных спектров (б)

В ближайшей перспективе ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» планирует существенное расширение экспериментальных исследований для формирования экспериментальной базы, используемой при разработке, адаптации и верификации CFD программ. С этой целью в лаборатории реакторной гидродинамики, расположенной в НГТУ им. Р.А. Алексеева, запланированы и уже начаты подготовительные работы по созданию экспериментального стенда мирового уровня, обеспечивающего представительные экспериментальные данные для анализа процессов смешения неизотермических потоков в реакторных установках. Специфическими особенностями разрабатываемого стенда являются высокое потребление мощности (планируется до 1 МВт), высокие требования к возможности использования современных систем измерений в сочетании с возможностью обеспечения параметров среды, близких к натурным, значительные габаритные размеры экспериментальных моделей.

С учетом того, что использование современных систем измерения на стенде обеспечит хорошее качество визуализации экспериментальных данных, стенд будет являться также и ценной учебной базой для подготовки будущих специалистов в области атомной энергетики.

Разработка требований к стенду выполнена ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» совместно с НГТУ им. Р.А. Алексеева. На этапе разработки учтен передовой зарубежный опыт создания подобных стендов. В качестве их примера на рис. 6 приведен общий вид стендов ROCOM, (Германия) и Vattenfall, (Швеция), предназначенных для исследования процессов смешения в реакторе.



а)



б)

**Рис. 6. Общий вид стендов:**  
а – ROCOM; б – Vattenfall

Планируемый в лаборатории реакторной гидродинамики НГТУ им. Р.А. Алексеева стенд обеспечит экспериментальные данные, необходимые для адаптации и верификации CFD программ. Еще более эти данные будут востребованы при создании в РФ собственных импортозамещающих CFD кодов. Этот стенд будет важным элементом создаваемой новой технологии проектирования, основанной на максимальном использовании предсказательного расчетного моделирования на СуперЭВМ. Многие этапы на пути создания этой технологии уже пройдены, часть из них описаны в этой статье. Многое еще предстоит сделать...

#### Библиографический список

1. Пат. 112409 РФ, МПКН 04131/38. Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока № 200/09; заявл; опубл. 10.01.2012. Бюл. № 23.

2. **Zboray, R.** Investigations on Mixing Phenomena in Single-phase Flows in a T-Junction Geometry: The 12th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12) / R. Zboray [et al.] // Pittsburgh, Pennsylvania (U.S.A). 2007.
3. **Westin, J.** Thermal Mixing in a T-Junction. Model Tests at Vattenfall research and Development AB 2006. Boundary Conditions and List of Available Data for CFD-Validation: Report Memo U 07-26 // Älvkarleby (Sweden). Vattenfall R&D AB. 2007.
4. **Prasser, H.-M.** Weiss, Coolant mixing in a Pressurized Water Reactor: Deboration Transients, Steam-Line Breaks, and Emergency Core Cooling Injection / H.-M. Prasser [et al.] // Nuclear Technology. 2003. 143 (1). P. 37.
5. **Alavyoon, F.** Experimental and Computational Approach to Investigating Rapid Boron Dilution Transients in PWRs: CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients / F. Alavyoon [et al.] // State College, PA (USA). 1995.

*Дата поступления  
в редакцию 07.02.2012*

**M.A. Bolshukhin, A.V. Budnikov, D.N. Sveshnikov, D.N. Fomichev, V.P. Krepkov**

**ACTUAL ISSUES OF EXPERIMENTAL FACILITIES DEVELOPMENT  
TO VERIFY CFD CODES TO BE USED IN NUCLEAR POWER ENGINEERING**

Joint stock company “Afrikantov OKBM”

**Purpose:** To develop a technology of CFD codes usage to describe nonisothermic flows.

**Design/methodology/approach:** The experimental investigations have been presented which had been obtained applying patented technologies of thermal imager usage to measure temperature field in a flow.

**Findings:** Technology makes it possible to qualitatively measure a nonstationary field of temperatures and to reproduce temperature pulsations in the flow with frequencies up to ~ 5 Hz. Analysis results of performed experiments have been described which had been obtained using CFD codes; it has been shown that the analysis ensures correct reproducing of temperature field form and temperature pulsation spectrum with frequencies up to ~ 2Hz.

**Research limitations/implications:** Adaptation and verification CFD codes.

**Originality/value:** The technology usage makes it possible to considerably improve design quality of nuclear power engineering projects that is accompanied by simultaneous reduction of work periods and costs due to reduction of experimental development stage.

*Key words:* computational fluid dynamics, flow mixing, nuclear power engineering, experimental facilities, thermal imager.

УДК 621.039

А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.С. Купричева, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МАССООБМЕНА И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ В ТВС РЕАКТОРА КЛТ-40С**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С с дистанционирующими решетками.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, дистанционирующая решетка.

**Введение**

Приоритетным направлением развития атомной энергетики России является создание установок для комплексного электро- и теплоснабжения изолированных потребителей в удаленных районах, не имеющих централизованного энергоснабжения. В нашей стране это крупные населенные пункты и порты вдоль Северного Морского пути и побережья Дальнего Востока, месторождения полезных ископаемых; за рубежом – прибрежные районы развивающихся стран. Также возможно использовать энергоисточники данного типа для опреснения морской воды в регионах с дефицитом пресной воды.

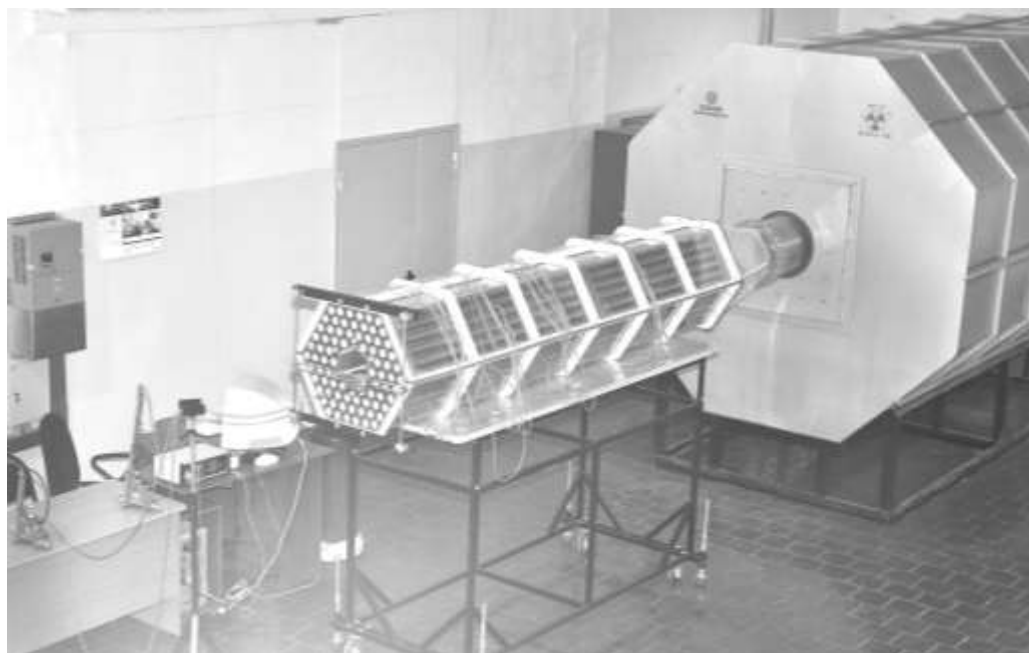
В настоящее время ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова» реализует проект атомной энергетической установки малой мощности на плавучих средствах. Энергоисточником такого «плавучего энергоблока» является реакторная установка КЛТ-40С. С одной стороны, разработка и комплексное научно-техническое обоснование активной зоны реактора КЛТ-40С является весьма важной задачей, с другой – кассетная активная зона реактора КЛТ-40С для первой в мире плавучей АЭС должна удовлетворять международным требованиям. Таким образом, решение этих задач обеспечит повышение технико-экономических показателей, инвестиционной привлекательности и экспортного потенциала российских плавучих АЭС.

Разработанная в «ОКБМ им. И.И. Африкантова» тепловыделяющая сборка (ТВС) для активных зон реактора КЛТ-40С должна отвечать всем требованиям к современному ядерному топливу, а именно: надежности, безопасности, экономичности и технологичности. Следовательно, для обоснования теплотехнической надежности активной зоны необходимо детально изучить и проанализировать локальные характеристики гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С.

**Экспериментальный стенд и методика проведения исследований**

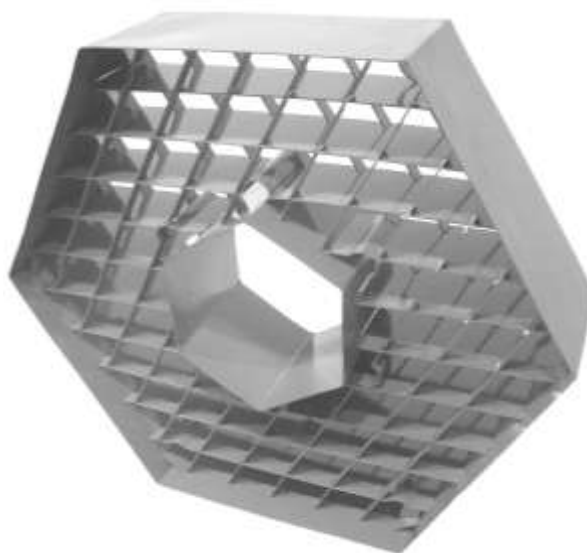
Учитывая сложность математического описания трехмерного течения жидкости в пучке твэлов, основным методом изучения гидродинамикиборок твэлов и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полноразмерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах [1]. Поэтому исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде (рис. 1) методом диффузии газового трассера на масштабной модели, которая представляет собой ТВС реактора КЛТ-40С. Модель выполнена с коэффициентом геометрического подобия  $K_g = 5,9$  и состоит из шести-

гранного чехла, семидесяти восьми цилиндрических твэлов-имитаторов, шести цилиндрических СВП-имитаторов, трех поясов дистанционирующих решеток.



**Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда**

Пояс дистанционирующей решетки представляет собой трехуровневый набор пластин ДР, заключенных в общий бандаж (рис. 2). Исследуемый пояс дистанционирующей решетки располагается на расстоянии 1500 мм от выходного сечения экспериментальной модели, что соответствует 255 мм натурального пролета между двумя ДР.



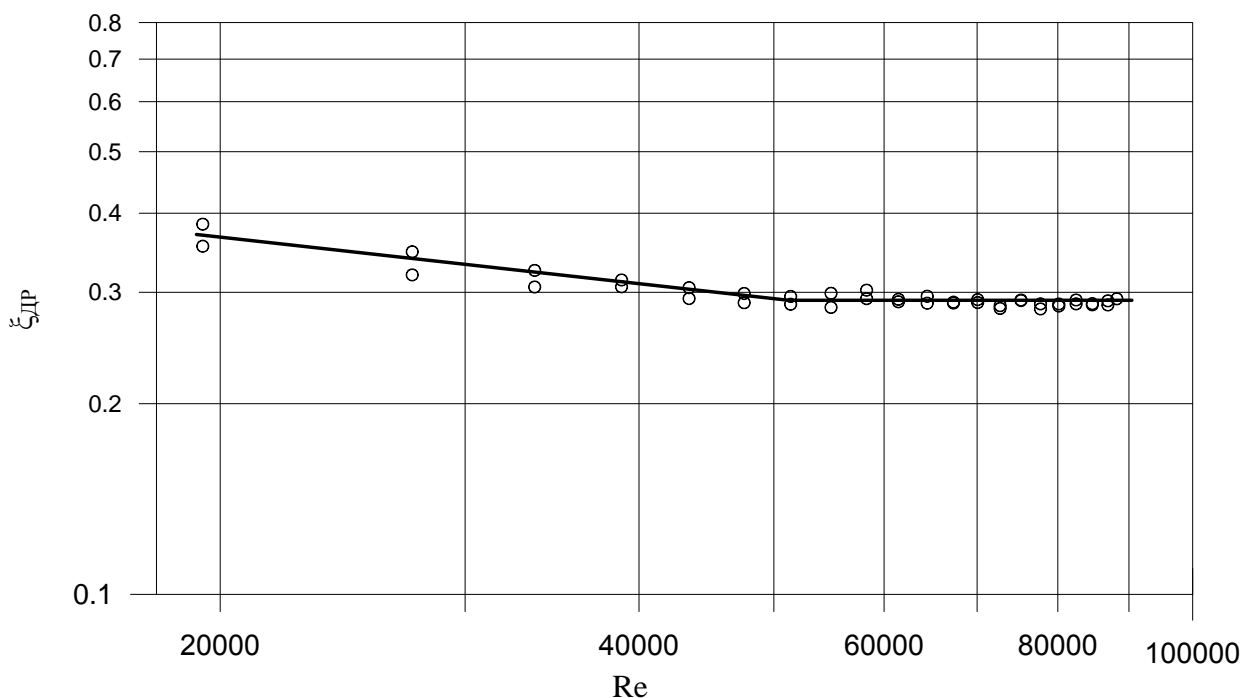
**Рис. 2. Пояс дистанционирующей решетки**

Для исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в модели ТВС РУ КЛТ-40С применялся метод диффузии примесей (метод трассера). Метод трассера основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (в данном случае газа) и относится к категории методов определения коэффициентов перемешивания [2].

Для измерения концентрации углеводородов  $C_nH_m$  в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, принцип которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения. Для управления и постоянного мониторинга экспериментальных данных, получаемых газоанализатором, разработан программный комплекс. В программном комплексе реализованы возможности построения графика изменения концентрации в зависимости от времени, а также непосредственный мониторинг динамики изменения концентрации в режиме реального времени и записи значений в файл [3].

Для обоснования представительности экспериментальных исследований массообменных и гидродинамических характеристик модели ТВС активной зоны реактора КЛТ-40С необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных дистанционирующих решеток ТВС реактора КЛТ-40С и дистанционирующих решеток экспериментальной модели. Результаты исследований зависимости коэффициента местного гидравлического сопротивления пояса дистанционирующей решетки от числа  $Re$  представлены на графике (рис. 3). Анализ результатов исследований коэффициентов гидравлического сопротивления показывает, что выбранная конструкция и геометрические характеристики дистанционирующей решетки в диапазоне чисел  $Re$  от 40000 до 90000 обеспечивают их необходимое гидравлическое сопротивление. По результатам проведенных исследований коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки ЭМ в зоне автомодельного течения составил  $\xi_{др} = 0,29$ .

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел  $Re$  от  $4 \cdot 10^4$  до  $9 \cdot 10^4$  на участке автомодельного течения теплоносителя, что подтверждено соответствующими исследованиями.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления пояса ДР ТВС реактора КЛТ-40С от числа  $Re$**

#### **Результаты исследования распределения концентрации трассера и аксиальной скорости за поясом дистанционирующей решетки ТВС реактора КЛТ-40С**

На основе полученных данных были построены графики зависимости концентрации трассера по длине экспериментальной модели от относительной координаты для характерных зон в поперечном сечении (рис. 4) за поясом дистанционирующей решетки, а также кар-

тограммы, позволяющие качественно визуализировать распределение трассера в поперечном сечении экспериментальной модели.

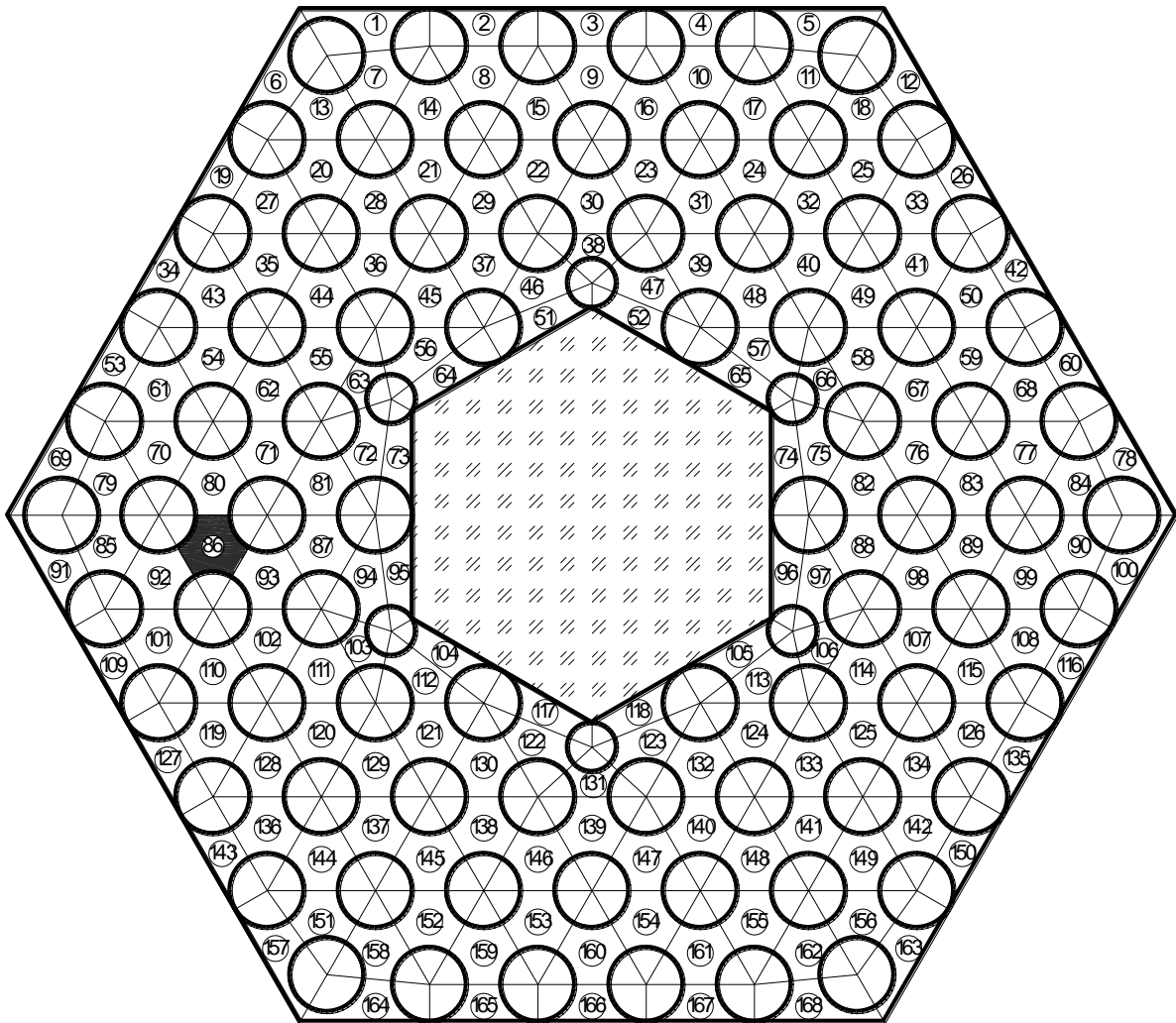


Рис. 4. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

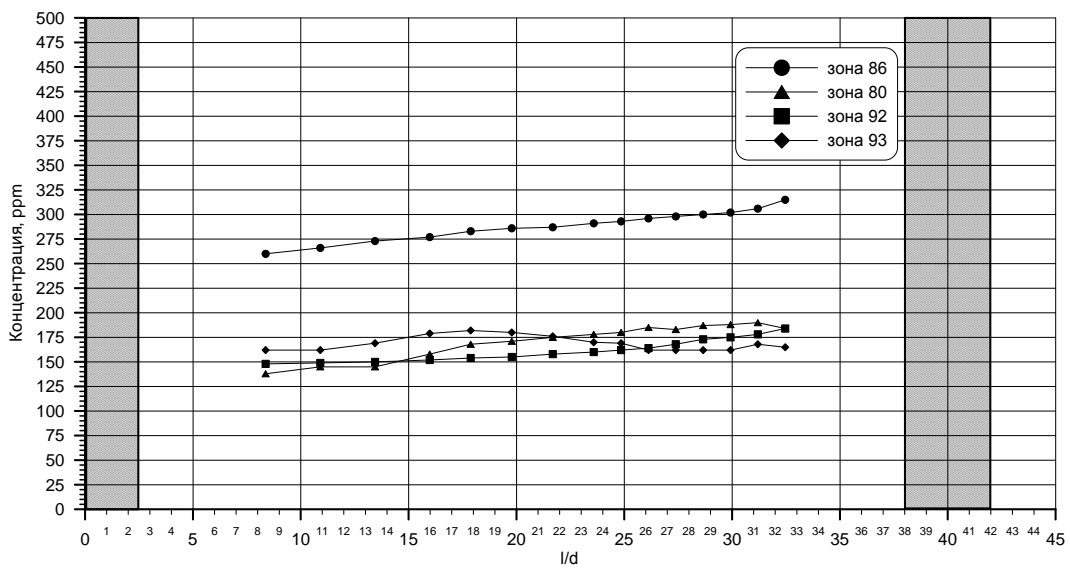
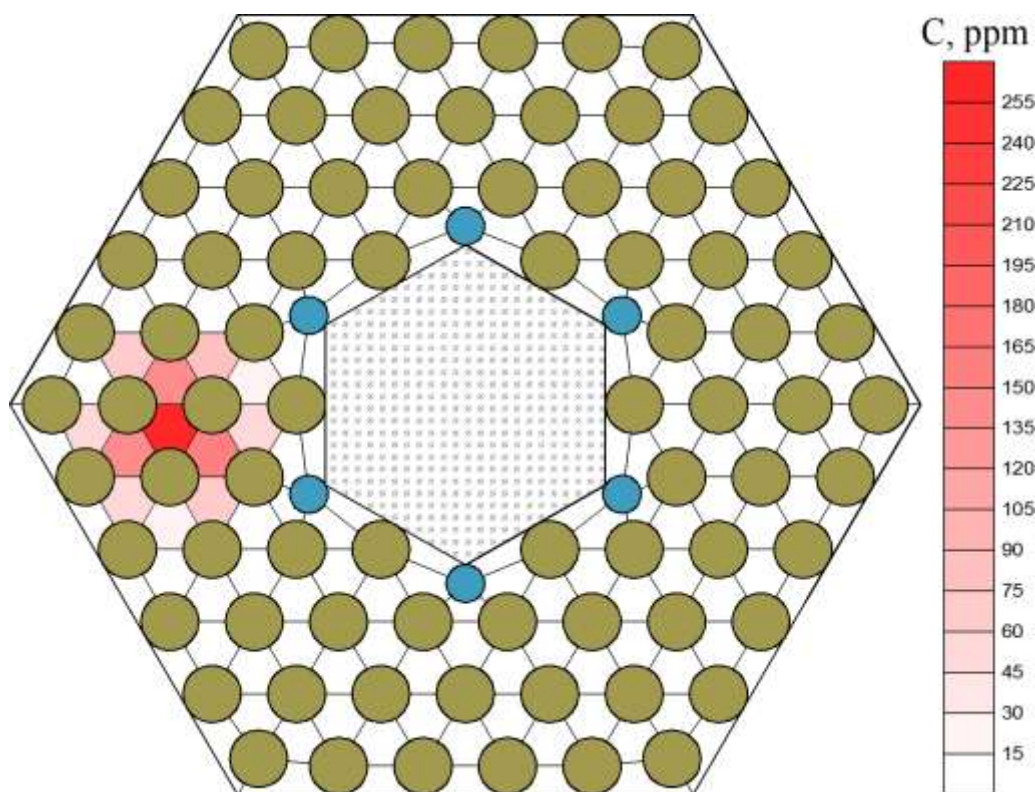


Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за поясом дистанционирующей решетки для зон № 86, 80, 92 и 93



Рассмотрев, как изменяется концентрация трассера из зоны инъекции №86 в соседние ячейки (рис. 5), можно отметить, что посредством механизма турбулентного переноса часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседнюю ячейку, смешиваясь при этом с основным осевым потоком.

На рис. 6 представлена картограмма распределения концентрации пропана в выходном сечении экспериментальной модели ТВС реактора КЛТ-40С. Следует отметить, что дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, не приводят к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя, так как распространение пропанового трассера в поперечном сечении ЭМ за дистанционирующей решеткой охватывает не более 11-ти ячеек вокруг точки инъекции. Это обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой дистанционирующей решетки, а также тем, что ТВС реактора КЛТ-40С имеет раздвинутый пучок твэлов ( $x = s/d = 1,46$ ). С другой стороны, такая пластинчатая решетка имеет «невысокое» гидравлическое сопротивление  $\xi_{др} = 0,29$ .



**Рис. 6. Распределение концентрации трассера в выходном сечении экспериментальной модели ТВС реактора КЛТ-40С**

На рис. 7 представлены графики изменения относительного расхода теплоносителя за поясом ДР по длине экспериментальной модели. Из анализа данного графика можно судить о разности расходов через характерные ячейки, относительно стандартной:

- в ячейке, прилегающей к СВП-стержням (№63) расход составляет 40% от расхода в стандартной ячейке;
- в периферийной ячейке (№34) расход составляет 50% от расхода в стандартной ячейке;
- в ячейке, прилегающей к вытеснителю (№51), расход составляет 60% от расхода в стандартной ячейке.

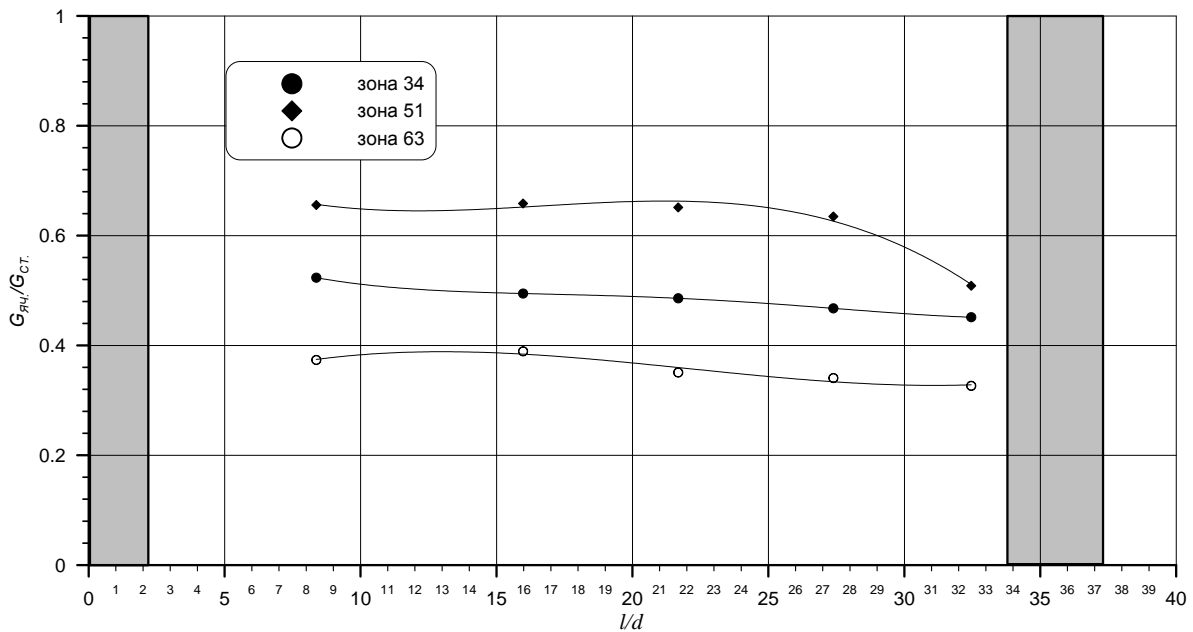


Рис. 7. График распределения расходов по длине экспериментальной модели в ТВС реактора КЛТ-40С

### Выводы

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию характеристик межъячеечного массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в КЛТ-40С с дистанционирующими решетками сделаны следующие выводы:

1. Посредством механизма турбулентного переноса, часть поперечного потока теплоносителя из каждой ячейки переходит в соседнюю ячейку, смешиваясь при этом с основным осевым потоком.

2. Дистанционирующая решетка ТВС реактора КЛТ-40С вносит возмущение в поток теплоносителя, вследствие чего возрастает интенсивность массообмена, характеризующаяся степенью турбулентности потока.

3. Применение дистанционирующих решеток, состоящих из пластин, не приводит к интенсивному перемешиванию потока теплоносителя. Это обусловлено меньшей перемешивающей способностью пластинчатой дистанционирующей решетки, а также тем, что ТВС реактора КЛТ-40С имеет раздвинутый пучок твэлов. С другой стороны, такая пластинчатая решетка имеет «невысокое» гидравлическое сопротивление.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и программ детального ячейечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов, с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Совета по Грантам Президента РФ, грант №МК-3172.2011.8.

### Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Исследования массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену: в 8 т. Т. 1. М., 2010. С. 177-180.
2. **Балыбердин, А.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР / А.С. Балыбердин [и др.] // Изв. вузов. Сер. Ядерная энергетика. 2010. №1. С. 42-48.

3. **Бородин, С.С.** Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора типа ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 1. С. 101–108.

*Дата поступления  
в редакцию 31.01.2012*

**A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, E.S. Kupricheva, D.N. Solntsev, V.D. Sorokin**

**INVESTIGATION OF LOCAL MASS TRANSFER AND EFFICIENCY  
OF SPACER GRIDS OF FUEL ASSEMBLY OF REACTORS KLT-40S**

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexseev

**Purpose:** Experimental research of local hydrodynamics and mass transfer of heat carrier in the KLT-40S nuclear reactor FA features.

**Design/methodology/approach:** The main method of hydrodynamics and mass transfer in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. For the local characteristics of intercellular mass transfer and hydrodynamics of the heat carrier in the KLT-40S nuclear reactor FA research the gas diffusion method was used.

**Findings:** The heat carrier flow features of the KLT-40S reactor were revealed. Local hydraulic resistance quotient of a spacer grid was estimated experimentally. Local hydrodynamic and mass transfer characteristics to figure out effective intercellular mass transfer of spacer grids in the KLT-40S nuclear reactor FA were found.

**Research limitations/implications:** The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the KLT-40S reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Joint Stock Company OKBM Afrikantov.

**Originality/value:** Topically of this article is in local hydrodynamics and heat carrier mass transfer research, and revealing features and conformity of heat carrier flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the KLT-40S reactor active zone.

*Key words:* nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of heat carrier, mass transfer, spacer grid.

УДК 536.24

Р.М. Лапшин, Г.Ю. Макаров, Н.П. Тарасова

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ТЕРМОСИФОНАХ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрена математическая модель динамики течения двухфазной среды в объеме испарительных термосифонов (ИТС). Приведены результаты экспериментальных исследований пульсационных режимов.

*Ключевые слова:* математическая модель с сосредоточенными параметрами, анализ автономной системы, методика и результаты экспериментов по гидродинамике и теплообмену.

Специфической особенностью двухфазных ИТС является возможность существования низкочастотного пульсирующего режима кипения в условиях пониженного давления теплоносителя, заполняющего термосифон. Такой режим, называемый иногда "гейзерным эффектом", характерен для кипения в большом объеме при низких давлениях воды ионных, органических и жидкометаллических теплоносителей. Анализ публикаций показывает сходство неустойчивого кипения с условиями парообразования в испарительных термосифонах. Опыты обнаруживают, что ниже определенного для каждого теплоносителя давления насыщения наблюдается флуктуационный режим кипения, характеризующийся периодической схемой вскипания и спокойного состояния жидкости. С ростом тепловой нагрузки частота флуктуаций возрастает, постепенно отдельные состояния кипения сливаются между собой. Неустойчивость кипения и связанные с этим особенности теплоотдачи при кипении в условиях вакуума авторы публикаций объясняют уменьшением растворимости газов в жидкостях и изменением термического сопротивления на границе греющая стенка – теплоноситель. При больших давлениях всегда имеется достаточное количество газовых зародышей паровых пузырей, т.е. большое число центров парообразования, обеспечивающих нормальное пузырьковое кипение. В условиях пониженного давления число центров парообразования уменьшается, что приводит к сильному перегреву жидкости относительно температуры насыщения, в результате чего создаются предпосылки к эпизодическому бурному вскипанию – флуктуационному режиму кипения.

Наблюдения за теплогидродинамическими режимами переноса тепла в ИТС различной конструкции (подобных рис. 1) указывают на возможность другого сценария событий. В процессе кипения существуют интенсивное движение жидких масс, а при пониженных давлениях, где плотность паров невелика, скорости жидкости и связанные с последними инерционные нагрузки увеличиваются. Это создает предпосылки к формированию автоколебательной системы, в которой постоянно действующим источником энергии служит нагревательный элемент, воздействующий на колебательную систему в виде жидкой массы, заполняющей обогревательный объем. Двигающаяся часть жидкой фазы, формируя поле давления на поверхности нагрева, через уравнение состояния регулирует поступление энергии в паровой объем, что служит обратной связью процесса. Важность учета механической стороны явления пульсирующего кипения в испарительных термосифонах обнаружилась при испытаниях различных по размерам устройств с различными конструкциями нагревателей и устройств отвода тепла.

Для изучения теплогидродинамических режимов при малых давлениях проводились теоретические и экспериментальные исследования. Схематическое изображение отдельных стадий процесса парообразования в объеме заполняющей термосифон жидкости приведено

на рис. 1, иллюстрирующем эволюцию парового объема в течение одного цикла. Паровой объем существует либо отдельного пузыря, либо, в виде группы мелких пузырей, всплывающих с примерно одинаковой групповой скоростью.

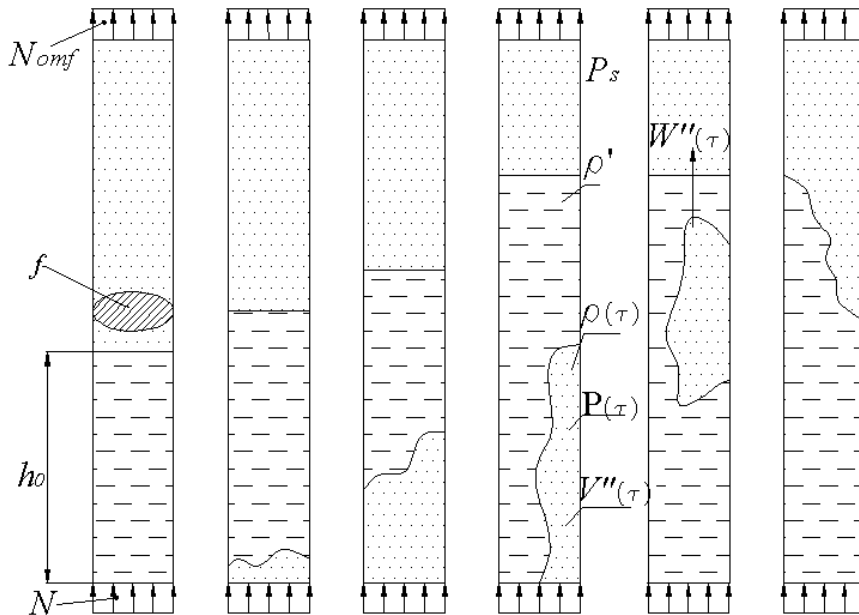


Рис. 1. Схема протекания флуктуационного режима кипения

Рассмотрим упрощённую динамическую модель течения ПЖС в ИТС.

Уравнение неразрывности для пара, занимающего в произвольный момент времени  $\tau$  объём  $V''(\tau)$ , при подводе постоянной во времени мощности  $N$  в сосуде с площадью поперечного сечения  $f$  и долей сечения занятого паром  $\bar{\varphi}$  :

$$\frac{d}{d\tau} = [V''(\tau)\rho''(P)r] = N - \omega f \bar{\varphi} \rho''(P)r. \quad (1)$$

Давление парообразования  $P(\tau)$ , то есть давление в нижней части объема термосифона, ориентированного к вертикали под углом  $\gamma$ , с высотой заливки  $h_0$  определяется с учетом движения массы жидкости плотностью  $\rho'$  и давления в паровом объеме термосифона  $P_s$  на основании теоремы о движении центра инерции жидкой составляющей рассматриваемой системы:

$$\frac{d^2V(\tau)}{d\tau^2} = \frac{f}{\rho'h_0} P(\tau) - f \left( \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right). \quad (2)$$

Уравнение состояния пара учитывает приблизительное постоянство удельной теплоты парообразования  $r$  и плотности жидкой фазы  $\rho'$  в диапазоне изменения давления  $P(\tau)$  и запишется в виде линейной зависимости

$$\rho''(P) = kP(\tau), \quad (3)$$

где  $k = 5,85 \cdot 10^{-6} [\text{г/см}^3/\text{Аэ}]$  для воды.

Представляя отводимую мощность, то есть второе слагаемое «паровой» части уравнения (1), не в виде скорости движения пара  $\omega$ , умноженной на объёмное паросодержание  $\bar{\varphi}$ , а с учётом времени движения парового пузыря через двухфазную зону  $\Delta\tau$ , преобразуем уравнение (1), учитывая уравнение (3), к виду

$$kP(\tau) \frac{dV''(\tau)}{d\tau} + V''(\tau)k \frac{dP(\tau)}{d\tau} = \frac{N}{r} - \frac{V(\tau)kP(\tau)}{\Delta\tau}.$$

Исключая функцию  $P(\tau)$  с помощью (2), приходим к нелинейному дифференциальному уравнению третьего порядка для объёма пара в испарительной зоне термосифона, описывающему данную термомеханическую автоколебательную систему:

$$\begin{aligned} \frac{d^3V''(\tau)}{d\tau^3} &= \frac{d^2V''(\tau)}{d\tau^2} \left[ \frac{1}{V''(\tau)} \frac{dV''(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{\Delta\tau} \right] + \\ &\frac{dV''(\tau)}{d\tau} \frac{1}{V''(\tau)} f \left[ \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right] - \\ & - \frac{1}{V''(\tau)} f \frac{N}{\rho'h_0rk} + \frac{1}{\Delta\tau} f \left[ \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right] = 0. \end{aligned}$$

Соответствующая автономная система уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dV''(\tau)}{d\tau} &= y = P(y, z, V''), \\ \frac{d^2V''(\tau)}{d\tau^2} &= \frac{dy}{d\tau} = z = Q(y, z, V''), \\ \frac{d^3V''(\tau)}{d\tau^3} &= \frac{dz}{d\tau} = \frac{d^2y}{d\tau^2} = -zy \frac{1}{V''(\tau)} - z \frac{1}{\Delta\tau} - \\ & - y \frac{f}{V''(\tau)} \left[ \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right] + \frac{f}{V''(\tau)} \frac{N}{\rho'h_0rk} - \\ & - \frac{f}{\Delta\tau} \left[ \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right] = R(y, z, V'') \end{aligned}$$

и обладает единственным положением равновесия при

$$\frac{d^2V''(\tau)}{d\tau^2} = 0, \quad \frac{dV''(\tau)}{d\tau} = 0, \quad V''_0 = \Delta\tau \frac{N}{rk} \frac{1}{P_s + \rho'h_0g \cos(\gamma)}.$$

Линеаризация системы в окрестности точки равновесия приводит к характеристическому уравнению

$$\chi^3 + \sigma\chi^2 + \Delta\chi + \Theta = 0. \tag{4}$$

Данное положение равновесия является простым, поскольку якобиан системы не равен нулю.

$$\Theta(y_0, z_0, V_0) = \begin{vmatrix} P'_y & P'_z & P'_V \\ Q'_y & Q'_z & Q'_V \\ R'_y & R'_z & R'_V \end{vmatrix} = -\frac{f(P_s + \rho'h_0g \cos(\gamma))^2 rk}{\Delta\tau^2 N \rho'h_0} \neq 0.$$

Характер положения равновесия определим, анализируя коэффициенты характеристического уравнения и определяя его корни. Имеют место один действительный отрицательный и два мнимых корня:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= -\frac{1}{\Delta\tau}, \\ \chi_{2,3} &= \pm if \left( \frac{P_s}{\rho'h_0} + g \cos(\gamma) \right) \sqrt{\frac{\rho'h_0rk}{\Delta\tau fN}}. \end{aligned} \tag{5}$$

Выражение (5) дает возможность оценки частоты пульсаций паросодержания в виде

зависимости, включающей в себя все основные параметры рассматриваемой автоколебательной системы: подводимую мощность, свойства жидкости и её массу, высоту заполнения и давление в термосифоне.

Экспериментальные исследования явления проводились на специально изготовленной прозрачной модели ИТС с прокипяченной водой в качестве РТ. Схема устройства, основные параметры обслуживающих систем и приборное оснащение представлены на рис. 2. Для измерения высокочастотных пульсаций паросодержания применялся фотоэлементный индикатор прозрачной среды.

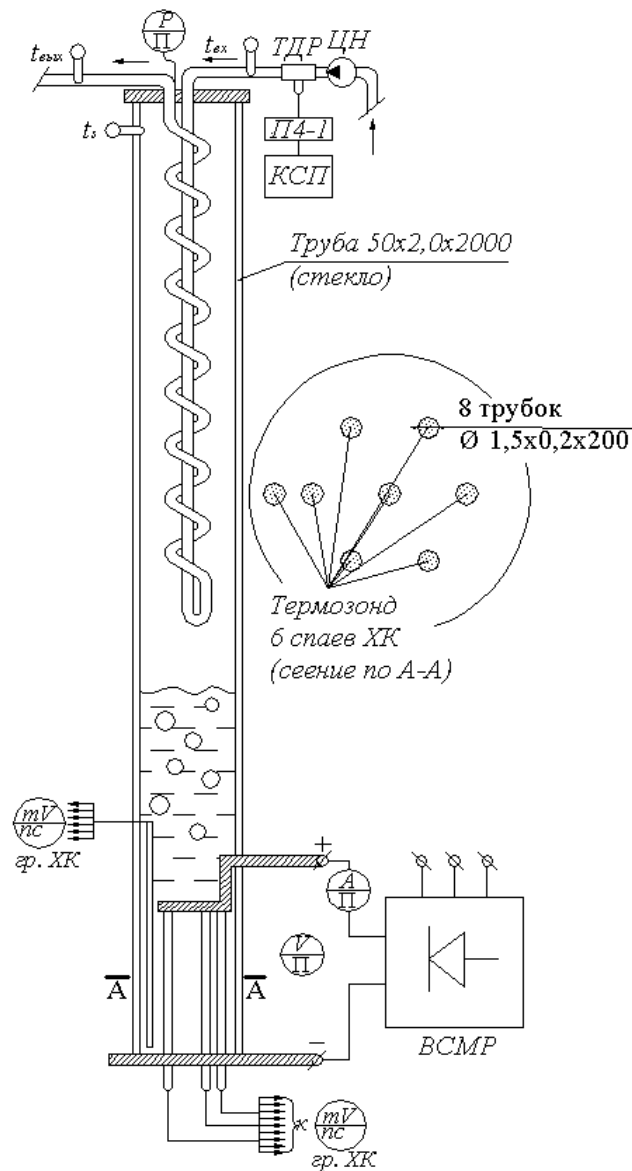
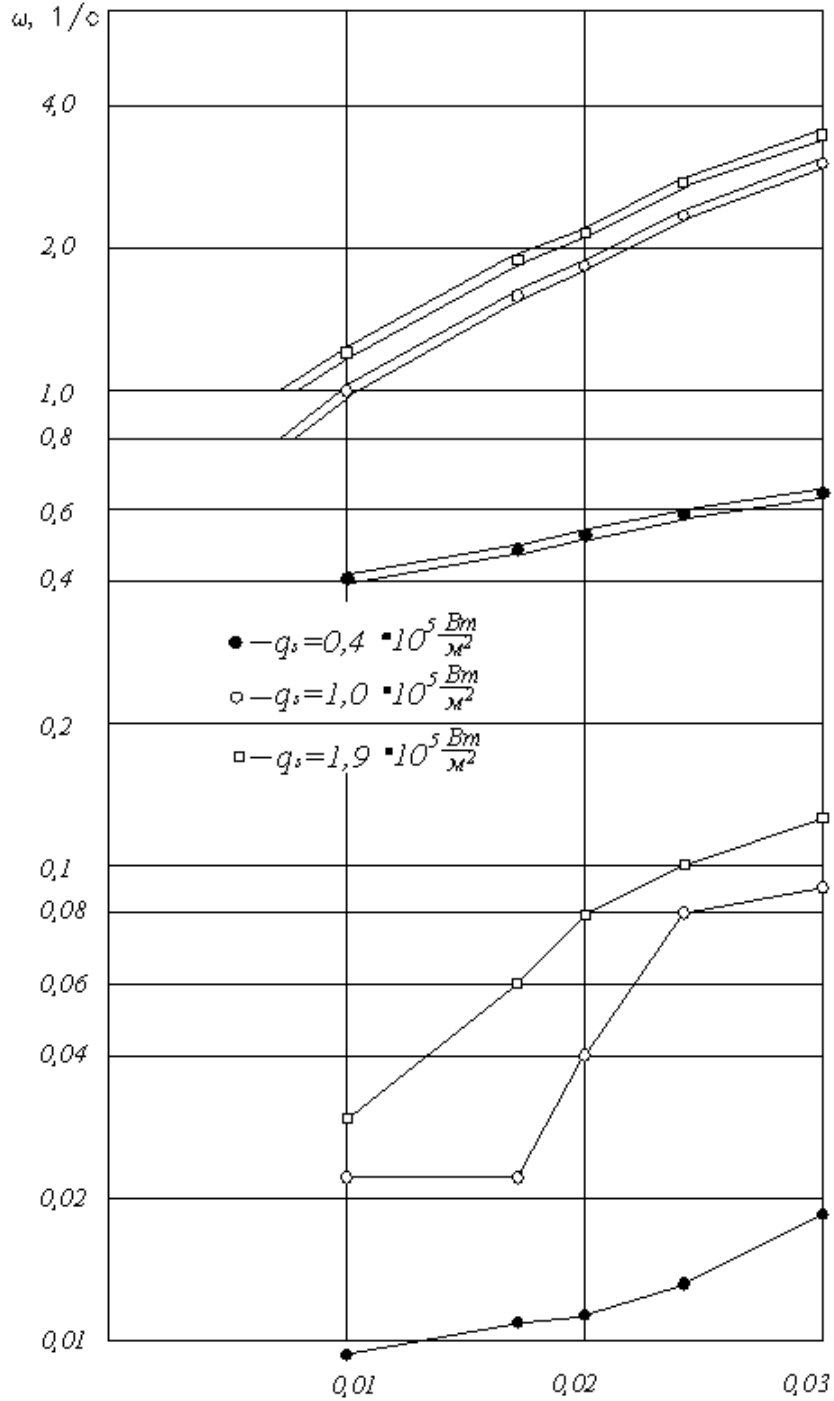


Рис. 2. Схема опытной установки экспериментального стенда

На рис. 3 представлены данные измерений значений частоты пульсаций паросодержания в прозрачном опытном термосифоне, выполненном по схеме рис. 2. Абсолютное давление в системе служило аргументом опытов при плотности теплового потока как параметре. Диапазон варьирования этих величин указан на рис. 3. Наблюдаются колебания функции  $V''(\tau)$  двух частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , которые отличаются по величине на два порядка.

Высокочастотные колебания представляют собой пульсирующий в районе нагревателя паровой объём в виде пузырьков малого размера.



**Рис. 3. Частота пульсаций паросодержания в системе в зависимости от давления при различных плотностях теплового потока**

Низкочастотные колебания паросодержания представляют собой периодически всплывающие агломерации паровых пузырей, причём это сопровождается колебаниями температуры жидкости  $t_s(\tau)$  и стенки нагревателя  $t_w(\tau)$ , пример записи которых приведен на рис. 4. В приведенном примере коэффициент теплоотдачи в течение одного цикла изменяется почти в четыре раза. Среднее значение термического сопротивления теплоотдачи на поверхности кипения оценивается величиной  $0,5 \cdot 10^{-4}$  и соответствует рекомендуемой для инженерных расчетов эмпирической зависимости.



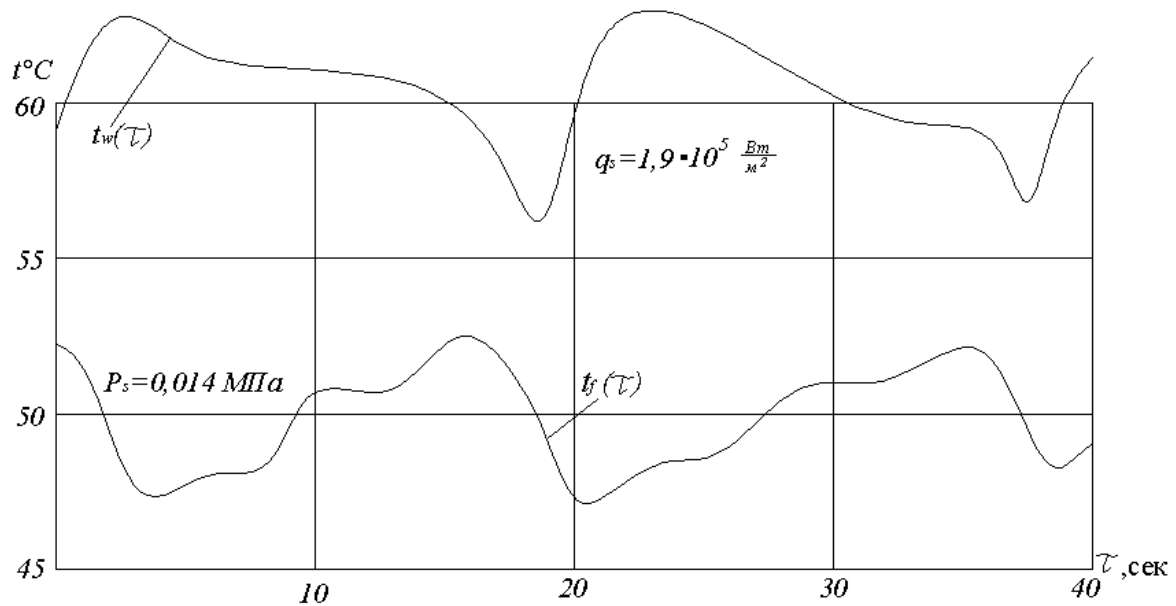


Рис. 4. Оциллограмма температур стенки нагревателя и жидкости в режиме флуктуации

#### Выводы

Проведённые исследования позволяют оценить частоту пульсаций паросодержания в виде зависимости, включающей в себя основные параметры автоколебательной системы: подводимую мощность, свойства жидкости и её массу, высоту заполнения и давление в термосифоне.

Экспериментальные исследования в диапазоне тепловых потоков  $0,075 \cdot 10^5 < q_s < 3,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, давлений  $0,0085 < P < 0,15$  МПа показали, что средний коэффициент теплоотдачи в пучке стержней выше, чем для одиночного стержня.

1. **Кравец, В.Ю.** Пульсационные явления в закрытых двухфазных термосифонах. Национальный технический университет Украины. – 2009 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/znpnsnu/2010\\_4/Z36R1S5.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/znpnsnu/2010_4/Z36R1S5.pdf).

Дата поступления  
в редакцию 31. 01.2012

**R.M. Lapshin, G.Y. Makarov, N.P. Tarasova**

#### NON-STATIONARY MODES OF A HEAT TRANSFER IN EVAPORATION THERMOSIPHONS AT LOW PRESSURE

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexseev

The article consists of a mathematical model of the dynamics of the current two-phase medium in the amount of evaporation thermosiphons. There are results of experimental studies of pulsation modes.

*Key words:* mathematical model with concentrated parameters, the analysis of autonomous systems, methods and results of experiments on the hydrodynamics and heat transfer.

УДК 621.396

В.А. Малахов, К.В. Попков, А.С. Раевский

**КОМПЛЕКСНЫЕ ВОЛНЫ И КОМПЛЕКСНЫЙ РЕЗОНАНС В СТРУКТУРАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОПЛЁНКАМИ НА ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТАХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются поверхностные плазмон-поляритонные волны в структурах с одной и двумя параллельными серебряными плёнками. Особое внимание уделяется собственной комплексной волне, возникающей на двузначном участке дисперсионной характеристики антисимметричной волны. Приводятся результаты расчётов продольных волновых чисел волн при учёте частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости серебра на оптических частотах ниже частоты плазмонного резонанса. Обсуждается явление комплексного плазмонного резонанса.

*Ключевые слова:* комплексные волны, поверхностные плазмон-поляритонные волны, дисперсия, комплексный плазмонный резонанс.

К настоящему времени достаточно хорошо исследованы спектры собственных волн всевозможных экранированных и открытых волноведущих электродинамических систем (волноводов) СВЧ и КВЧ диапазонов. Для структур, описываемых несамосопряженными электродинамическими операторами [1], характерно наличие в спектре собственных *комплексных волн* (КВ) [2]. Основным физическим свойством КВ является то, что они имеют нулевой по поперечному сечению волновода в среднем за период поток мощности. Данный феномен объясняется наличием распределенного разворота мощности, происходящего из-за сложных дифракционных явлений на границах раздела областей неоднородных по поперечному сечению направляющих структур [2]. При этом возникают встречные потоки мощности в областях поперечного сечения [3].

Известно [4], что на границе раздела двух сред, диэлектрическая проницаемость одной из которых отрицательна, могут возникать поверхностные волны. Самым важным свойством этих волн является сильная локализация поля вблизи поверхности раздела, возникающая из-за того, что перпендикулярные к границе раздела составляющие волнового вектора являются мнимыми величинами, в результате чего поля спадают экспоненциально при удалении от границы раздела.

В последнее время в связи с бурным развитием металлооптики и наноплазмоники [5–8] проявляется большой интерес к исследованию свойств поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), волн, которые могут распространяться вдоль поверхности металл-диэлектрик в области частот

$$\omega < \omega_{sp} = \omega_{pl} / \sqrt{\epsilon_d + 1},$$

где  $\omega_{pl}$  - плазмонная частота электронов, на которой, согласно формуле Друде, при увеличении частоты действительная часть диэлектрической проницаемости металлов меняет знак с отрицательного на положительный;  $\epsilon_d$  - диэлектрическая проницаемость среды, граничащей с металлом.

В частности, в работе [7] исследовались ППП, распространяющиеся по тонким металлическим пленкам. Решение дисперсионного уравнения ТМ-волн в такой структуре имеет две ветви, которым по структуре поля соответствуют симметричная (относительно пленки) и антисимметричная волны. В [7] показано, что при определенных параметрах  $a, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  структуры (рис. 1), существует диапазон частот, в котором антисимметричная волна имеет

отрицательную групповую скорость, дано объяснение этому явлению на основе макроскопического подхода с использованием понятия диэлектрической проницаемости  $\epsilon(\omega)$ : поток вектора Умова-Пойнтинга, являясь отрицательным в металле на частотах ниже  $\omega_{pl}$ , становится в пленке больше по модулю суммарного потока в средах над и под пленкой.

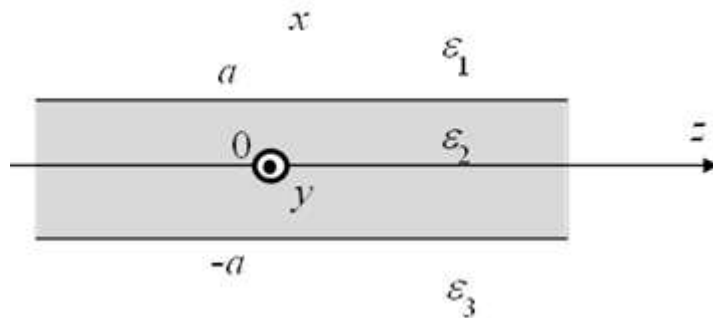


Рис. 1. Направляющая структура с одной металлической плёнкой

В [7] указывается, что на определенной частоте выполняется условие нулевой групповой скорости, то есть условие резонанса, и предлагается использовать данный эффект при создании высокочастотных резонаторов, однако результаты исследования комплексных решений дисперсионного уравнения, возникающих на частоте резонанса, не приводятся.

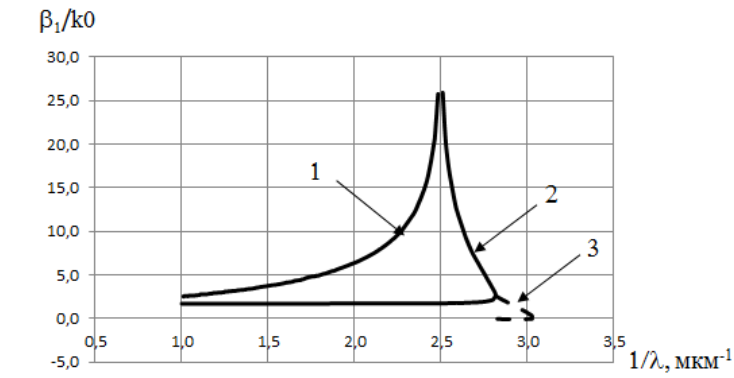
Целью настоящей работы является исследование комплексной ветви решений, возникающей в частотной точке, соответствующей смене знака групповой скорости. С использованием трехслойной модели структуры (рис. 1), из условия равенства на границах раздела сред тангенциальных компонент электромагнитного поля было получено дисперсионное уравнение ТМ-волн, решения которого для случая серебряной пленки с  $a = 5$  нм, окруженной средами с  $\epsilon_{2,3} = 2,84$  ( $Al_2O_3$ ), приведены на рис. 2, а. Решения с графической точностью совпадают с результатами, приведенными для данных параметров в [7]. Для описания диэлектрической проницаемости серебра использовалось выражение [7]

$$\epsilon_2 = \epsilon_r - \omega_{pl}^2 / \omega^2, \quad (1)$$

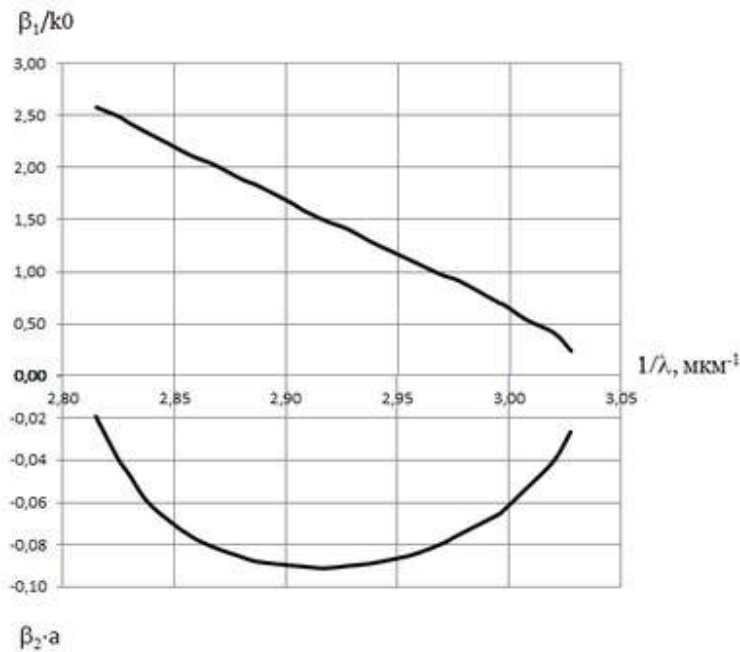
где для серебра  $\epsilon_r$  - константа, учитывающая межзонные переходы в металле;  $\omega_{pl} = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e} \approx 1,43 \times 10^{16} \text{ (}\tilde{n}^{-1}\text{)}$  [4];  $e, m_e, n_e$  - заряд, масса электрона и концентрация электронов проводимости соответственно.

На рис. 2 по вертикали отложено значение постоянной замедления  $\beta/k_0$ , где  $\beta$  - продольная составляющая волнового вектора;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  - волновое число свободного пространства. Пунктиром (характеристика 3) показана характеристика собственной КВ, возникающей в частотной точке смены знака групповой скорости. Для КВ  $\beta = \beta_1 + i\beta_2$ , причем  $\beta_2 < 0$ , что свидетельствует на убывающий по оси  $z$  характер поля этой волны.

На рис. 2, б показаны характеристики дисперсии и затухания собственной КВ (рис. 2, а, волна 3) в более крупном масштабе. На рис. 3 приведен фрагмент дисперсионной характеристики антисимметричной волны (рис. 2, а, волна 2) вблизи частотной точки возникновения КВ. На участке 1-3 групповая скорость положительна, в т.3 она обращается в нуль, на участке 3-2 становится отрицательной. Поток мощности, переносимой волной в металлической пленке, направлен противоположно фазовой скорости волны, в средах над и под пленкой – в сторону фазовой скорости. Суммарный поток может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от значения продольного волнового числа антисимметричной волны.

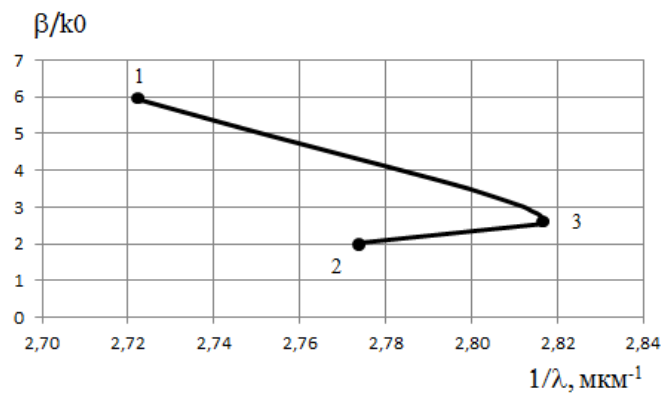


a)



b)

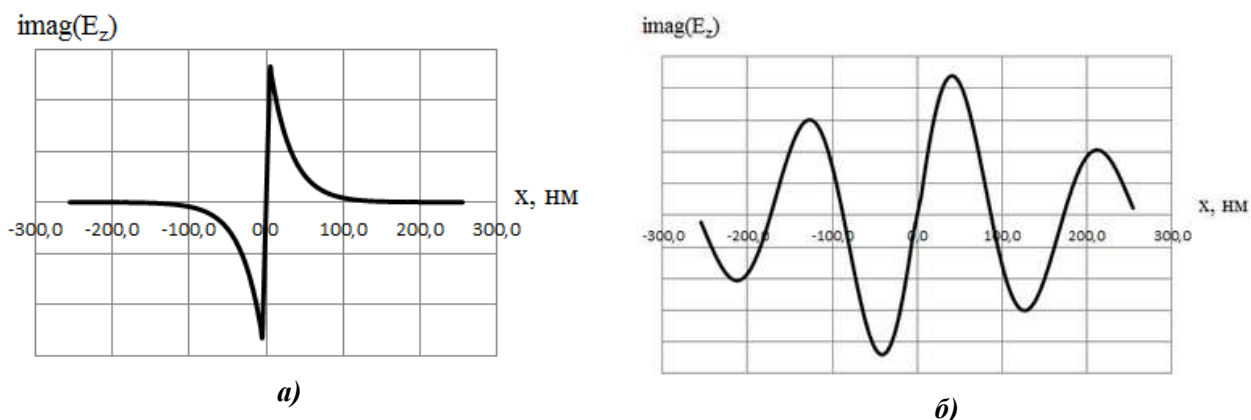
**Рис. 2. Характеристики дисперсии и затухания волн плёнки:**  
 а– 1 – симметричная волна; 2 – антисимметричная; 3 – комплексная волна;  
 б – комплексная волна



**Рис. 3. Дисперсионная характеристика собственной комплексной волны**

Собственная КВ, возникающая в т. 3 (рис. 3), во всем диапазоне существования имеет нулевой в среднем за период поток мощности. На рис. 4 показаны распределения компонен-

ты  $E_z$  поля антисимметричной волны (рис. 4, а) и собственной КВ (рис. 4, б). Видно, что для КВ характерно осциллирующее с убывающей амплитудой по поперечной координате  $x$  поведение продольной компоненты поля  $E_z$  вне пленки. Дело в том, что  $E_{z_1} \sim e^{-i\alpha_1(x-a)}$ ;  $E_{z_3} \sim e^{i\alpha_3(x+a)}$ , где  $\alpha_{1,3} = \sqrt{\epsilon_{1,3}\mu_0\omega^2 - \beta^2}$  - поперечные волновые числа в областях над и под пленкой. У антисимметричной волны, если пренебрегать потерями в пленке,  $\beta$  - чисто действительная величина;  $\alpha_{1,3}$  - чисто мнимые отрицательные, что дает экспоненциальное убывание поля по координате  $x$ .



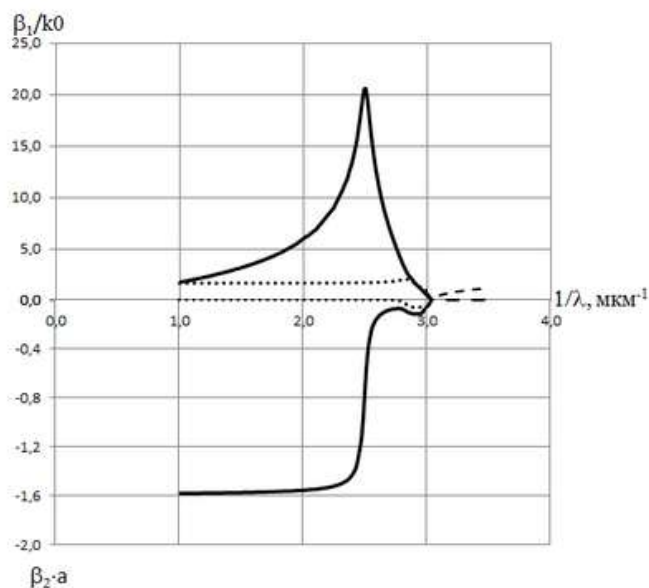
**Рис.4. Распределения продольной компоненты  $E_z$  электрического поля:**  
 а – антисимметричной волны; б – собственной комплексной волны

В реальных условиях диэлектрическая проницаемость благородных металлов на оптических частотах при  $\omega < \omega_{pl}$  является комплексной величиной  $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$ . Реальная часть  $\epsilon'_2$  определяется формулой (1), а мнимая [5]

$$\epsilon''_2 = \frac{\omega_{pl}^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)}. \quad (2)$$

Здесь  $\tau$  - время релаксации свободного электронного газа; для Ag  $\tau = 40$  фс [5].

На рис. 5 приведены характеристики дисперсии и затухания антисимметричной волны.



**Рис. 5. Характеристики дисперсии и затухания волн при учёте потерь в плёнке**

При учете потерь в металле характеристика продольного волнового числа  $\beta_1/k_0$ , соответствующая собственной КВ (рис. 2, б), раздваивается. В результате получаются две характеристики: одна соответствует горизонтальному участку антисимметричной волны (рис. 5, линия точек), а другая – вертикальному участку антисимметричной волны (рис. 5, сплошная линия). Обе волны имеют схожее с антисимметричной волной распределение продольной составляющей напряженности электрического поля  $\text{imag}(E_z)$ . Пунктирной линией на рис. 5 показана объемная плазменная волна [5]. На частотах выше частоты обращения  $\varepsilon_2$  в нуль в результате межзонных переходов характер изменения  $\varepsilon_2$  от частоты не соответствует зависимостям, получаемым по формулам (1) и (2). Из рис. 5 видно, что в отличие от дисперсионной характеристики, полученной для металлической пленки без потерь, дисперсионная характеристика антисимметричной волны имеет максимум в точке  $1/\lambda \approx 2,5 \text{ мкм}^{-1}$ , эта точка соответствует случаю, когда  $|\varepsilon_2| = \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2,84$ .

На участке дисперсионной характеристики, соответствующем участку комплексной волны в металлической пленке без потерь в точке  $1/\lambda \approx 3 \text{ мкм}^{-1}$ , наблюдается осциллирующий по координате  $x$  характер поля, как и в случае неучета потерь в пленке (рис. 4, б).

Таким образом, в реальной ситуации в металлической нанопленке существуют две комплексные волны, отличающиеся друг от друга в первую очередь затуханием, обусловленным наличием потерь в пленке. Наименьшее затухание имеет антисимметричная волна, показанная точками на рис. 5. У этой волны  $\beta_1/k_0$  близко к  $\varepsilon_{1,3}$ , что делает ее похожей на волну Ценнека [9]. Характеристики симметричной и антисимметричной волн (рис. 2, а кривые 1 и 2 для случая неучета потерь) при учете потерь в пленке сливаются в точке  $1/\lambda \approx 2,5 \text{ мкм}^{-1}$ . На участке собственной КВ ( $1/\lambda$  от 2,8 до 3,05  $\text{мкм}^{-1}$ ) характеристики волн, показанных на рис. 5 сплошной линией и точками, почти сливаются. Затухание здесь почти такое же, как и в случае неучета потерь (рис. 2, б). Таким образом, свойства собственной КВ при учете потерь в пленке почти не изменяются.

Естественно, при наличии потерь в пленке баланс мощностей, переносимых КВ в прямом и обратном направлениях, не выполняется. На дисперсионных характеристиках отсутствует двухзначный участок, показанный для идеальной (без потерь) пленки на рис. 3. Как следствие, в реальной структуре нет волны с отрицательной групповой скоростью.

Большой прикладной интерес представляют структуры с двумя металлическими пленками [10]. Рассмотрим такую структуру (рис. б), с серебряными пленками толщиной 10 нм, диэлектрическим слоем толщиной 30 нм с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_3 = 2,84 (Al_2O_3)$  и диэлектрической проницаемостью внешней среды  $\varepsilon_1 = \varepsilon_5 = 1$  (воздух) с учетом комплексности диэлектрической проницаемости металлических пленок.

На рис. 7 приведены дисперсионная характеристика и характеристика затухания поверхностной плазмон-поляритонной волны в такой структуре. Два максимума на дисперсионной характеристике обусловлены различными диэлектрическими проницаемостями слоя между металлическими пленками и внешней средой. Первый максимум дисперсионной характеристики соответствует равенству по модулю действительной части диэлектрической проницаемости металлической пленки и среды между пленками  $|\text{real}(\varepsilon_2)| = \varepsilon_3 = 2,84$ , второй максимум обусловлен равенством по модулю действительной части диэлектрической проницаемости металлической пленки и внешней среды  $|\text{real}(\varepsilon_2)| = \varepsilon_1 = 1$ . Если диэлектрические проницаемости внутреннего и внешнего диэлектрических слоев совпадают, то максимумы дисперсионной характеристики сливаются.

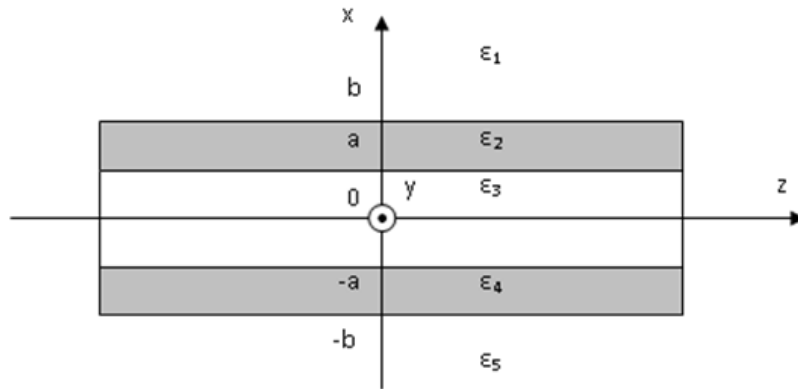


Рис. 6. Направляющая структура с двумя металлическими плёнками

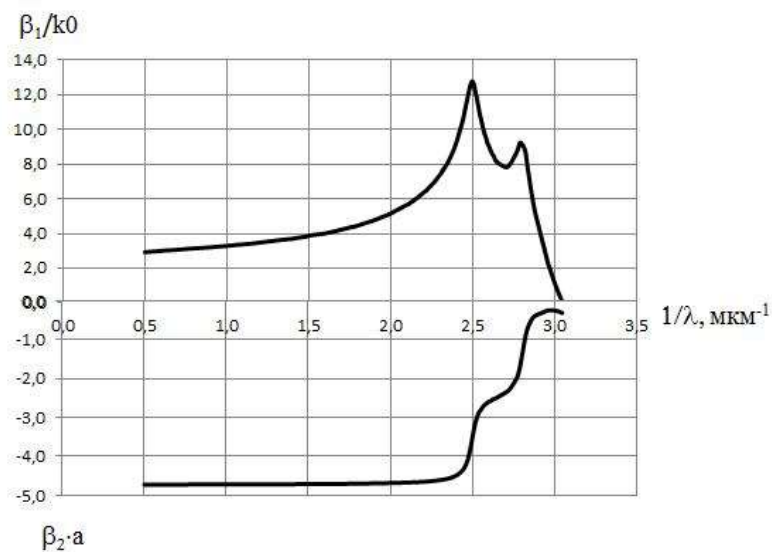


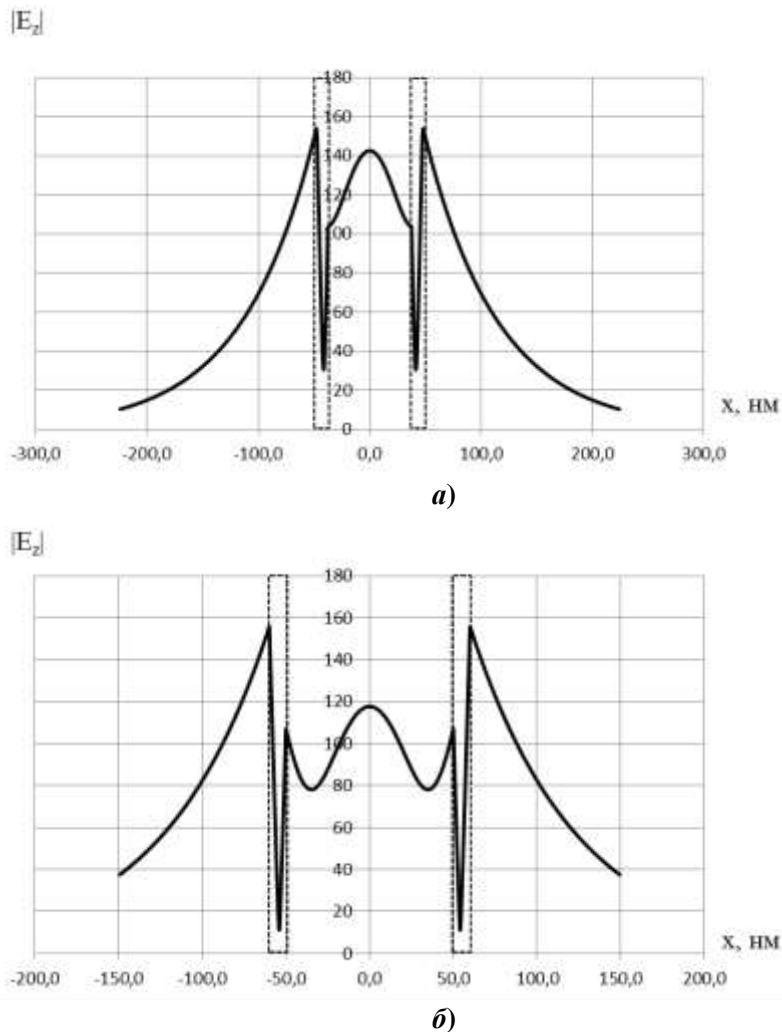
Рис.7. Характеристики дисперсии и затухания волн в структуре с двумя плёнками

Дисперсионная характеристика поверхностной плазмон-поляритонной волны, рассчитанная без учета потерь в металле как и в случае электродинамической структуры с одной металлической пленкой (рис. 2, а), будет иметь двузначный участок. В точке, где групповая скорость обращается в ноль, возникает комплексная волна. Участок комплексной волны сохраняется и при учете потерь в металле.

В случае структуры с двумя металлическими пленками возникающий в такой структуре волновой процесс можно рассматривать как результат взаимодействия двух плёночных волн. Как было показано, поля плазмон-поляритонных волн экспоненциально спадают при удалении от плёнок. Если толщина диэлектрического слоя, разделяющего плёнки, такова, что поля волн не затухают в нём, происходит взаимодействие волн плёнок. В среде между двумя пленками наблюдаются два встречно направленных потока. В результате взаимодействия двух волн, распространяющихся навстречу друг другу, возникает стоячая волна. В [10] говорится о таких стоячих волнах, которые можно назвать плазмон-поляритонными резонансами.

На рис. 8, а изображена зависимость модуля компоненты электрического поля  $E_z$  от координаты  $x$  для электродинамической структуры с серебряными пленками толщиной 10 нм, диэлектрическим слоем толщиной 75 нм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3 = 2,84$  ( $Al_2O_3$ ), и диэлектрической проницаемостью внешней среды  $\epsilon_1 = \epsilon_5 = 1$  (воздух),  $1/\lambda \approx 2,91 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ,  $\beta_1/k_0 = 1,343$ ,  $\beta_2 \cdot a = -0,716$ . На распределении  $|E_z|$  от координаты  $x$  наблюдается явно выраженный максимум в среде между двумя пленками (рис. 8, а, пунк-

тирная линия). Можно говорить о наличии резонансных явлений, возникающих в результате взаимодействия двух направленных навстречу друг другу волновых процессов.



**Рис. 8.** Распределения модуля продольной компоненты  $E_z$  электрического поля комплексной волны при толщине диэлектрического слоя между плёнками:  
 $a - 75$  нм;  $b - 100$  нм

Во внешней среде поле монотонно убывает с удалением от пленок, на границах пленок наблюдаются максимумы. Вид зависимости мнимой части компоненты электрического поля  $\text{imag}(E_z)$  в металлической пленке соответствует аналогичной зависимости компоненты поля антисимметричной волны.

С увеличением толщины слоя происходит увеличение количества узлов и пучностей стоячей волны между металлическими пленками. На рис. 8, б изображена зависимость модуля компоненты электрического поля  $E_z$  от координаты  $x$  для электродинамической структуры с серебряными пленками толщиной 10 нм, диэлектрическим слоем толщиной 100 нм с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_3 = 2,84$  ( $Al_2O_3$ ) и диэлектрической проницаемостью внешней среды  $\epsilon_1 = \epsilon_5 = 1$  (воздух),  $1/\lambda \approx 2,91 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $\beta_1/k_0 = 1,259$ ,  $\beta_2 a = -1,235$ .

При дальнейшем увеличении толщины диэлектрического слоя между металлическими пленками сказывается влияние затухания электрического поля вдоль оси  $x$  при удалении от пленок. Происходит уменьшение взаимодействия двух волн, направленных навстречу друг другу. Явно выраженной картины стоячей волны не наблюдается.

Таким образом, показано, что в структурах с двумя металлическими плёнками на частотах ниже частоты плазмонного резонанса при определённых параметрах окружающих их



сред могут возникать собственные комплексные волны. Взаимодействие двух волн, существующих в параллельных плёнках, приводит к возникновению явления комплексного резонанса. Предлагается использовать данный эффект в фильтрующих устройствах оптического диапазона.

### Библиографический список

1. **Раевский, А.С.** Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2004. – 112 с.
2. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 224 с.
3. **Малахов, В.А.** Комплексные волны в экранированной микрополосковой линии / В.А. Малахов, А.С. Раевский // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 1. С. 58–61.
4. Поверхностные поляритоны / под ред. В.Л. Аграновича, Д.Л. Миллса. – М.: Наука, 1985.
5. **Климов, В.В.** Наноплазмоника / В.В. Климов. – М.: Физматлит, 2010. – 480 с.
6. **Майер, А.** Плазмоника: теория и приложения / А. Майер, А. Стефан. – М-Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 296 с.
7. **Федянин, Д.Ю.** Поверхностные плазмон-поляритоны с отрицательной и нулевой групповыми скоростями, распространяющиеся по тонким металлическим пленкам / Д.Ю. Федянин [и др.] // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 8. С. 745–750.
8. **Малахов, В.А.** Комплексные волны в металлической нанопленке на оптических частотах / В.А. Малахов, К.В. Попков, А.С. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 27–30.
9. **Вайнштейн, Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Сов. радио, 1957. – 581 с.
10. **Tamura, M.** Analysis of metal-insulator-metal structure and its application to sensor/ M. Tamura, H. Kagata // IEEE Transactions on theory and techniques. 2010. V. 58. №. 12. P. 3954–3960.

Дата поступления  
в редакцию 31.01.2012

**V.A. Malakhov, K.V. Popkov, A.S. Raevsky**

### COMPLEX WAVES AND COMPLEX RESONANCE IN STRUCTURES WITH THIN METAL FILMS AT OPTICAL FREQUENCIES

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexseev

**Purpose:** Calculations of the complex longitudinal wave numbers and electromagnetic fields in single metal film and metal–insulator–metal structures.

**Design/methodology/approach:** A theory is proposed on a rigorous method of a calculation of dispersion that takes into consideration complex permittivity of silver.

**Findings:** Results of calculations could be used in an engineering of filters.

**Research limitations/implications:** The present results provide a starting-point for further research of properties of surface plasmon polaritons.

**Originality/value:** The researches deal with complex waves in metal films at optical frequencies.

*Key words:* surface plasmon polaritons, complex resonance, dispersion, complex plasmon resonance.

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

А.С. Вашурин, А.В. Герасин, Л.Н. Орлов

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается вопрос расчетно-экспериментальной оценки прочности и пассивной безопасности кузовных конструкций, выполненных из многослойных панелей (сендвич-панелей). Особенностью таких панелей является относительная высокая прочность и малая масса. Ввиду конструктивных особенностей несущих систем, выполненных из сендвич-панелей, важное практическое значение и большой научный интерес представляют расчетно-экспериментальные методы оценки несущих свойств панелей. Описаны исследования, выполненные на кафедре «Автомобили и тракторы» АМИ НГТУ, показаны перспективы развития данного научно-практического направления.

*Ключевые слова:* многослойная панель, несущая способность, конечно-элементный анализ, расчетная модель, эксперимент.

Повышение эффективности современной техники неразрывно связано с поиском и реализацией новых конструктивно-технологических решений. Одной из важнейших задач при проектировании нового изделия является снижение его массы при сохранении или улучшении жесткостных и прочностных характеристик, а также более эффективное использование занимаемого объема. Наиболее перспективным направлением при разработке кузовных конструкций является использование многослойных панелей (в частности, трехслойных). Трехслойные силовые конструкции представляют собой объемные композиции из листов обшивки и расположенного между ними заполнителя (рис. 1).

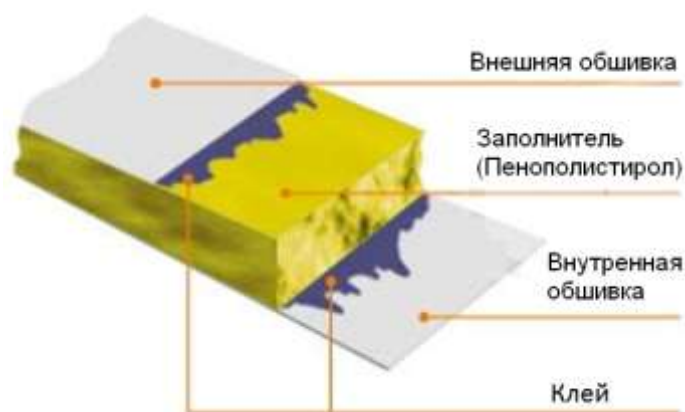


Рис. 1. Типовая схема трехслойной панели (сендвич-панели)

В автомобильной промышленности внедрение многослойных конструкций началось приблизительно в 70-х годах XX века [1]. Первоначально такие панели применялись преимущественно в изотермических фургонах и специализированных фургонах для нужд во-

оруженных сил. В настоящее время трехслойные панели находят применение в конструкции автобусов [2]. Количество прототипов, представляемых различными производителями, указывает на чрезвычайную перспективность данного направления. Примеры таких конструкций: *Advanced Technology Transit Bus*, *NABI Compobus*, *BOVA Magiq Bus*, *D-bus*, *Metroliner MIC 8012 GE*, *Prevost Car XLII*, Автобус модели 3283 «Ford Столичный» ПГ «Самотлор НН».

Исходя из анализа конструкций многослойных панелей, можно сказать, что применение сэндвич-панелей (в большей степени трехслойных) является перспективным направлением в автомобилестроении. Кузовные конструкции, выполненные из таких панелей, обладают высокой прочностью и жесткостью, могут эксплуатироваться в различных климатических зонах (в том числе на территориях с крайне низкими температурами). В этой связи актуальным становится вопрос оценки прочности и пассивной безопасности конструкций (в частности, в условиях опрокидывания), решение которого может быть достигнуто за счет применения методики расчетно-экспериментального исследования поведения конструкций в условиях аварийного нагружения [3–5].

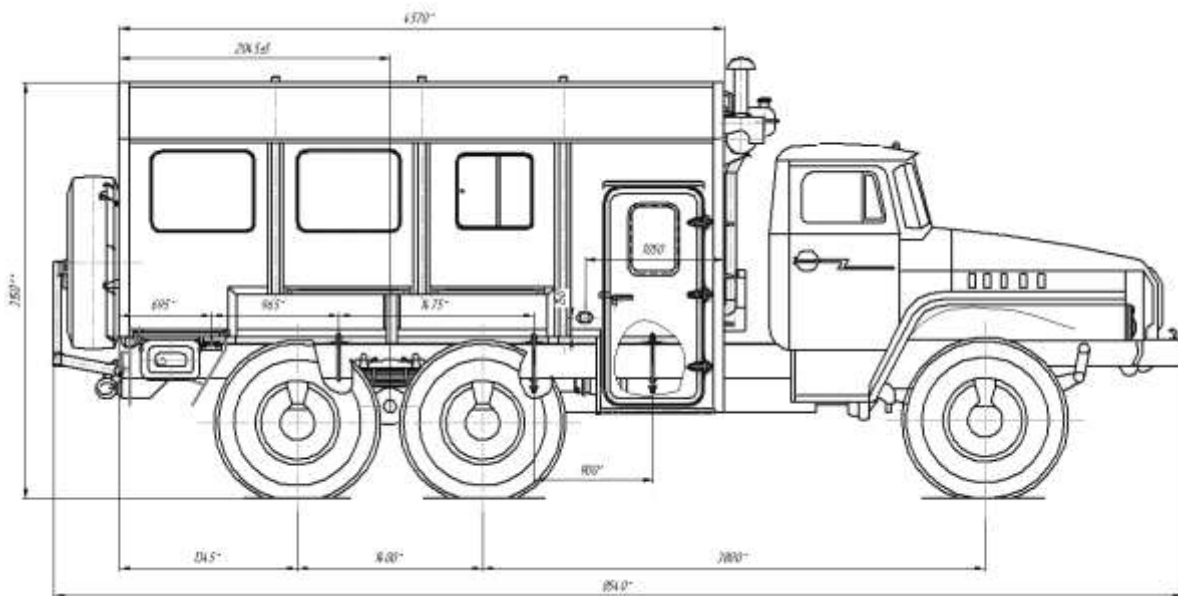


Рис. 2. Внешний вид автобуса специального на базе шасси УРАЛ-43203

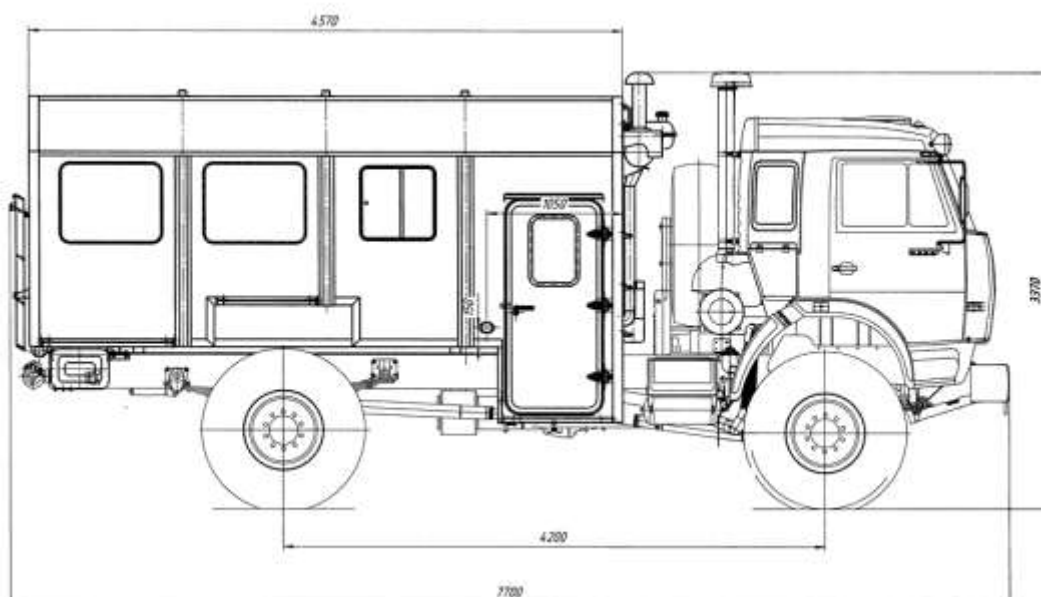


Рис. 3. Внешний вид автобуса специального на базе шасси КамАЗ-4326

Специалистами кафедры «Автомобили и тракторы» АМИ НГТУ были проведены расчетно-экспериментальные исследования, направленные на изучение поведения многослойных панелей под действием эксплуатационных и аварийных нагрузок [6].

Объектами исследования являлись конструкции автобусов специальных на базе шасси УРАЛ-43203 и КамАЗ-4326, производимых ООО «Автофургон». На рис. 2 и рис. 3 показан общий вид исследуемых автомобилей.

На рис. 4 показана конструкция кузова данных транспортных средств, состоящая из стального каркаса, основания и многослойных панелей, из которых выполнены боковины, крыша, пол, а также передняя и задняя стенки.

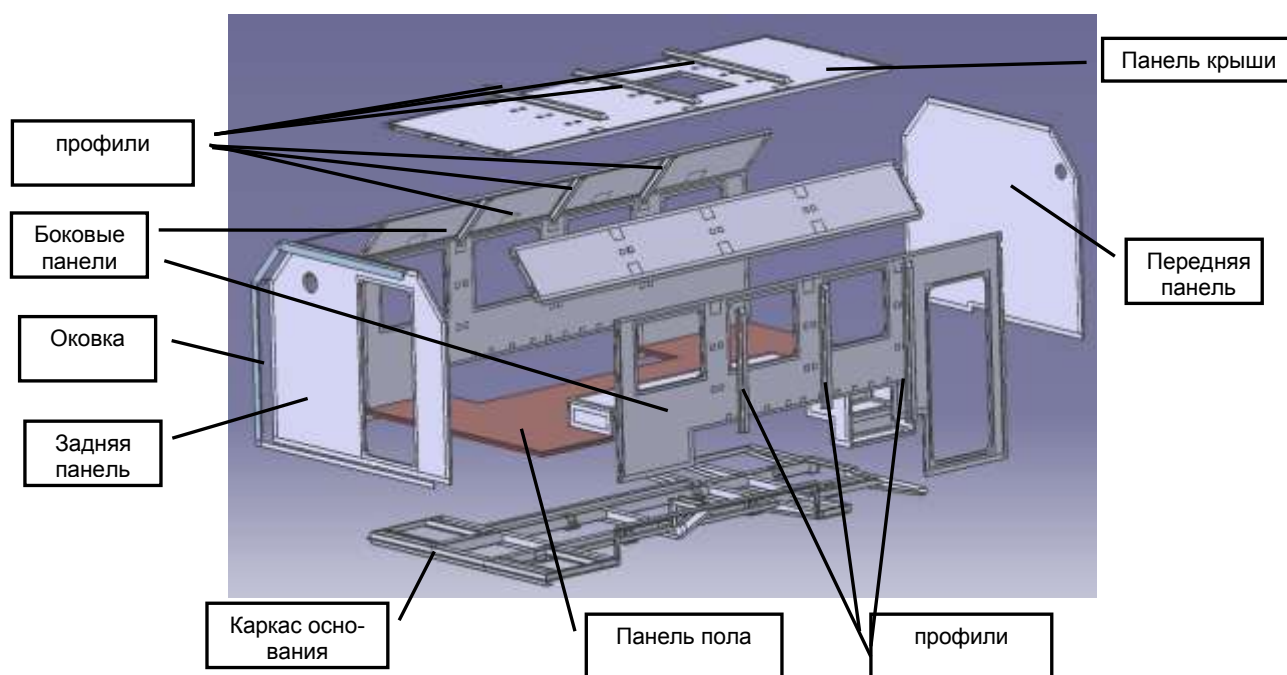


Рис. 4. Конструкция кузова вахтового автобуса

В рассматриваемой конструкции используются трехслойные сэндвич-панели, состоящие из внешней обшивки (алюминиевого листа толщиной 1 мм), внутренней обшивки (лист фанеры толщиной 12 мм для панели пола и 3–4 мм для остальных панелей) и заполнителя (армированный пенополистирол толщиной 26 мм). Все панели имеют деревянный каркас, выполненный из брусков с прямоугольным поперечным сечением 26x50мм.

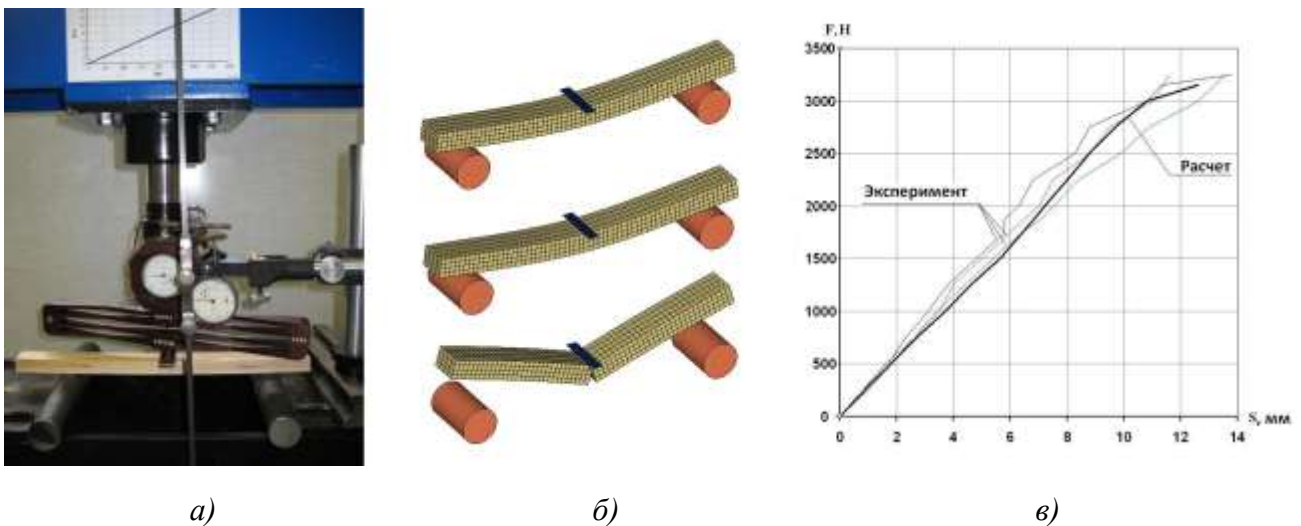
В процессе исследований анализировался характер поведения сэндвич-панели, состоящей из трех слоев: наружного – алюминиевого листа; внутреннего – фанеры и среднего – армированного пенополистиролового заполнителя на деревянном каркасе. С целью проведения расчетных исследований была создана подробная конечно-элементная модель панели, состоящая из оболочечных и объемных элементов (клеевой слой между слоями панели не моделировался). Слои панели могли совершать перемещения относительно друг друга, однако, с целью учета особенностей клеевого соединения составных частей панели, задавался относительно высокий коэффициент трения.

Известно, что определение характеристик материалов является одной из важнейших задач при получении адекватных результатов компьютерного моделирования поведения конструкции под нагрузкой. Для многослойных панелей необходимо иметь данные для каждого используемого материала (слоя). После валидации характеристик отдельных материалов необходимо проверить и при необходимости откорректировать характеристики в составе модели трехслойной панели таким образом, чтобы данные расчетов имели наилучшую сходимость с данными экспериментальных исследований.

Определение характеристик деревянных образцов проводилось в условиях изгибного

нагрузки, при этом нагрузка прикладывалась как перпендикулярно, так и параллельно волокнам дерева. В каждом направлении проводилось несколько испытаний. Образцы выбирались таким образом, чтобы отклонения направления волокон древесины составляло не больше  $10^\circ$  от осей симметрии образца. Образец устанавливался на цилиндрические опоры (рис. 5, а), лишенные относительного проскальзывания. Для регистрации нагрузки применялся динамометр, а для определения перемещений использовался штангенциркуль и индикатор часового типа на специальной подставке.

На рис. 5, б показана схема нагружения конечно-элементной модели (КЭМ) деревянного бруска и результаты моделирования изгибного нагружения. На рис. 5, в представлены графики экспериментальных кривых и график, полученный при конечно-элементном анализе, с учетом подобранных характеристик дерева. Расчетные данные хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, что свидетельствует об адекватном представлении деревянных элементов. Следует отметить, что при моделировании дерева использовались объемные 8-узловые элементы типа *SOLID*, а в характеристиках дерева учитывался критерий разрушения, позволяющий имитировать излом деревянного бруска при нагрузке, превышающей критическое значение.



**Рис. 5. Расчетно-экспериментальное исследование поведения деревянных брусков:**  
 а – натурные испытания; б – имитационное моделирование; в – графики изменения вертикальной нагрузки, действующей на деревянный образец в зависимости от изгибных деформаций

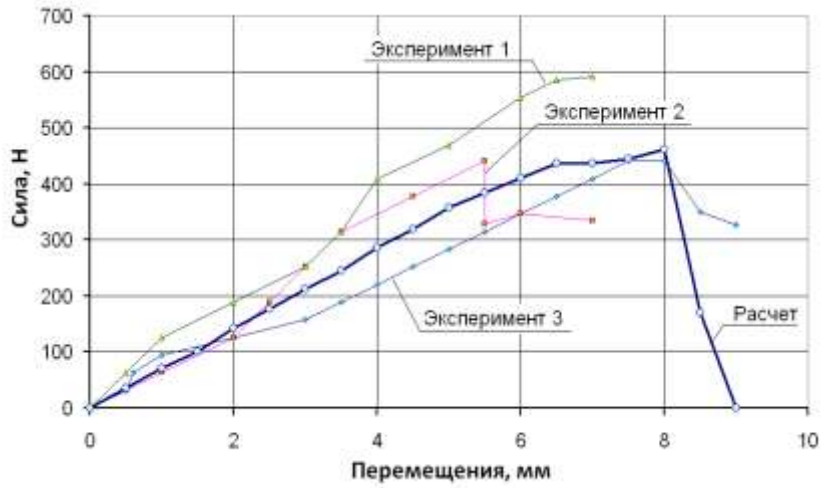
Испытания образцов пенополистиролового наполнителя проводилось в два этапа: первоначально определялись характеристики пенополистирола, затем – характеристики армированного фанерой пенополистирола. На рис. 6, а дана схема стендовых испытаний образца пенополистиролового наполнителя, по результатам которых были определены характеристики наполнителя, необходимые для имитационного моделирования.

На рис. 6, б приведены графики изменения вертикальной нагрузки, действующей на образец фанеры, полученные при испытаниях и компьютерном моделировании. Видно, что результаты расчетов имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными, при этом расхождение результатов не превышает 20% (вполне допустимо). Испытания образцов из алюминия не проводились ввиду недостаточного количества информации по характеристикам данного материала в справочной литературе.

После определения характеристик составляющих элементов сэндвич-панели была выполнена оценка адекватности расчетной модели панели на основе сравнения результатов компьютерного моделирования с данными экспериментальных исследований, заключающихся в изгибном нагружении образца панели с консольным закреплением. Фрагменты проведения испытаний представлены на рис. 7, а, деформированный вид КЭМ на рис. 7, б.



а)

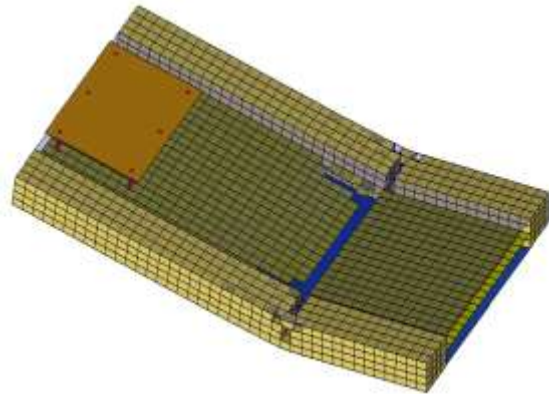


б)

**Рис. 6. Исследования характеристик заполнителя (пенополистерола) и фанеры:**  
 а – схема натуральных испытаний заполнителя; б – графики изменения вертикальной нагрузки, действующей на образец фанеры в зависимости от изгибных деформаций

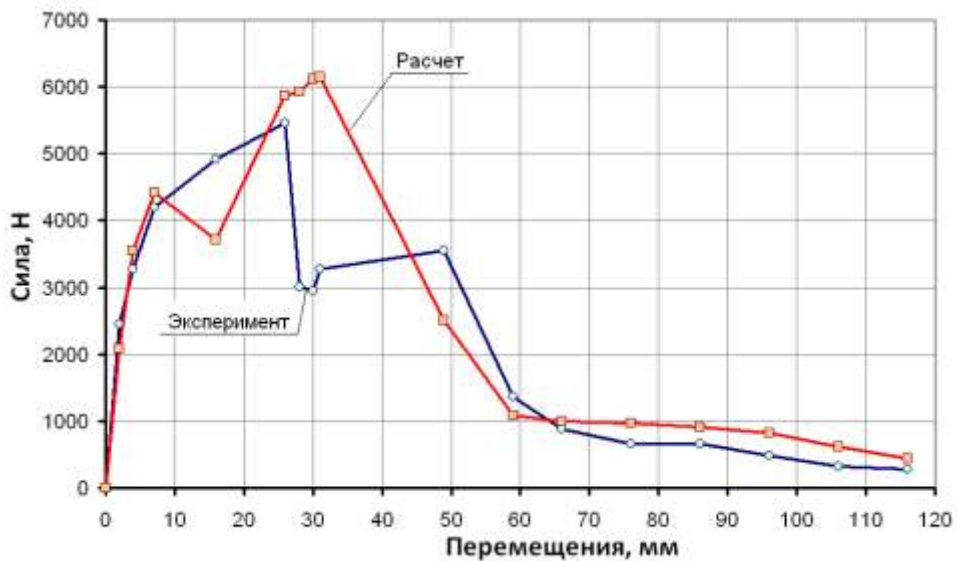


а)



б)

**Рис. 7. Расчетно-экспериментальные исследования сэндвич-панели:**  
 а – экспериментальные исследования; б – деформированный вид расчетной модели



**Рис. 8. Графики изменения нагрузки для расчетной модели и экспериментального образца многослойной панели**

Как показало сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (рис. 8), расхождение по максимальному значению разрушающей нагрузки не превышало 10%, что является вполне приемлемым. Однако из графиков видны существенные различия в некоторых точках графика, что указывает на необходимость продолжения работ по доводке расчетной модели. В этой связи планируется проведение дополнительных экспериментальных исследований при других условиях нагружения:

- испытания на сдвиг;
- испытания с различными видами наполнителя;
- испытания с различными скоростями нагружения.

В области компьютерного моделирования, планируется:

- создание КЭМ, имеющих различные сочетания типов элементов (различные сочетания пластинчатых и объемных элементов);
- проработка вопроса моделирования клеевого слоя;
- проработка вопросов, связанных с моделированием армирующих элементов в наполнителе;
- более достоверное моделирование анизотропных материалов (дерева).

### Библиографический список

1. **Ендогур, А.И.** Сотовые конструкции / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
2. **Воронков, О.В.** Новое в конструкции и проектировании автобусных кузовов / О.В. Воронков, В.И. Песков, А.А. Хорычев. – Н. Новгород: НГТУ, 2009. – 185 с.
3. Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов [и др.]; под ред. Л.Н. Орлова. – Н. Новгород, НГТУ, 2009. – 153 с.
4. **Ким, И.В.** Оценка прочности силовой структуры кузовов автобусов методами математического моделирования. Ч. 1 / И.В. Ким, В.Н. Зузов // Журнал ААИ. 2008. №5. С. 30–31.
5. **Ким, И.В.** Оценка прочности силовой структуры кузовов автобусов методами математического моделирования. Ч. 2 / И.В. Ким, В.Н. Зузов // Журнал ААИ. 2008. №6. С. 40–41.
6. **Вашурин, А.С.** Расчетно-экспериментальная оценка прочности и пассивной безопасности кузова автобуса с трехслойными панелями / А.С. Вашурин [и др.] // Журнал ААИ. 2011. №1. С. 20–22.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**A.S. Vashurin, A.V. Gerasin, L.N. Orlov**

### THE RESEARCH OF SANDWICH BEARING CAPACITY

Nizhny Novgorod state technical university named after R.Y. Alekseev

**Purpose:** The developing of computational and experimental methods of estimating of sandwich bearing capacity that are used in vehicles body structures.

**Design/methodology/approach:** The computational research based on finite element method with using of different types of elements (beam, shell, solid) and materials (elastic, elastic-plastic kinematic). The experimental research based on quasi static methods of loadings of vehicle body structure parts.

**Findings:** It is possible to apply the research results for estimation of stiffness and passive safety of vehicles structures that are made of sandwich panels.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of vehicle sandwich panels design.

**Originality/value:** The main peculiarity of the study is original approach of finite element simulation of sandwich panels loadings conditions that are based on experimental data.

*Key words:* multi-layer plate, bearing capacity, finite element analysis, computational model, experiment.

УДК 629.113

С.Ю. Костин<sup>1</sup>, А.В. Тумасов<sup>1</sup>, В.А. Колтунов<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОБУСА СРЕДНЕГО КЛАССА МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Павловский филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Представлено описание научно-исследовательских работ, выполняемых сотрудниками НГТУ при поддержке ОАО «Павловский автобус», направленных на исследование свойств активной безопасности автобуса среднего класса на основе результатов имитационного моделирования условий движения, регламентированных требованиями нормативных документов.

*Ключевые слова:* автобус, управляемость и устойчивость, тормозные свойства, моделирование

Повышение активной безопасности транспортных средств является актуальной и значимой проблемой в автомобилестроении, при этом особое внимание традиционно уделялось повышению свойств управляемости, устойчивости и тормозным свойствам.

Все большее значение при выполнении работ, направленных на повышение активной безопасности автотранспортных средств, приобретает имитационное моделирование, представляющее процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [1].

В данной работе представлены результаты имитационного моделирования условий движения автобуса среднего класса, имитирующих различные сертификационные испытания: вхождение в поворот, смена полосы движения [2].

В качестве программного комплекса для проведения исследований был выбран программный пакет *SDK-Simulation*, обладающий значительным функционалом и имеющий широкий спектр возможностей [3]:

- моделирование движения транспортного средства в реальном времени;
- обеспечение высококачественной текстурированной трехмерной визуализации;
- возможность создания моделей транспортных средств категорий М2, М3, N2 И N3;
- моделирование подсистем транспортного средства;
- связь с внешними аппаратными средствами для формирования испытательной системы на базе реальных устройств;
- наличие программируемой модели водителя;
- запись результатов в различных формах и др.

Создание имитационной модели движения транспортного средства в программном комплексе *SDK-Simulation* можно разделить на несколько этапов:

- 1) задание параметров транспортного средства (более 70 параметров, описывающих особенности конструкции);
- 2) формирование окружающей среды (задание параметров полотна пути);
- 3) задание управляющего воздействия (формирование алгоритма управления транспортным средством);
- 4) выбор модели водителя (задание времени запаздывания и скорости реакции на изменяющиеся условия движения) и др.

Параметры исследуемого автобуса (рис. 1) были выбраны в соответствии с техниче-



ской документацией на автобус-аналог ПАЗ 320402-03 либо получены расчетным путем на основе сведений, предоставленных специалистами ОАО «Павловский автобус».



Рис. 1. Общий вид модели автобуса ПАЗ

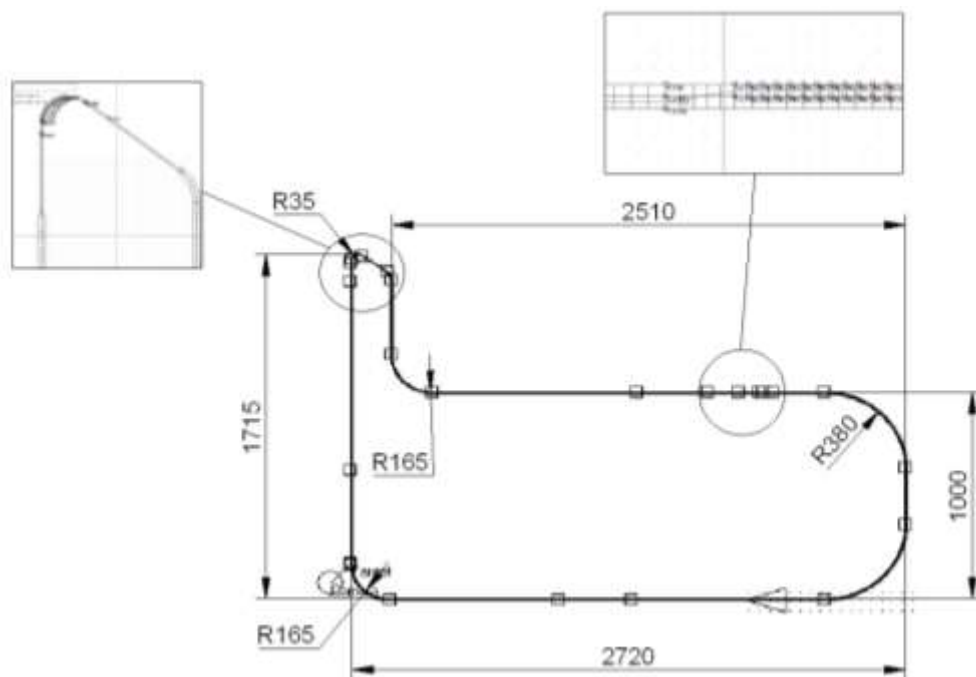


Рис. 2. Схема виртуального полигона

На рис. 2 показана схема созданного виртуального полигона, необходимого для имитации условий сертификационных испытаний, а также проведения комплекса различных исследований. Виртуальный полигон представляет собой набор определенных участков, соответствующих конкретным испытаниям.

Для проверки работоспособности и предварительной оценки адекватности поведения имитационной модели были выполнены тестовые «заезды». В качестве тестового испытания была проведена имитация испытания «поперечная статическая устойчивость».

Показателем поперечной статической устойчивости, характеризующим склонность транспортного средства (ТС) к опрокидыванию, является угол статической устойчивости  $\alpha_{с.у}$ , при котором происходит отрыв всех колес одной стороны ТС. С целью определения угла  $\alpha_{с.у}$  виртуальной модели автобуса был создан протяженный виртуальный участок дороги с постепенно меняющимся углом косогора. Степень изменения угла в зависимости от расстояния показана на рис. 3.

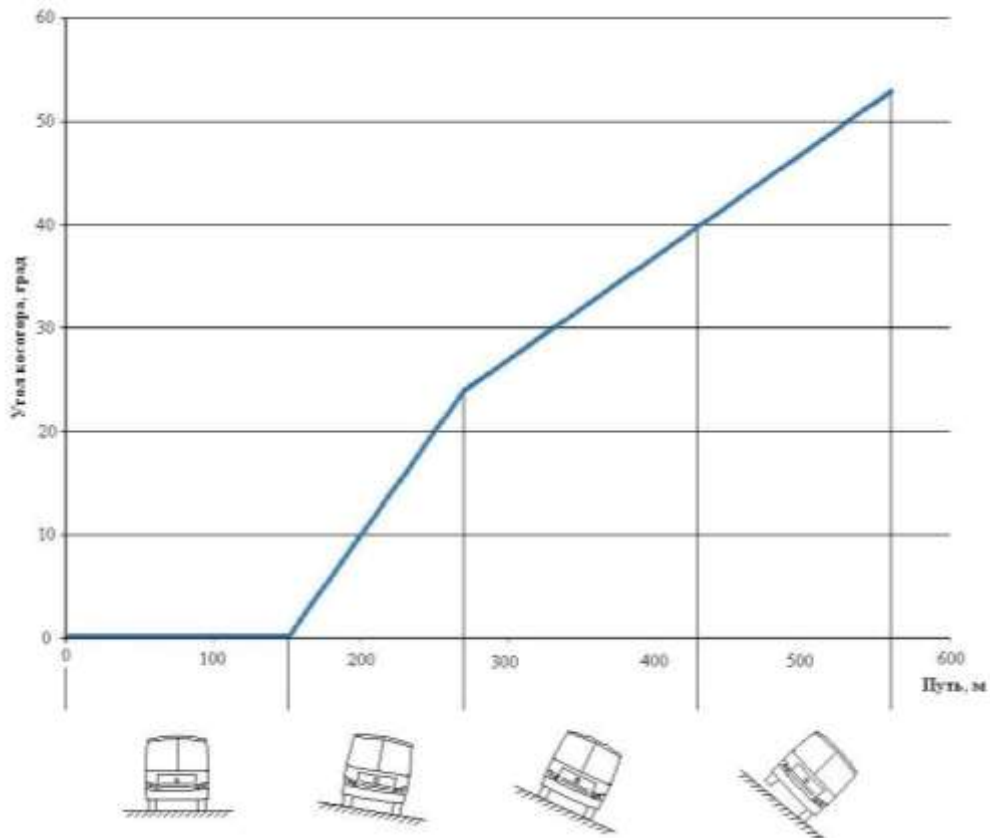


Рис. 3. Зависимость угла косогора от пути

Методика моделирования условий опрокидывания автобуса, эквивалентным условиям реальных испытаний по оценке статической устойчивости, заключается в определенной последовательности действий. Испытуемую модель автобуса устанавливают на дорожное полотно таким образом, чтобы его продольная ось была параллельна дороге. Управляемые колеса ТС должны находиться в положении, соответствующем прямолинейному движению. Далее автобус с малой скоростью на первой передаче должен двигаться по протяженному участку дороги с меняющимся углом косогора до момента отрыва сначала одного, а затем и всех колес одной стороны. Момент отрыва в данном случае определяется уже не визуально, а по величине нормальных реакций на колесах. Главным отличием используемого подхода от реальных условий проведения испытаний является то, что модель автобуса приводится в движение, в то время как при реальных испытаниях ТС находится в неподвижном состоянии и устанавливается на специальной поворотной плите. Тем не менее, ввиду того, что скорость движения модели автобуса относительно мала, а значение коэффициента сцепления колес с дорогой задано относительно высоким (скольжение модели автобуса поперек полотна пути отсутствует), то моделируемые условия следует признать эквивалентными реальным условиям проведения испытаний.

На рис. 4 изображено движение автобуса по заданному участку, где наглядно показано распределение нормальных реакций и момент отрыва всех колес одной стороны.

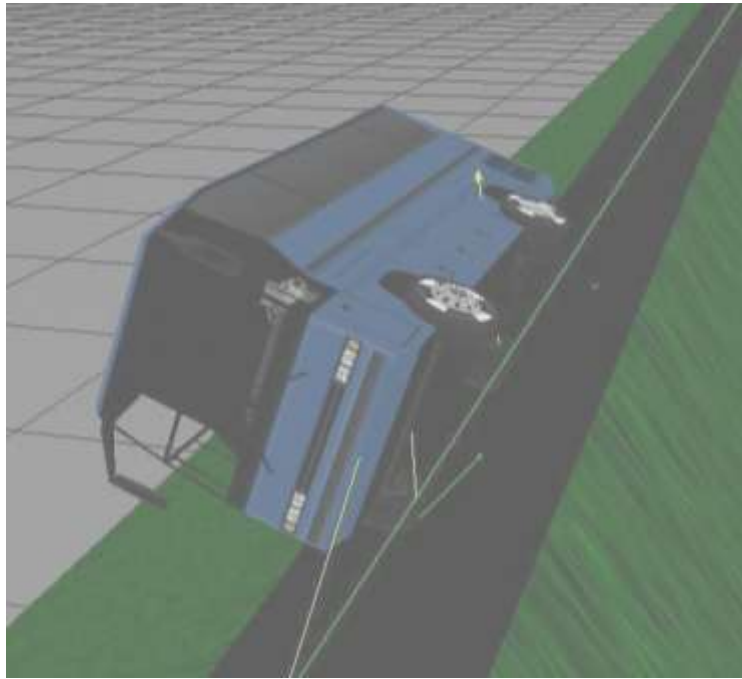


Рис. 4. Движение модели автобуса по заданному участку

Сравнительный анализ результатов сертификационных испытаний с данными имитационного моделирования представлен в табл. 1. Видно, что расхождение значений составляет 13,3%, что обусловлено допущениями, принятыми в модели.

Таблица 1

**Сравнение результатов математического и имитационного моделирования**

	Угол статической устойчивости, град.
Сертификационные испытания	45
Имитационное моделирование	51
Расхождение, %	13,3

На основе разработанных виртуального полигона и модели автобуса были выполнены имитационные испытания, соответствующие условиям проведения сертификационных испытаний «поворот» и «переставка».

Для более точной оценки возникновения отрыва хотя бы одного из колес в ходе виртуальных испытаний были проанализированы графики изменения нормальных реакций на колесах на участке выполнения маневра для испытаний «поворот» и «переставка» (рис. 5 и рис. 6). Нумерация колес, нормальные реакции которых изображены на графиках, соответствует рис. 7. Результаты, представленные на графиках, позволяют констатировать факт отсутствия отрыва колес во время испытаний, поскольку не одна из величин не имеет нулевого значения.

Характер изменения закономерности, представленной на рис. 8, подтверждает возникновение сноса передней оси во время испытания, о чем наглядно свидетельствует возрастание значений угла поворота рулевого колеса на интервале от 53,5 до 55 с, что обусловлено стремлением виртуального водителя вернуться на заданную траекторию движения. Анализ зависимости, изображенной на рис. 9, показал, что наиболее интересным является второй цикл изменения угла поворота рулевого колеса (интервал с 47 до 50 с), поскольку наличие данного цикла свидетельствует об удержании автобуса на траектории путем подруливания.

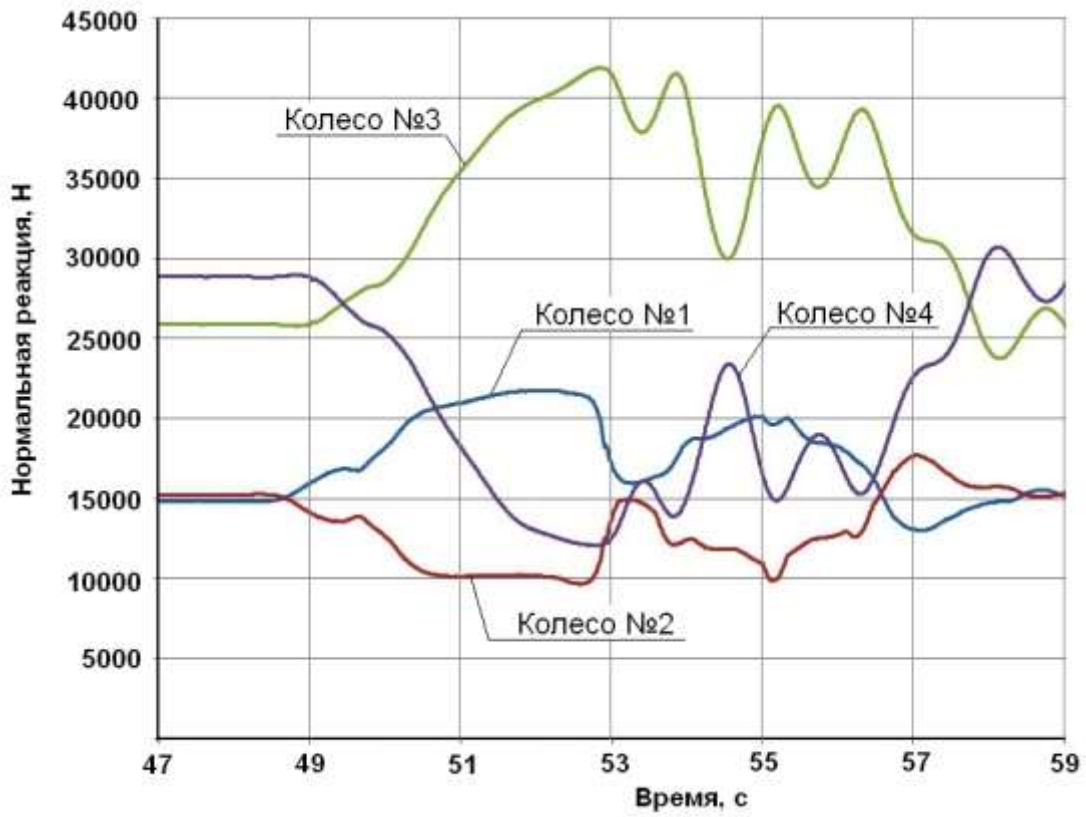


Рис. 5. Распределение нормальных реакций при имитации испытания «поворот»

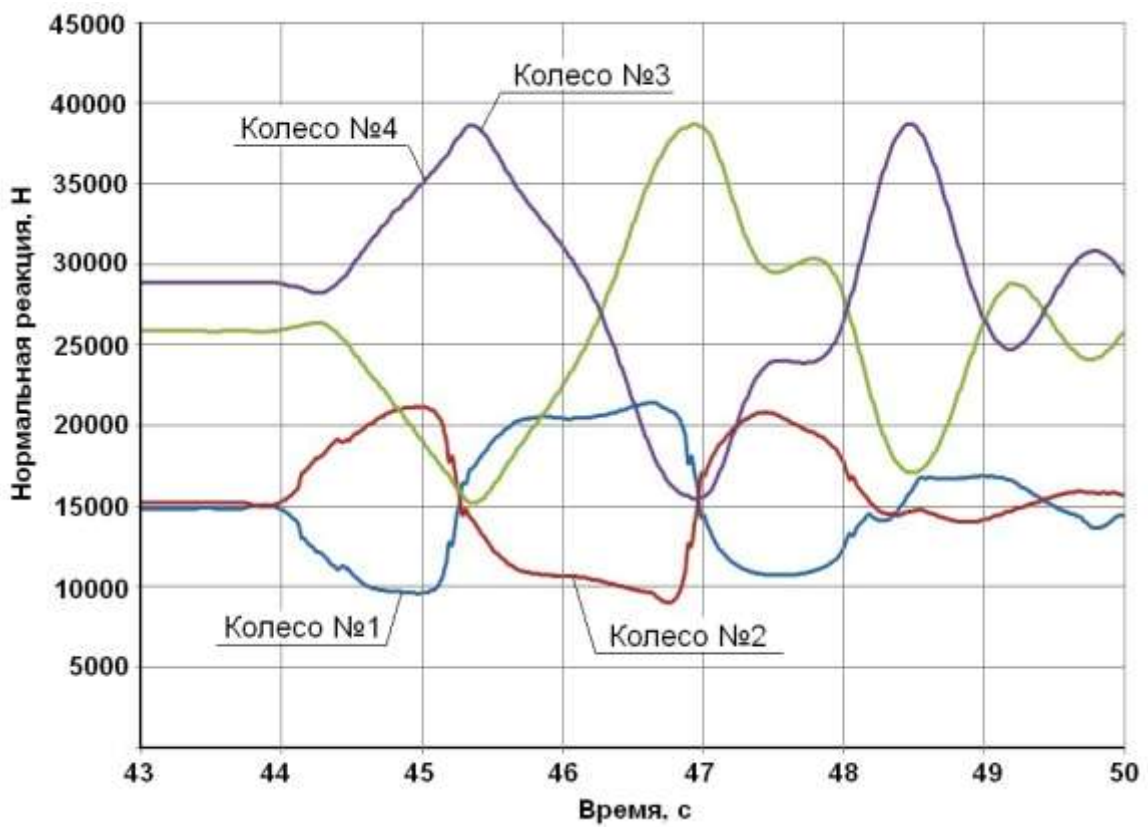


Рис. 6. Распределение нормальных реакций при имитации испытания «переставка»

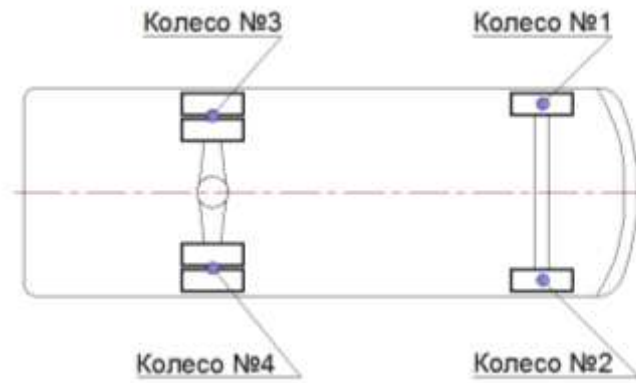


Рис. 7. Принятая схема нумерации колес модели автобуса (вид сверху)

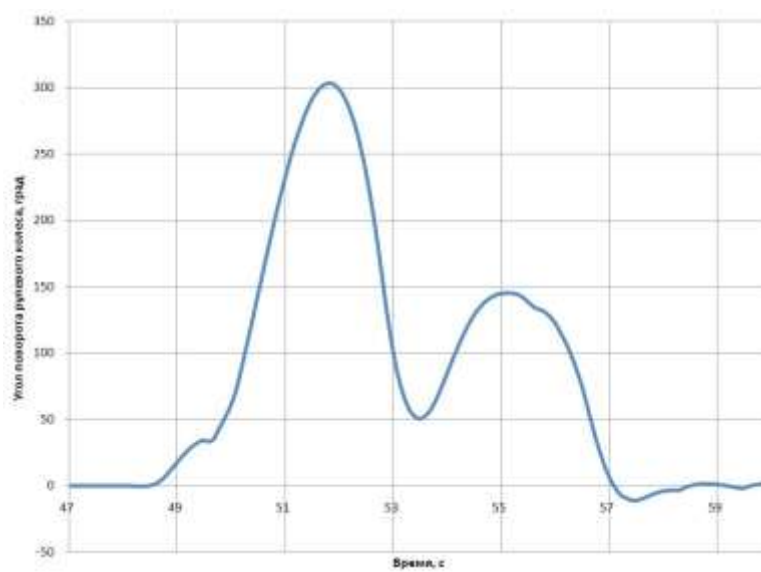


Рис. 8. Зависимость угла поворота рулевого колеса от времени при испытании «поворот»

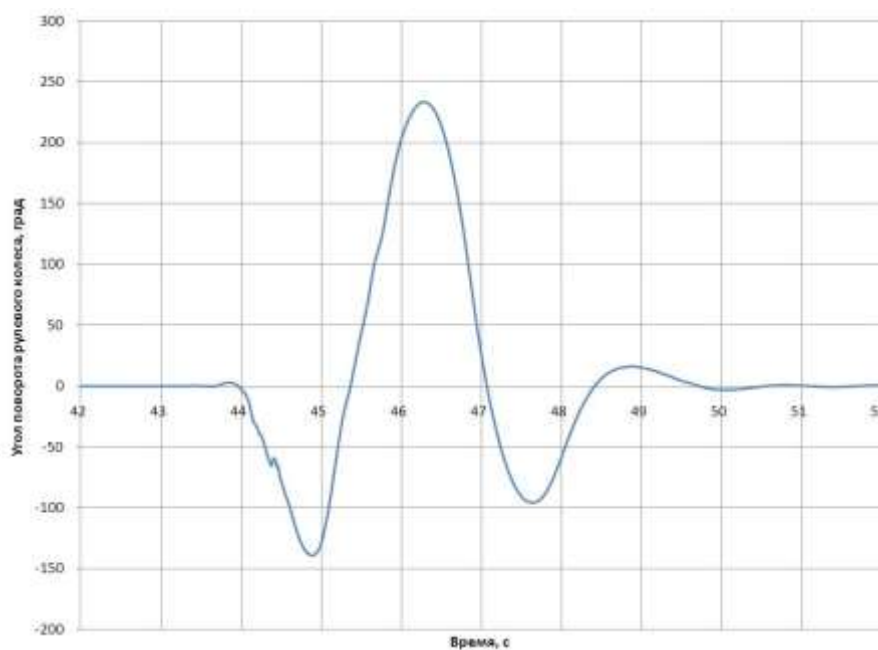


Рис. 9. Зависимость угла поворота рулевого колеса от времени при испытании «переставка»

Результаты моделирования движения автобуса среднего класса в условиях сертификационных испытаний показаны в табл. 2, а также представлены аналогичные сведения об автобусе-аналоге ПАЗ-320402-03, который отвечает требованиям ГОСТ Р 52302-2004.

Сравнительный анализ результатов показывает, что виртуальная модель автобуса позволяет получить схожие с данными натурных испытаний результаты, расхождение составляет для испытания «поворот» 4,5%, для испытания «переставка» 11,1%. Данное расхождение является вполне приемлемым, однако существует необходимость в проведении дополнительных исследовательских работ с целью установления возможных способов повышения точности компьютерного моделирования.

Таблица 2

## Результаты моделирования и данные дорожных испытаний

Тип маневра	Данные имитационного моделирования ( $\varphi = 0,8$ )	Данные дорожных испытаний ПАЗ-320402-03
	при полной массе скорость маневра, км/ч	
«Поворот»	53,5	> 56
«Переставка»	56	> 63

С целью исследования свойств устойчивости и управляемости модели автобуса среднего класса было рассмотрено поведение модели в условиях движения на скорости выше критической для каждого типа рассматриваемых испытаний.

Анализ результатов дополнительных исследований показал: для испытания «поворот» оптимальным соотношением  $a/L$  ( $a$  – расстояние от передней оси автобуса до центра масс,  $L$  – колесная база) является 0,38; для испытания «переставка» - 0,5.

Интересным является поиск оптимального соотношения  $a/L$  для рассматриваемой модели автобуса с точки зрения одновременного достижения наилучших показателей по управляемости и устойчивости. С этой целью рационально воспользоваться так называемым "методом свертки", использование которого можно проиллюстрировать следующим примером: пусть имеются две целевые функции  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  одного управляемого параметра  $X$ . Предположим, что для каждой из них необходимо найти максимум и значимость каждой из них с точки зрения оптимизации выходных параметров конструкции равнозначна. В этом случае постановка задачи (поиск максимума целевой функции  $F$ ) в общем виде сводится к следующей:

$$\max F(X) = \lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X), \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – весовые коэффициенты. В том случае, если значимость целевых функций в процессе оптимизации одинакова, весовые коэффициенты равны. Допустим,  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$ . Графическая интерпретация решения данной задачи представлена на рис. 10.

Следует иметь в виду, что на практике решение задач проектирования таких сложных объектов, как автомобиль (в частности автобус), связано с нахождением экстремумов целевых функций значительно большего количества управляемых параметров, и столь простая графическая интерпретация метода невозможна. Тем не менее, для поставленной задачи возможен поиск оптимального соотношения  $a/L$ , при котором модель автобуса будет иметь наилучшую управляемость и устойчивость как при входе в поворот, так и смене полосы движения.

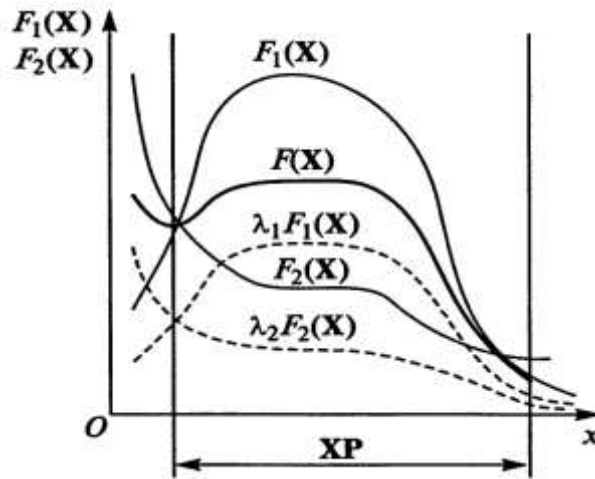


Рис. 10. Графическая интерпретация метода свертки

На рис. 10 показаны соответствующие графики, а также график изменения целевой функции  $F(X)$ , где  $F = V_{кр}$  – критическая скорость совершения маневра,  $X = a/L$ .

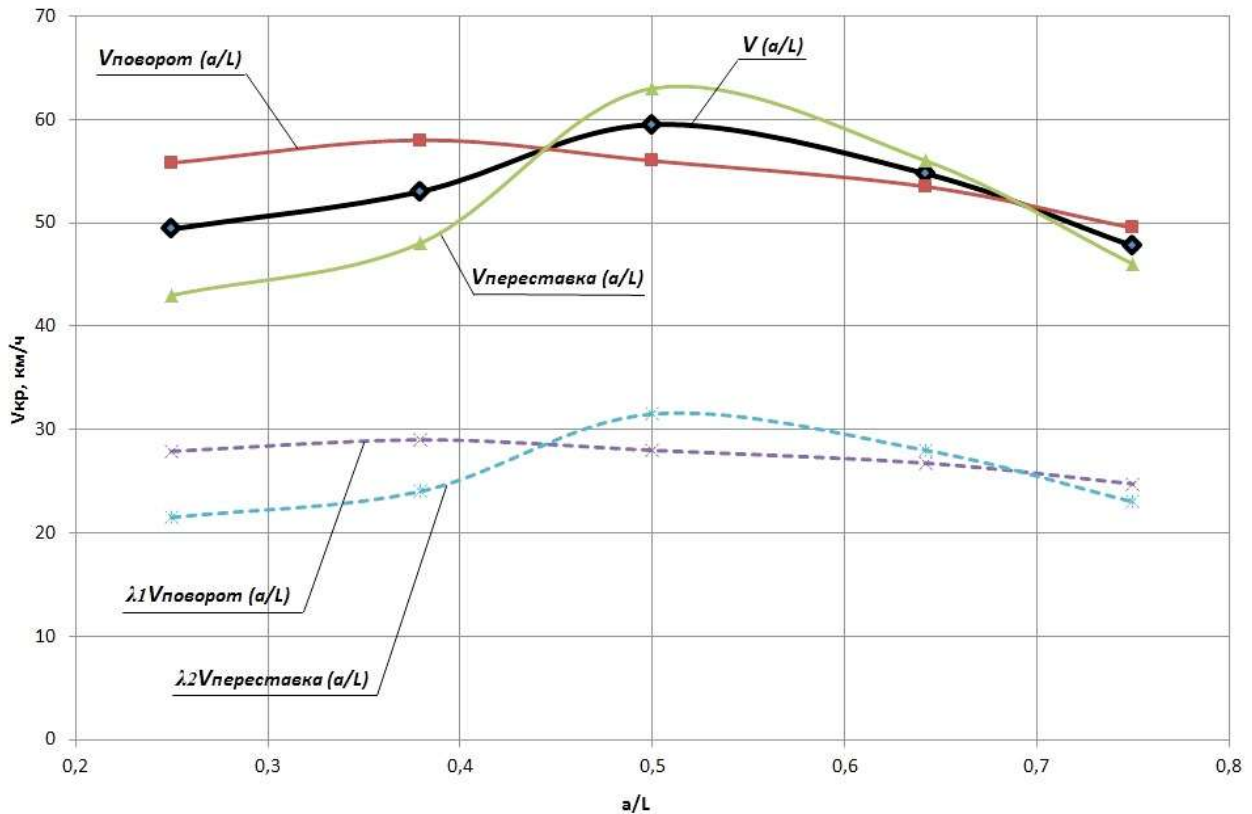


Рис. 11. График изменения целевой функции  $V_{кр}(a/L)$ , полученный по методу свертки, при одинаковых весовых коэффициентах  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$

Из рис. 11 видно, что для рассматриваемой модели автобуса оптимальным является соотношение  $a/L = 0,5$ . Из графиков также видно, что при значении  $a/L < 0,5$  смещение положения центра тяжести к передней оси сопровождается лучшими показателями по входу в поворот, но худшими по переставке. Одновременно с этим при  $a/L > 0,5$  смещение положения центра к задней оси одинаково сказывается на управляемости и устойчивости как при входе в поворот, так и при переставке. Следует также отметить, что у выбранного автобуса-аналога ПАЗ-320402-03 соотношение  $a/L$  при снаряженной массе составляет 0,52; при пол-

ной 0,64. Исходя из полученных результатов имитационного моделирования можно заключить, что при снаряженной массе показатели автобуса по переставке близки к оптимальным. Однако при полной массе автобус будет иметь худшие показатели движения как в условиях смены полосы движения (переставки), так и при входе в поворот.

На основе полученных результатов можно рекомендовать следующие мероприятия, направленные на улучшение управляемости и устойчивости автобусов среднего класса:

- стремиться к смещению центра масс автобуса от задней оси к положению центра масс, соответствующему  $a/L = 0,5$ ;
- использовать стабилизаторы поперечной устойчивости с более высокими показателями жесткости;
- использовать упругие элементы подвески, имеющие нелинейные упругие характеристики;
- использовать функциональные возможности систем активной безопасности в частности системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ);
- стремиться к снижению высоты положения центра масс автобуса.

### Библиографический список

1. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
2. ГОСТ Р 52302-2004 Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания. – М.: Изд-во стандартов, 2004.
3. Тумасов, А.В. Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов [ и др.] // Журнал ААИ. 2011. №2. С. 34–37.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**S.Y. Kostin<sup>1</sup>, A.V. Tumasov<sup>1</sup>, V.A. Koltunov<sup>2</sup>**

### THE RESEARCH OF BUS ACTIVE SAFETY BY MEANS OF SIMULATION METHODS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alekseev<sup>1</sup>,  
Pawlowsky branch of NNSTU<sup>2</sup>

**Purpose:** The estimating of bus behavior in different situations (entering into the turn, lanes changing) on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

**Design/methodology/approach:** The simulation study based on dynamic analysis method with using of SDK-software that allows take into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior.

**Findings:** It is possible to apply the research results for preliminary estimation of bus active safety characteristics on the basis of simulation results.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of vehicle safety and estimation of effectiveness of active safety systems components.

**Originality/value:** The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of vehicle behavior that could have a good practical application during the vehicle design stage.

*Key words:* bus, handling and stability, braking properties, modeling.



УДК 629.113

В.В. Беляков<sup>1</sup>, У.Ш. Вахидов<sup>1</sup>, Д.А. Галкин<sup>2</sup>,  
А.С. Зайцев<sup>3</sup>, Е.М. Кудряшов<sup>3</sup>, В.С. Макаров<sup>1</sup>

## ПОДВИЖНОСТЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО ДОРОГАМ ТИПА «STONE-ROAD»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва<sup>2</sup>,  
ООО «Военно-инженерный центр»<sup>3</sup>

Приводится классификация дорог типа «stone-road», а также их статистические характеристики. Показано отличие их параметров от ранее изученных поверхностей движения. Подвижность по дорогам данного типа определяется либо по плавности хода, либо задеванием днищем машины о камни. Даны зависимости для получения характеристик плавности хода машины. Приведены графики зависимости скорректированных среднеквадратичных ускорений от скорости движения автомобиля ГАЗ-2330 «Тигр» и нормируемые показатели по времени работы, а также моменты удара днищем машины о камни. Показана целесообразность применения фрактальных моделей опорного основания для определения подвижности специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road».

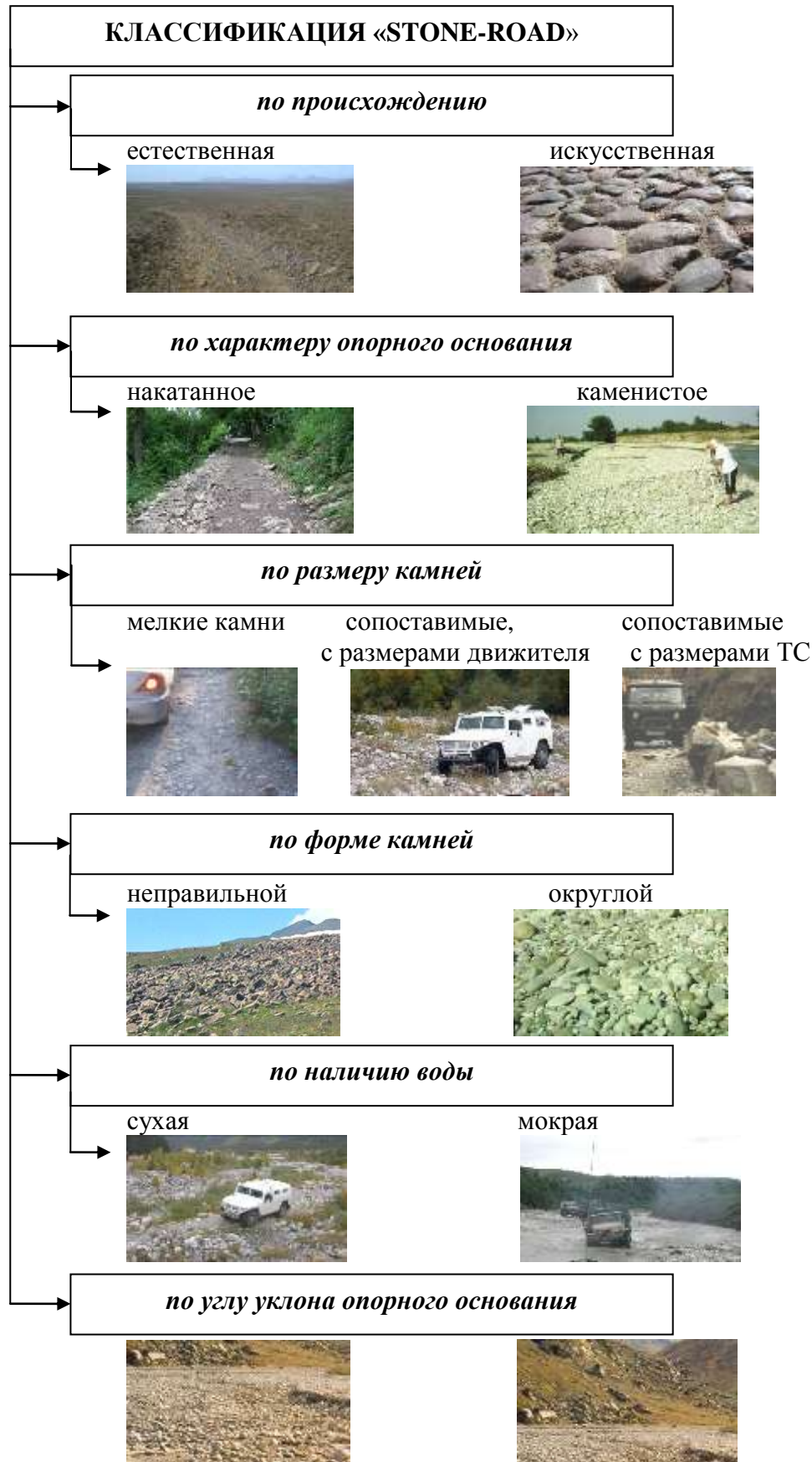
*Ключевые слова:* дорога типа «stone-road», подвижность колесных машин, плавность хода, фрактальная модель дороги.

Одним из важнейших свойств характеризующих транспортные средства является подвижность. *Подвижность* можно определить как 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. При этом проходимость – это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью, а также при преодолении различных препятствий. Она относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности. *Мобильность* – эксплуатационная надежность транспортного средства (ТС). *Живучесть* – это отказная надежность ТС.

Специфика движения транспортных средств в условиях Северного Кавказа заключается в том, что основной объём транспортных операций осуществляется по поймам рек, обладающих определёнными геометрическими и физико-механическими свойствами, а именно:

- опорная поверхность представляет собой каменистую поверхность, деформацией которой, во время движения транспортных средств можно пренебречь;
- геометрические параметры поверхности движения определяются размерами каменистых включений, имеющих округлую форму;
- величина каменистых включений определяется углом наклона поверхности движения к горизонтальной поверхности, чем более ровная поверхность, тем меньше размеры валунов.

Дороги данного типа можно классифицировать следующим образом [1].

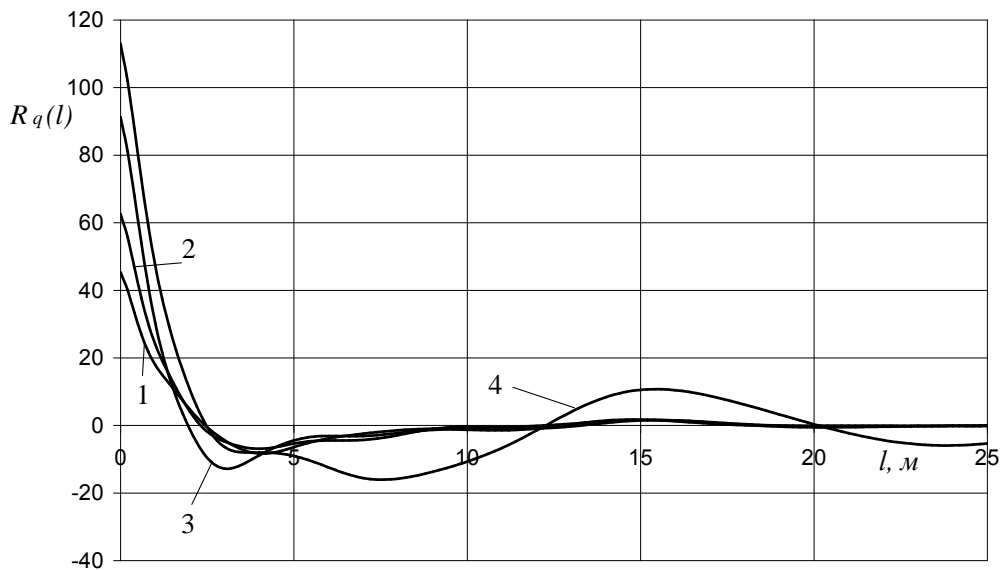


Анализ данных специфических поверхностей движения показал, что условия движения транспортных средств на них значительно отличаются от основных параметров, описанных в работах российских и зарубежных учёных. Таким образом, для выработки рекоменда-

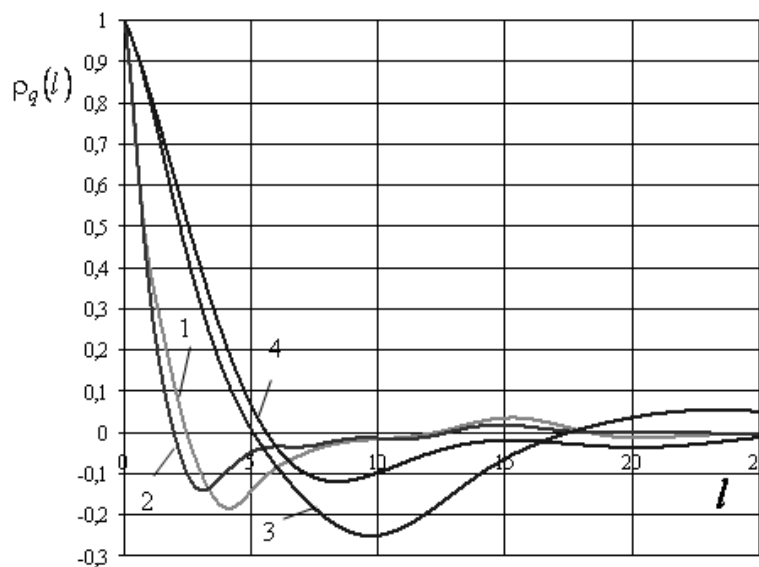
ций по применению тех или иных конструктивных решений необходимо оценить влияние параметров неровности исследуемых трасс движения на проходимость и комфортность движения по дорогам типа «stone-road», а именно микропрофиль.

Значительный вклад в классификацию микропрофиля бездорожья территории Советского Союза внесли ученые Нижегородской научной школы Барахтанов Л.В. и Ершов В.И. В работах [2, 3] приводятся данные о вероятностных характеристиках и зависимости для описания следующих трасс движения: ровные луга, малопересеченные луга, среднепересеченные луга, сильнопересеченные луга, валы, кочки.

В работах [4–6] приводятся данные о характеристиках микропрофиля дорог типа «stone-road». Для дорог типа «stone-road» графики корреляционной функции будут выглядеть следующим образом.



**Рис. 1. Графики корреляционной функции поверхности поймы реки в зависимости от угла наклона опорного основания:**  
1 - угол наклона 0,05 рад; 2 - 0,10 рад; 3 - 0,15 рад; 4 - 0,20 рад



**Рис. 2. Нормируемые корреляционные функции:**  
1 – в пойме реки при угле наклона 0,05 рад; 2 – в пойме реки при угле наклона 0,15 рад;  
3 – среднепересеченные луга; 4 – валы

Сравним полученные функции с данными, приведенными в работах [1, 2]. Как видно из рис. 2, полученные функциональные зависимости имеют значительное отличие.

Таким образом, зная эксплуатационные параметры машины и частотную характеристику неровностей поверхности движения, решая стандартную систему дифференциальных уравнений, получим зависимость изменения вибронегруженности транспортного средства в зависимости от скорости движения и параметров подвески. Зная характер колебаний центра тяжести автомобиля и его угловые перемещения, по законам геометрии легко можно определить динамическое изменение дорожного просвета автомобиля, а следовательно, и оценить его проходимость с учётом колебательных движений автомобиля (задевание днищем машины о камни).

Для оценки плавности хода была использована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{z}_i + (k_{ni} + k_{ui}) \dot{z}_i + (c_{ni} + c_{ui}) z_i - k_{ni} (\dot{z}_0 + l_i \dot{\phi}_0) - c_{ni} (z_0 + l_i \phi_0) &= k_{ui} \dot{q}_i + c_{ui} q_i; \\ m_{nm} \ddot{z}_0 + \dot{z}_0 \sum_{i=1}^n k_{ni} + z_0 \sum_{i=1}^n c_{ni} + \dot{\phi}_0 \sum_{i=1}^n k_{ni} l_i + \phi_0 \sum_{i=1}^n c_{ni} l_i + k_c (\dot{z}_0 + l_c \dot{\phi}_0) &= k_c \dot{z}_c + c_c z_c + \\ &+ \sum_{i=1}^n (k_{ni} \dot{z}_i + c_{ni} z_i); \\ J_y \ddot{\phi}_0 + \dot{\phi}_0 \sum_{i=1}^n k_{ni} l_i^2 + \phi_0 \sum_{i=1}^n c_{ni} l_i^2 + \dot{z}_0 \sum_{i=1}^n k_{ni} l_i + z_0 \sum_{i=1}^n c_{ni} l_i + k_c (\dot{z}_0 + l_c \dot{\phi}_0) &= k_c (\dot{z}_0 + l_c \dot{\phi}_0) l_c + c_c (z_0 + l_c \phi_0) l_c = \\ = (k_c \dot{z}_c + c_c z_c) l_c + \sum_{i=1}^n (k_{ni} \dot{z}_i + c_{ni} z_i) l_i; \quad m_c \ddot{z}_c + k_c \dot{z}_c + c_c z_c &= k_c (\dot{z}_0 + l_c \dot{\phi}_0) + c_c (z_0 + l_c \phi_0). \end{aligned}$$

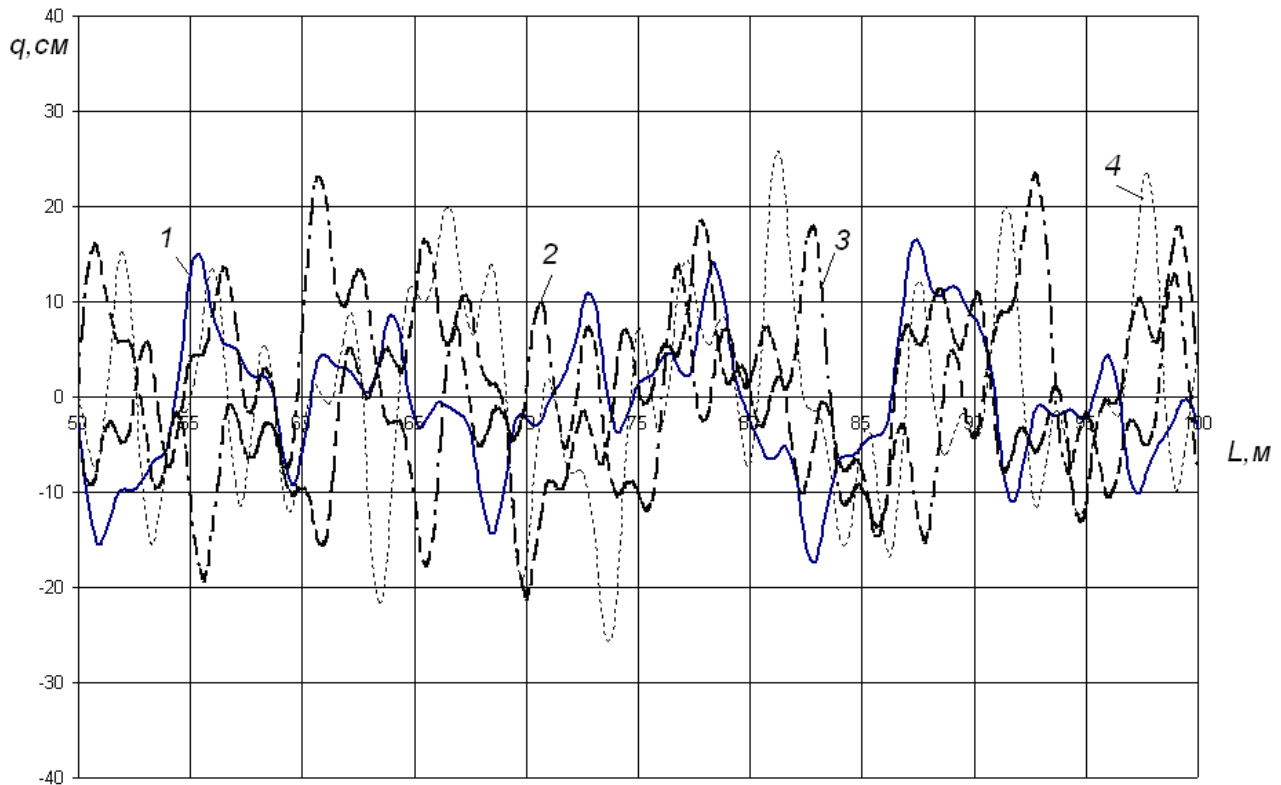
В приведенных зависимостях  $z_0(t), z_c(t), z_i(t)$  – обобщенные координаты, характеризующие вертикальные перемещения массы поддрессоренной части, приходящейся на центр масс поддрессоренной части машины, сиденья, массы неподдрессоренной части  $i$ -й оси;  $\phi_0(t)$  – обобщенные координаты, характеризующие угловые перемещения массы поддрессоренной части относительно ее центра масс;  $q_i(t)$  – кинематическое возмущение на колеса  $i$ -й оси;  $m_{nm}, m_c, m_i, m_m$  – массы поддрессоренной части, приходящиеся на поддрессоренной части машины, сиденья с человеком, поддрессоренной части  $i$ -й оси и ведущего моста;  $J_y$  – момент инерции массы поддрессоренной части относительно поперечной оси  $y$ , проходящей через ее центр масс;  $k_{ni}, k_{ши}, k_{шм}, k_c$  – приведенные к центру пятна контакта шины с опорной поверхностью (колеи) коэффициенты демпфирования подвесок и шин  $i$ -й оси, шин ведущего моста и сиденья;  $c_{ni}, c_{ши}, c_c$  – приведенные к центру контакта шины с опорной поверхностью (колеи) коэффициенты жесткости подвесок и шин  $i$ -й оси, сиденья;  $l_i$  – расстояние от центра масс поддрессоренной части до  $i$ -й оси;  $l_c$  – расстояние от центра масс поддрессоренной части до оси качания сиденья;  $i$  – номер оси;  $n$  – число осей.

Для решения системы уравнений был использован пакет программ для компьютерного моделирования MatLab/Simulink, в котором можно по средством интуитивно понятного графически-блокового интерфейса легко решаются системы дифференциальных уравнений.

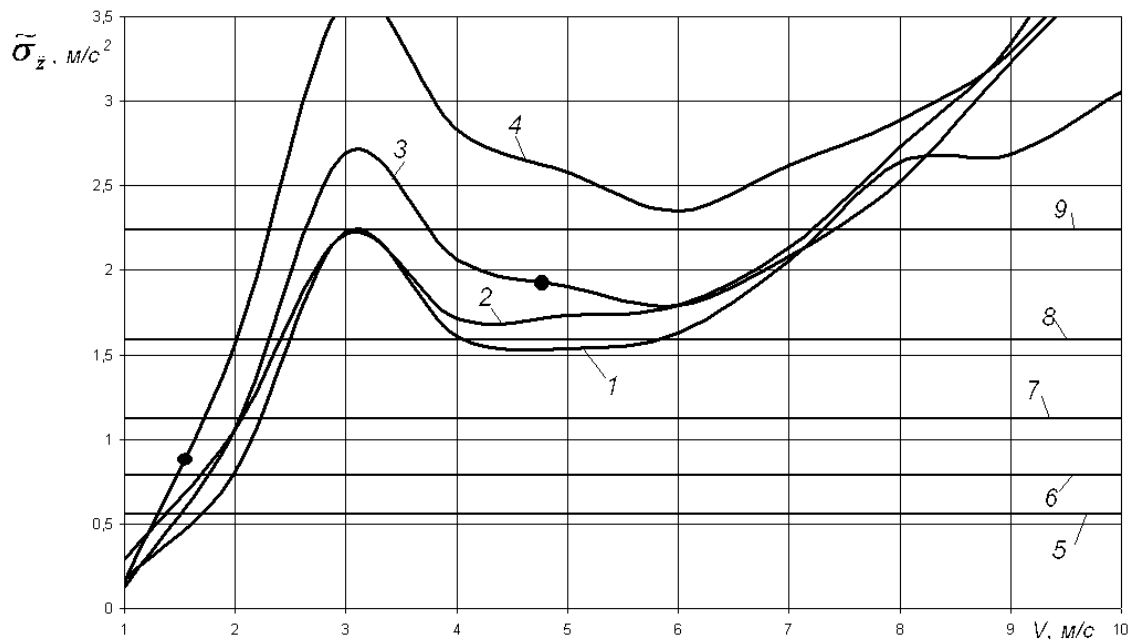
По известным корреляционным функциям можно построить микропрофиль, руководствуясь правилом «трех среднеквадратичных отклонений».

Как видно из графиков, дороги типа «stone-road» характеризуются большей частотой процесса, наряду с большими значениями амплитуд. В результате преобразований получим значения ускорений для различных скоростей движения. По полученным значениям можно определить среднеквадратичные ускорения, действующие на водителя. В соответствии с ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрационная безопасность. Общие требования» можно определить до-

пустимые значения виброускорений и соответственно скоростей движения по «stone-road» с различными характеристиками.



**Рис. 3.** Смоделированный микропрофиль дорог типа «stone-road» для угла наклона:  
1 – 0,05 рад; 2 – 0,10 рад; 3 – 0,15 рад; 4 – 0,20 рад



**Рис. 4.** Зависимость скорректированных среднеквадратичных ускорений от скорости движения автомобиля ГАЗ-2330 по «stone-road» с различными углами наклона к горизонту и нормируемые показатели по времени работы: 1 – 0,05 рад; 2 – 0,10 рад; 3 – 0,15 рад; 4 – 0,20 рад; 5 – 8 ч – нормируемые показатели времени работы, 6 – 4 ч, 7 – 2 ч, 8 – 1 ч, 9 – 0,5 ч; • – моменты касания днищем машины о камни

Для машин с малыми радиусами продольной проходимости необходимо оценить возможность движения по зависанию (ударам) на днище, причем следует проанализировать все расстояния по днищу машины между колесами.

Рассмотрим зависимости по определению плавности хода и учетом задевания днища о камни при разных скоростях на примере автомобиля ГАЗ-2330 «Тигр».

В соответствии рис. 4 можно получить значения времени работы водителей и скорости движения машин с учетом касания днища машины.

Таблица

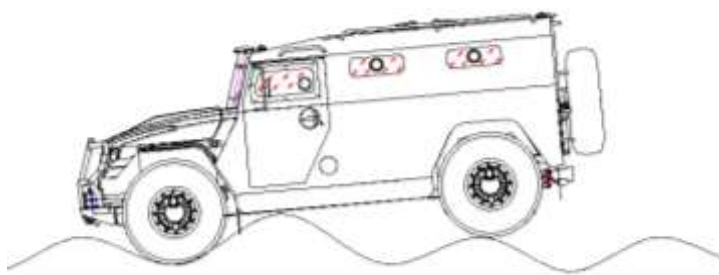
**Допустимые скорости движения машины (м/с)  
по дорогам типа «stone-road» с учетом касания днища**

Время работы, ч.	Угол наклона дороги типа «stone-road» к горизонту:							
	0,05		0,10		0,15		0,20	
	без учета днища	с учетом днища	без учета днища	с учетом днища	без учета днища	с учетом днища	без учета днища	с учетом днища
8	1,7	1,7	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3	1,3
4	2	2	1,7	1,7	1,75	1,75	1,45	1,45
2	2,25	2,25	2,1	2,1	2,05	2,05	1,7	1,5
1	2,5 4-5,85	2,5 4-5,85	2,4	2,4	2,3	2,3	2,05	1,5
0,5	7,3	7,3	7,2	7,2	2,65 3,75-7,4	2,65 3,75-4,7	2,3	1,5

Для автомобиля ГАЗ-2330 «Тигр» допустимые скорости движения составляют для «stone-road» с углом к горизонту 0,05рад 1,7–7,3 м/с; с углом к горизонту 0,10 рад 1,4–7,2 м/с; с углом к горизонту 0,15рад 1,5–4,7 м/с; с углом к горизонту 0,20 рад 1,3–1,5 м/с. Меньшее значение для времени работы водителя 8 ч, большие – для 0,5 ч. Для углов наклона поверхности 0,15 и 0,2 рад ограничение скорости движения происходит в результате задевания днищем машины о камни. Таким образом, для последних типов дорог целесообразно применение машин с аналогичными характеристиками и большим дорожным просветом не менее 0,5 м для полного использования возможных скоростей движения.

Рассмотренная расчетная модель оценки плавности хода основывается на том, что профиль дороги представляет совокупностью гармоник разной частоты и амплитуды. Так, движение машины будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

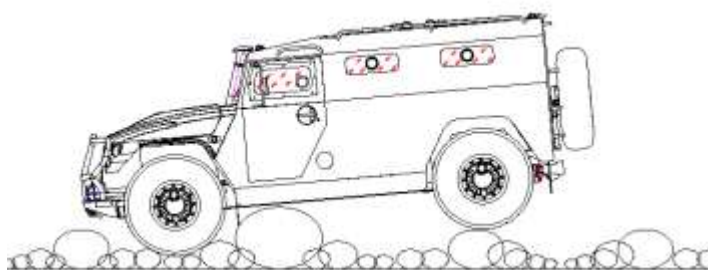
Однако не всегда для дорог типа «stone-road» данная математическая модель будет адекватна. Поэтому возможно применение модели на основе фрактального исчисления. Преимущество данных моделей заключается в их наглядности и похожести на исходный профиль дороги. На рис. 6 показано движение машины по реальной «stone-road» и двухмерная модель данного опорного основания смоделированного при помощи фракталов.



**Рис. 5. Движение машины по неровностям  
синусоидального типа**



а)



б)

**Рис. 6. Движение машины по «stone-road»:**

*a* – реальная дорога; *б* – смоделированная при помощи фрактального исчисления

На рис. 5 и рис. 6 показано одно и то же опорное основание. Если, используя классический подход обработать данные о высотах неровностей на рис. 6, б, то после всех преобразований получится рис. 5.

Представленная модель рассчитана и построена в двухмерной постановке. Рассмотрим основные этапы обработки экспериментальных данных и преобразований, необходимых для создания таких моделей:

- для исследуемой области будет характерно некоторое количество больших камней, затем группа поменьше размером и еще меньше;
- необходимо замерить размеры камней каждой группы и составить статистику;
- для группы больших камней необходима статистика по взаимному расположению относительно друг друга, для групп камней поменьше – относительное удаление от камней большего размера. Для них также необходимо собрать статистику распределения.

Зависимости для связи параметров размеров и расположения «stone-road» в разных местах могут быть различны, однако, зависимость в общем виде будет справедлива для всех.

Зависимость для определения размеров камней (необходимо задавать один характерный размер камня, остальные определяются в соответствии с ним):

$$A_i = k_{Ai}^0 A_0 f_A(n),$$

где  $A_i$  – размер камня;  $A_0$  – математическое ожидание размера камней самых больших размеров;  $k_{Ai}^0$  – коэффициент, учитывающий распределение размеров в группе;  $f_A(n)$  – функциональная зависимость, связывающая средние значения камней в группах с разными размерами;  $n$  – порядковый номер группы (при  $n = 0$  очевидно, что  $f_A(n) = 1$ ).

Общий вид зависимости по взаимному расположению носит аналогичный вид:

$$L_i = k_{Li}^0 L_0 f_L(n).$$

Число камней отстоящих от базового (для группы самых больших, очевидно, оно равно двум):

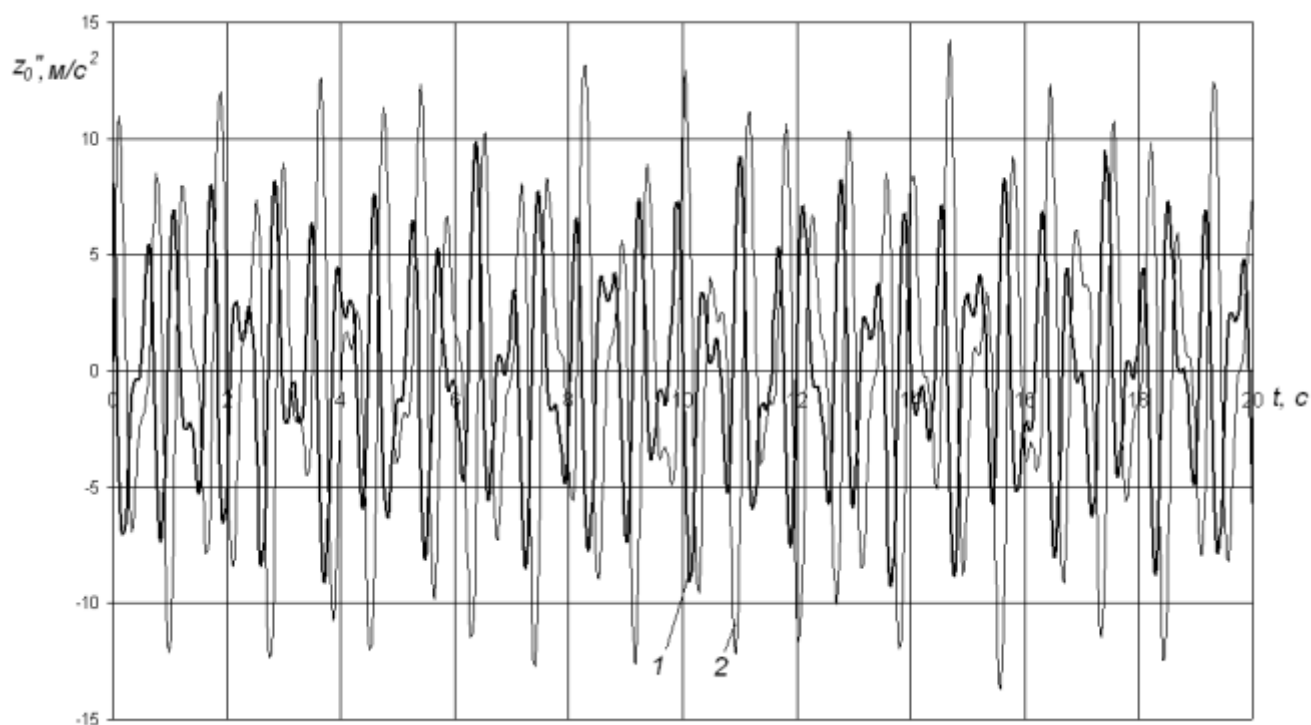
$$M_i = k_{Mi}^1 M_1 f_M(n),$$

где  $M_i$  – число камней;  $M_1$  – математическое ожидание числа камней, отстоящих от наибольших;  $k_{Mi}^1$  – коэффициент, учитывающий распределение значений в группе;  $f_M(n)$  –

функциональная зависимость, связывающая средние значения камней в группах с разными размерами;  $n$  – порядковый номер группы (при  $n=1$  очевидно, что  $f_L(n)=1$ ).

Таким образом, задав необходимое число итераций, можно смоделировать достаточно подробно дорогу типа «stone-road». Отметим что, для моделирования задачи в трехмерной постановке необходимо учитывать параметр взаимного угла расположения. Вид зависимости аналогичен приведенным выше.

В результате моделирования движения в среде MatLab/Simulink были получены следующие значения ускорений на рабочее место водителя.



**Рис. 7. Пример действия ускорений на рабочее место водителя в зависимости от времени при движении по «stone-road»:**

1 – при модели дороги в виде синусоид; 2 – при фрактальной модели дороги

Как видно из рис. 7, различия в значениях виброускорений для классической модели и фрактальной очевидны. Поэтому развитие данного направления является актуальным.

#### Библиографический список

1. **Макаров, В.С.** Математическое моделирование трасс движения транспортных средств на примере дорог типа «stone-road» / В.С. Макаров, К.О. Гончаров, В.В. Беляков // Изв. АИН РФ им. акад. А.М. Прохорова. Юбилейный том, посвященный 20-летию Академии инженерных наук РФ; под ред. Ю.В. Гуляева. – М. – Н. Новгород: НГТУ, 2011. С. 129–134.
2. **Ершов, В.И.** Вероятностные характеристики микропрофиля пересеченной местности / В.И. Ершов, Л.В. Барахтанов // Изв. вуз. Машиностроение. 1971. № 4. С. 117–119.
3. **Барахтанов, Л.В.** Классификация микропрофиля бездорожья территории Советского Союза. Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов // Изв. вуз. Машиностроение, 1975. № 5. С. 13–15.
4. **Вахидов, У.Ш.** Транспортно-технологические проблемы Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, Ю.И. Молев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2009. – 387 с.



5. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.С. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. №1. С. 82–87.
6. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Беляков, В.С. Макаров // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. №7. С. 24–26.

*Дата поступления  
в редакцию 06.02.2012*

**V.V. Belyakov<sup>1</sup>, U.Sh. Vahidov<sup>1</sup>, D.A. Galkin<sup>2</sup>, A.S. Zaytsev<sup>3</sup>,  
E.M. Kudryashov<sup>3</sup>, V.S. Makarov<sup>1</sup>**

### **MOBILITY SPECIAL VEHICLES ON ROADS TYPE «STONE-ROAD»**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev <sup>1</sup>,  
Military-Industrial Company", Moscow <sup>2</sup>,  
Center of Military Engineering <sup>3</sup>

This article describes the classification of road type «stone-road», as well as their statistical characteristics, unlike their parameters shown on the previously studied surfaces of the movement. It is said that the mobility on the roads of this type is determined either by ride or car head grazing on the rocks. The ride vehicle are given according to characterize. A plot of corrected rms accelerations on the speed of the car GAZ-2330 "Tiger" and regulated by the time work as well as moments of hitting bottom of car with stones are shows. The expediency of the use of fractal models of the reference is based for determining the mobility of special vehicles on the roads of the type «stone-road»

*Key words:* road type «stone-road», the mobility of wheeled vehicles, smoothness of a course, the fractal model of the road.

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

---

---

УДК 629.12

Фам Фу Тхань, Фан Ван Ан

### СКОРОСТНОЕ СУДОСТРОЕНИЕ. РЕТРОСПЕКТИВА

Вьетнамский национальный технологический институт

Скоростные речные и морские суда с динамическими принципами поддержания – хорошо изученная область техники. Во многих странах создано немалое количество коммерческих и военных образцов выполняющих регулярные рейсы или несущих ту или иную службу. Но некоторые страны только входят в рынок подобных судов, осваивают данную технику или пытаются создавать собственную в зависимости и опираясь на условия прибрежных зон, речных акваторий.

В статье предпринята попытка анализа первоначального опыта ведущих стран по созданию судов на воздушной подушке, с целью последующей адаптации данных идей в стране автора статьи.

*Ключевые слова:* скоростные суда, история судостроения.

Скорость – одна из существенных составляющих параметров любого транспортного средства. С 1970-х годов цена топлива становится важным компонентом эксплуатационных расходов, транспортная эффективность выступает существенным фактором, руководящим развитием транспортной сферы. В течение прошлого столетия скорости обслуживания многих транспортных средств увеличились, используя в своих интересах быстрое развитие двигателей внутреннего сгорания. Так, скорость самолетов увеличилась в 10 раз, автомобилей – в три. Напротив, самая высокая скорость водного транспорта увеличилась меньше чем в два раза и приблизилась к скорости обслуживания приблизительно в 40 узлов.

Некоторые аквапланирующие суда и скоростные военно-морские суда достигли этой скорости в 1920-х. Они были способны сделать это потому, что полезная нагрузка не выступала ключевым требованием (большая часть несущей способности тратилась на силовую установку и топливо). Гидродинамическое сопротивление служило главным фактором, ограничивающим их возможности.

Водоизмещающие суда, перемещающиеся с высокой скоростью, имеют волновое сопротивление, пропорциональное квадрату его скорости. Это ограничивает максимальную скорость судна, в том числе и потому, что невозможно бесконечно увеличивать мощность силовой установки. Однако оказалось, что можно спроектировать суда с конструкцией, обеспечивающей движение на принципе поверхностного планирования, чтобы уменьшить волновое сопротивление на более высоких скоростях. На данном принципе было построено много различных судов, хотя мощность силовой установки, требуемая для высокой скорости, была ограничена их размерами. Они нашли применение для отдыха, скоростных гонок и в военных целях, например, скоростные патрульные суда.

Аквапланирующие суда продемонстрировали высокий потенциал для увеличения скорости, но хлопанье, вызываемое столкновением с волнами, все еще создавало проблемы для команд, пассажиров и непосредственно корпусам судов из-за высокого вертикального ускорения.

Очевидно, что существует две возможности избежать хлопанья: надо или изолировать

корпус от контакта с водной поверхностью, или погрузиться настолько, насколько это возможно, чтобы уменьшить волновое поверхностное сопротивление. Развитием первой из этих идей явилось создание судов на подводных крыльях, аквапланирующих катеров, судов на воздушной подушке, экранопланов. Вторая идея привела к созданию судов с корпусами малого сечения (по типу морской нож), что в дальнейшем было развито в создание высокоскоростных катамаранов.

Классификация типов высокоскоростных водных транспортных средств показана в табл. 1.

Предметом этой статьи является обзор начала проектирования и создания судов на принципах поддержания давлением воздуха в воздушной подушке.

Воздушная подушка определяется как некая твердая структура, находящаяся на достаточном расстоянии от водной поверхности, для уменьшения влияния водной поверхности и волнового сопротивления, в то же время имеющая закрытую зону, создающую зону воздушного давления, позволяющую обеспечить достаточный промежуток между поверхностью и поднимаемым телом. При этих обстоятельствах произведенное давление во много раз больше, чем давление под свободным крылом, в то же время сопротивление поднятого таким образом тела достаточно мало по сравнению, например, с поверхностным сопротивлением аквапланирующего судна (глиссированием).

Таблица 1

## Классификация скоростных судов

Принцип поддержания	Классификация	Классификация
Гидростатический	Водоизмещающие	Монокорпусные
	«Морской нож»	Мультикорпусные
Гидродинамический	Аквапланирующие (глиссирующие)	Монокорпусные
	На подводных крыльях	Мультикорпусные
Аэростатический	«Воздушная смазка»	Ступенчатые аквапланирующие корпуса
		Воздушная каверна
	Воздушная подушка с автономным нагнетанием	Амфибийные корпуса с гибким ограждением
		Корпуса с жестким ограждением
Воздушная подушка с нагнетанием от маршевого винта	Амфибии с закрытой камерой	
	Амфибии с открытой камерой	
Аэродинамический	Катамаранные корпуса туннельного типа с канальной продувкой	
	Экранопланы	Экранопланы со вспомогательными силовыми установками принудительного нагнетания воздушной подушки

Идея использования воздушной подушки для уменьшения сопротивления водной поверхности появилась более ста лет назад. В 1877 в Великобритании сэр Джон Торникрофт предложил большое число форм корпусов с выступами и впадинами на днище для создания воздушного пузыря под днищем. Данные модели он тестировал как альтернативу обычным водоизмещающим торпедным катерам, строившимся его компанией в то же время для британского флота. Эта идея была проверена не на всех типоразмерах судов, хотя на созданных образцах были получены неплохие результаты.

В 1882 г. шведский инженер Густав де Лаваль получил патент на идею «воздушной смазки» корпусов судов обычной формы. Было построено судно по предложенной Лавалем

конструкции, но эксперимент не имел успеха. Воздушная смазка создавала турбулентную смесь воздушных пузырей и воды вокруг корпуса, а не «смазывающий» слой воздуха, в результате чего скорость увеличить не удалось.

С тех пор идея воздушной смазки изучалась многими инженерами и учеными, и в итоге на практике было установлено, что однородную воздушную ленту на днищевой поверхности обычного водоизмещающего корпуса создать на практике довольно трудно. И в противоположность, дополнительный турбулентный слой увеличивал сопротивление водной поверхности. Это означало, что необходимо создавать более стабильную воздушную прослойку.

В 1925 г. Д. К. Уорнер использовал принцип «захваченного воздушного пузыря», для создания лодки, выигравшей морские гонки в Коннектикуте (США). Он использовал судно с боковыми реданами и кормовым воздушным затвором.

В 1935 г. финский инженер Тойвио Каарио (Toivio Kaario) построил два опытных прототипа экраноплана, из которых один с двумя нагнетательными камерами, а другой – с передним разрезающим крылом (рис. 1).

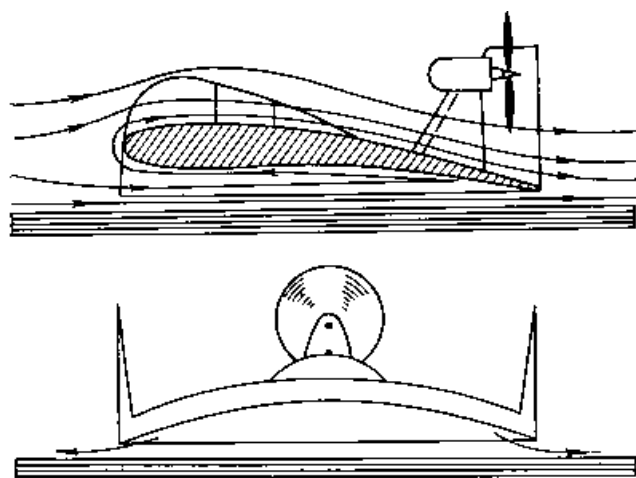


Рис. 1. Эскиз СВП, построенного Тойвио Каарио в 1935 г.

В России в конце 20-х – начале 30-х гг. XX века конструированием судов на воздушной подушке и исследованиями в этой области занимались лишь немногие энтузиасты. Первоначальником был В. И. Левков. В 1927 г. молодой доцент В.И. Левков, специалист в области аэродинамики, начал опыты над моделями аппаратов на воздушной подушке и в 1933г. разработал методику расчета таких аппаратов, а в 1934 г. было созданное первое в мире парящее судно – двухместный катер Л-1, успешно прошедший испытания.



Рис. 2. СВП Л-5

На базе Л-1 коллектив, возглавляемый Левковым, построил несколько катеров. Л-5 массой 9 т на испытаниях в 1937г. развил 73 узла! (рис. 2). Было создано еще несколько парящих судов массой до 15 т, а в проектах уже фигурировали 30-тонные аппараты. Война прервала работу.

И хотя первенство создания судна на воздушной подушке приписывают английскому

инженеру Кристоферу Коккереллу, он создал такое судно лишь в 1950 г. Работая в Маркони Компании в период 1935 по 1950 гг. и будучи инженером-конструктором, он поставил перед собой задачу попытаться увеличить скорость морского судна. Сначала он экспериментировал с воздушной смазкой корпуса, но сделал вывод, что существенное сокращение трения могло бы быть получено только тогда, когда корпус поддерживался бы на воде действительно толстой воздушной подушкой. В 1953 г. начал работу над судном на воздушной подушке, выполнил свои начальные эксперименты на Оултон Броуд, Норфолк, и зарегистрировал свой первый патент на судно на воздушной подушке в 1955 г. В 1957 г. к нему пришла идея о применении гибкой юбки в кораблестроении, и в 1958 г. он нашел коммерческую поддержку. Первое выполненное в полный размер судно на воздушной подушке было построено и пересекло пролив Ла-Манш с изобретателем на палубе.

В середине 1950-х годов XX в. для развития программы скоростного судостроения британское, а позже и американское правительство выделило большое финансирование. В тот же самый период Китай и СССР также разворачивали подобные программы.

Чтобы исследовать воздушное смазывание некоторые эксперименты по буксировке резервуаров были выполнены в MARIC (Marine Research Institute of China, Шанхай, Китай) в 1968 г., но тесты подтвердили более ранние результаты Лавалья, Коккерелла и других о необходимости отделения корпуса судна от водной поверхности с помощью каверны или туннельной формы корпуса.

Транспортные средства на воздушной подушке могли быть успешно развиты только при использовании легких материалов для корпуса и двигателей. Первые опытные образцы использовали опыт авиационного проектирования и изготовления для достижения необходимого соотношения мощности силовой установки и веса судна.

Опыт амфибийных самолетов или летающих лодок был особенно ценен, так как для обычных самолетов использовались не коррозионно-стойкие материалы, в то время как коррозионная стойкость аппаратов эксплуатируемых в морской соленой воде - важный параметр проектирования морских транспортных средств.

Использование измененной формы крыла позволяет транспортным средствам достигнуть скорости, близкой к скорости самолетов. Вот несколько концепций подобных транспортных средств начального периода.

#### **Амфибийное скоростное судно на воздушной подушке (СВП)**

Амфибийное скоростное судно поддерживается полностью его воздушной подушкой с воздушной завесой (формируется струей высокого давления) или гибкой системой юбок по периметру корпуса. Такие суда обладают, как правило, мелкой или отрицательной осадкой в зависимости от структуры воздушной подушки и амфибийными особенностями. Они могут быть пассивными (буксируемыми другими машинами) или активными, то есть приводятся в движение воздушными пропеллерами или вентиляторами.



**Рис. 4. Китайское СВП модели 722-1**

### Суда с корпусами туннельного (скегового) типа (СС)

Некоторые гибридные суда имеют рифленую поверхность, надувные круглые баллоны, бортовые двигатели, водометы, позволяющие выполнять необходимые функции конкретному судну. Концепция такого судна имеет (рис. 4 и рис. 5) менее гибкую юбку, закрывающую только нос и корму. Днищевая часть корпуса по конструкции схожа с катамаранами. Боковые стенки корпуса или катамаранная схема, носовая и кормовая завесы позволяют создать закрытое пространство под корпусом для нагнетания воздушной подушки и позволяют минимизировать мощность необходимую для подъема судна. Из-за отсутствия утечки воздуха по боковым бортам судна мощность, необходимую для поднятия судна, можно значительно уменьшить по сравнению с СВП. Кроме того, на СС имеется возможность установить обычные водные винты или водометы, используя меньшее пространство для движительных установок по сравнению с воздушными пропеллерами и фановыми вентиляторами на СВП. Это дает возможность устанавливать более компактный движительный комплекс, позволяющий иметь большую полезную нагрузку и упрощает проектирование судов именно большого размера.



**Рис. 5. Китайское судно с корпусом туннельного типа с жесткими боковыми скегами. Пассажирская модель 719-1**



**Рис. 6. Первое китайское пассажирское судно с корпусом туннельного типа с жесткими боковыми скегами (на реке Джин Сах)**

### Экранный эффект и экраноплан

Данные суда несколько отличаются от СВП или СС. Они больше походят на низко летящий самолет. Использование экранопланов основывается на близости к поверхности, чтобы увеличить подъемную силу на крыле специфичной формы. Судно поддерживается в воздухе над поверхностью динамической, а не статической подушкой. Экраноплан (рис. 7) первоначально плавает на воде, и его взлет подобен гидроплану. Крыло самолета работает вблизи поверхности, при этом из-за экранного эффекта создается подъемная сила за счет давления набегающего потока на нижнюю поверхность крыла.

Аэрогидродинамические особенности экраноплана значительно оптимизируют конструкцию судна и улучшают его полезную несущую способность по сравнению с самолетом.

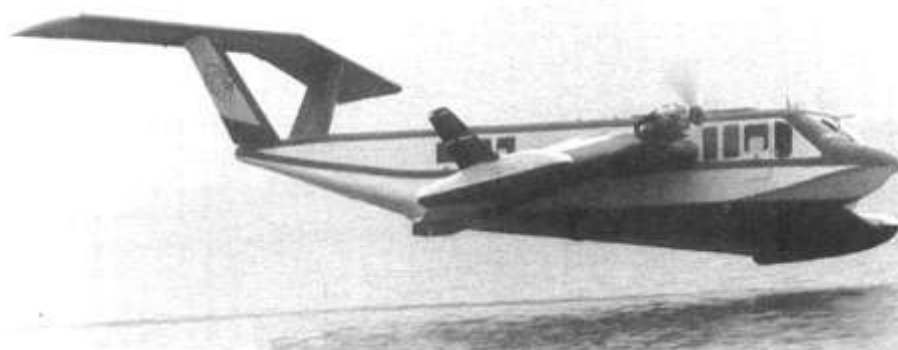


Рис. 7. Китайский экраноплан модели 902

PARWIG, показанный на рис. 9 отличается от экраноплана другим местоположением фановых вентиляторов. Фановые вентиляторы (или вспомогательные винты) расположены вне воздушной подушки, следовательно, большое количество воздуха может быть непосредственно подано в подушку под крылом и производить статический подъем.

Суда на воздушной подушке – часть большей группы транспортных средств высокой эффективности показанных в табл. 1. Они могут быть подразделены, как показано на рис. 8, по их эксплуатационным особенностям, применению, системе гибких ограждений и силовым пропульсивным установкам.

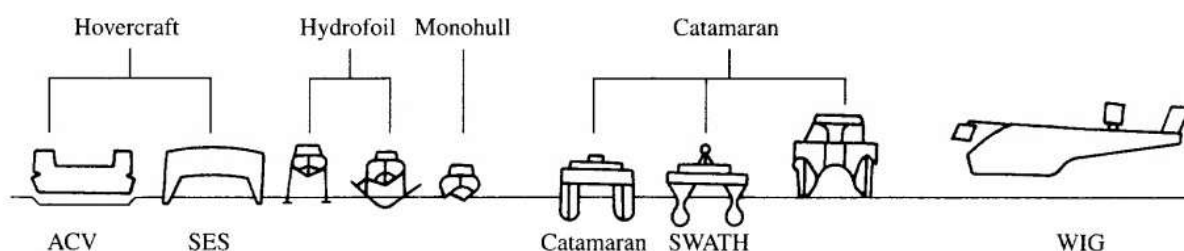


Рис. 8. Классификация скоростных судов

Работа сэра Кристофера Коккерелла привела к постройке в Европе первого полномасштабного скоростного судна на воздушной подушке, “Saunders” SR.N1, которое впервые успешно пересекло Ла-Манш 25 июля 1959 г.

Китай тоже начал собственные исследования в области скоростных судов. В 1957 в Харбинском институте судостроения был успешно разработан проект и в июле 1959 г. проведены первые испытания в открытом море скоростного судна на воздушной подушке на побережье порта Лю Шун. Основные сравнительные параметры первых китайских и британских опытных скоростных судов приведены в табл. 2.



Рис. 9. Первый китайский экраноплан модели 750 с дополнительной силовой установкой

Таблица 2

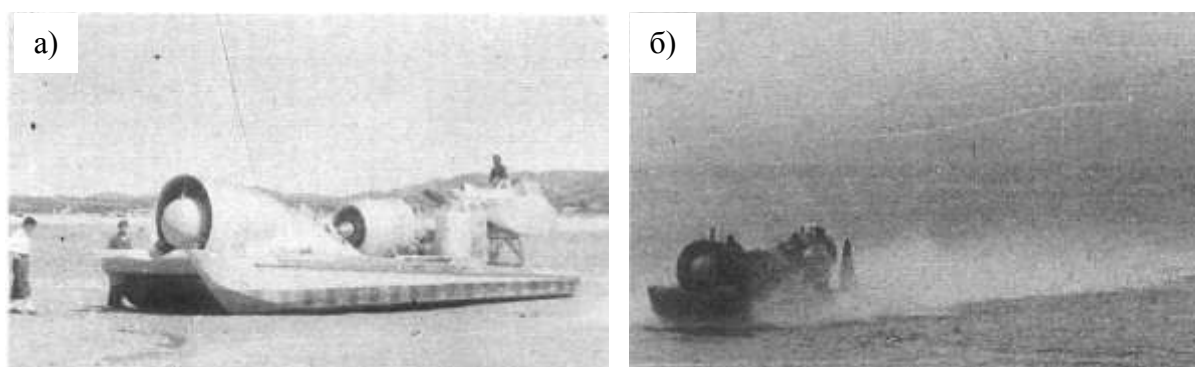
Сравнительные характеристики первых СВП британского и китайского производства

	SR.N1	Craft "33"
Страна	Англия	Китай
Проектировщик и изготовитель	Сандерс Рой	Harbin Shipbuilding Engineering Institute. Harbin Aeroplane Manufactory
Тип судна	СВП	СВП
Вес, т	3,4	4,0
Двигатель	Авиационный поршневой двигатель, P=320 kW 70% мощности на нагнетание подушки, 30% на пропульсивный комплекс	Авиационный поршневой двигатель 176 kW на нагнетание подушки 117 kW на пропульсивный комплекс
Материал корпуса	Алюминиевый сплав	Алюминиевый сплав
Первые морские испытания	Пролив Ла-Манш	Порт Лю Шун
Дальность при первых испытаниях	25 морских миль	16 морских миль



Рис. 10. SR N1 – первый британский СВП, успешно пересекший Ла-Манш





**Рис. 11. Первое китайское экспериментальное скоростное судно "Craft 33" на воздушной подушке, успешно эксплуатируемое на длинные расстояния в акватории порта Лю Шун в июле 1959:**

*а* – на берегу; *б* – в движении на высокой скорости

К началу XXI столетия с тех пор, как прошли первые успешные испытания СВП в Китае, Англии других странах, число СВП, разработанных и построенных и для коммерческого и для военного назначения превысило 2000 во всем мире, включая порядка 1000 Советских платформ в Арктике для разведки нефти. Благодаря быстрому развитию материалов, двигателей, электроники и компьютерных систем в последние годы, скоростные судна имели быстрое развитие от стадии исследования до коммерческого и военного применения (см. сравнение с другими типами транспортных средств в табл. 3).

**Таблица 3**

Тип машины	Время от изобретения до первого применения
Паровые суда	41
Суда на подводных крыльях	35
Подводные лодки	25
Суда на воздушной подушке	13
Реактивные самолеты	12
Самолеты	8

В 60–70-х гг. XX в. концепция скоростного судостроения развилась, особенно начинают развиваться СС в размерах, первоначально предсказанных пионерами (1000 т и более). Хотя в разных странах были приняты различные подходы для развития скоростных судов, все они проходили одинаковые стадии: начальное исследование, разработка концепции, развитие рынка и затем стадия доработки для улучшения параметров экономической эффективности судов, чтобы можно было конкурировать с судами других типов, например, скоростными катамаранами, получившими широкое распространение с 1985 г.

Основные центры аналитического и практического развития скоростных судов сосредотачиваются в Великобритании, России, США и Китае. В Великобритании скоростное судостроение было развито, главным образом, для применения в гражданских целях, в то время как Американское правительство настоятельно поддерживало развитие СВП для военного использования, и только в последнее время увеличило коммерческий интерес. В Китае основное развитие СВП шло параллельно с развитием аналогичных типов судов в Великобритании, начиная с опытных образцов для полномасштабного тестирования. Затем появлялись суда и для коммерческого использования и позже некоторые опытно-экспериментальные модели военного назначения. Большинство СВП и СС в Китае создавалось для коммерческого использования.

В прежнем СССР скоростные амфибийные суда среднего размера были созданы для военного использования, СС использовался для внутреннего речного транспорта, а также

были созданы платформы на воздушной подушке для разведки нефти. В конце 70-х годов были созданы военные очень крупные скоростные десантные суда.

Очевидно, что подобные технологии развивались параллельно и в других странах, помимо упомянутых выше основных центров скоростного судостроения. Так, в Норвегии построено большое количество СС, используемых в качестве прибрежных скоростных судов береговой охраны и противопожарных судов для борьбы с возгораниями на судах, в портах, и береговых сооружениях. В Южной Корее было создано большое количество СС и СВП коммерческого использования, в Японии была принята в течение 1990-х годов крупномасштабная программа строительства небольших СС для грузовых перевозок.

#### **Библиографический список**

1. **Hayward, L.** The History of Air Cushion Vehicles. /L. Hayward. Kalerghi-McLeavy Publications, 1963.
2. **Mantle, P.J.** A Technical Summary of Air Cushion Craft Development / P.J. Mantle // David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Report 80/012, January 1980.
3. **Yun, L.** Theory and Design of Air Cushion Craft / L. Yun, Alan Bliault.
4. **Yun, L.** The Technical Evaluation of a 65 tonne Amphibious Hovercraft / L. Yun, X. Gu, J.Z. Zhu.
5. **Черников, И.** Туполевские торпедные // Катера и яхты. 1991. № 5.

*Дата поступления  
в редакцию 03.02.2012*

**Pham Phu Thanh, Pham Van Anh**

#### **HIGH-SPEED SHIP BUILDING. RETROSPECTIVE**

Vietnam Naval Technical Institute

High-speed river and sea vessels with dynamic support today is an investigate area of apparatus. Many countries produce a lot of samples for commercial, military or other services. But some countries only beginning steps into the speed vessels market, attempt exploitation or start production programs, based on rivers or coastal areas particular qualities.

The present article is analyses a hovercraft initial experience of leading countries for the subsequent adaptation of the given ideas in the country of the author of article.

*Key words:* high-speed ships, shipbuilding history.

УДК 621.4-2

В.Л. Химич<sup>1</sup>, Н.А. Хрипач<sup>2</sup>, Л.Ю. Лежнев<sup>2</sup>, Б.А. Папкин<sup>2</sup>,  
Ф.А. Шустров<sup>2</sup>, Д.А. Иванов<sup>2</sup>, В.И. Сонкин<sup>2</sup>, И.А. Папкин<sup>2</sup>

## НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДО УРОВНЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Московский государственный технический университет «МАМИ»<sup>2</sup>

Рассмотрена концепция перспективной системы нейтрализации токсичных компонентов отработавших газов, обеспечивающей выполнение требований экологических стандартов Евро-5 и Евро-6 при эксплуатации отечественных автомобилей и другой техники, оснащенных двигателями внутреннего сгорания.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, дизель, селективно-восстановительный каталитический нейтрализатор, фильтр дисперсных частиц, регенерация фильтра частиц.

В последние годы серьезную озабоченность во всем мире вызывает высокий уровень техногенного воздействия на окружающую среду, создающего ряд глобальных, региональных и локальных экологических проблем – изменение климата планеты, загрязнения воздушного бассейна крупных городов, рост дефицита нефтяных ресурсов.

Основным техногенным источником выделения вредных веществ в атмосферу являются процессы сгорания различных видов топлива, которые ответственны за выбросы следующих вредных веществ: оксид углерода, диоксид углерода, несгоревшие углеводороды, в том числе канцерогенные, оксиды азота, диоксид серы, дисперсные частицы.

Важную роль в загрязнении атмосферы вредными веществами играют транспортные средства, в том числе с дизельными двигателями. Токсическое воздействие отработавших газов этих двигателей на здоровье людей и окружающую среду определяется в основном содержанием оксидов азота и дисперсных частиц.

### Экологическое совершенствование двигателей

Экологические стандарты, рынок и необходимость экономии топлива предъявляют огромные требования к автомобильному двигателю. Выполнение перспективных экологических стандартов требует разработки и внедрения двигателя, обеспечивающего очень низкие вредные выбросы CO<sub>2</sub> и почти нулевые выбросы NO<sub>x</sub> и дисперсных частиц при сохранении или улучшении других эксплуатационных показателей. Прогресс в отношении обеспечения перспективных экологических стандартов, в том числе Евро-5 и Евро-6, требует разработки:

- эффективных экологически совершенных двигателей, использующих новые технологии;
- эффективных систем нейтрализации отработавших газов;
- наличия топлив с ультранизким содержанием серы.

### Перспективные технологии дизельных двигателей

Топливная экономичность современного дизельного двигателя с непосредственным впрыском, по меньшей мере, на 30% выше, чем у автомобильного бензинового двигателя с искровым зажиганием. Поэтому дизель с непосредственным впрыском, особенно в Европе, рассматривают как наилучшее решение для уменьшения расхода топлива и вследствие этого для снижения выбросов CO<sub>2</sub>. Основной проблемой перспективного дизеля является, однако,

достижение экстремально низких выбросов  $\text{NO}_x$  и дисперсных частиц без потери отличной топливной экономичности.

Решение этой проблемы требует от разработчиков дизельных двигателей использования опережающих технологий впрыска топлива, рециркуляции отработавших газов, высокоэффективных систем наддува и антидетонационных систем.

### Нейтрализация отработавших газов дизелей

Дизельные двигатели работают с существенно более высокими коэффициентами избытка воздуха, чем бензиновые. Так как нагрузка контролируется коэффициентом избытка воздуха, этот параметр не может быть использован для воздействия на композицию ОГ. Такое воздействие возможно только на полном дросселе. Оно позволяет ограничить дымность и выбросы дисперсных частиц. В прошлом это использовали как единственный параметр, который применяли для контроля вредных выбросов дизеля. Жесткие экологические стандарты Евро-5 требуют применения новых средств.

#### 1. Каталитические реакторы восстановления $\text{NO}_x$ .

Каталитические нейтрализаторы трехкомпонентного типа, используемые для двигателей с искровым зажиганием не пригодны для дизельных двигателей, поскольку дизели не могут работать с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1$ . Из-за большого избытка кислорода в широком диапазоне рабочих режимов практически отсутствует каталитическое восстановление  $\text{NO}_x$ . Это связано с тем, что основной восстановительный потенциал  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  и  $\text{H}_2$  используется в процессах окисления. Кроме того, в ОГ много дисперсных частиц, на которых сорбированы углеводороды, сульфаты, пары воды и оксиды некоторых металлов. Другим недостатком является то, что на некоторых режимах температура ОГ не всегда достаточна для обеспечения надежного включения каталитического нейтрализатора.

Следует отметить, что выполнение перспективных экологических требований в отношении  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  не является проблематичным, так как концентрация этих компонентов уже на выходе из двигателя очень низкая. Значительно труднее выполнить экологические стандарты Евро-4 и Евро-5 в отношении выбросов  $\text{NO}_x$  и дисперсных частиц [1, 2].

#### 2. SCR-процесс с $\text{NH}_3$ в качестве восстановителя.

Это процесс нейтрализации ОГ, в котором для снижения  $\text{NO}_x$  в катализаторе используется восстановитель [3–5].

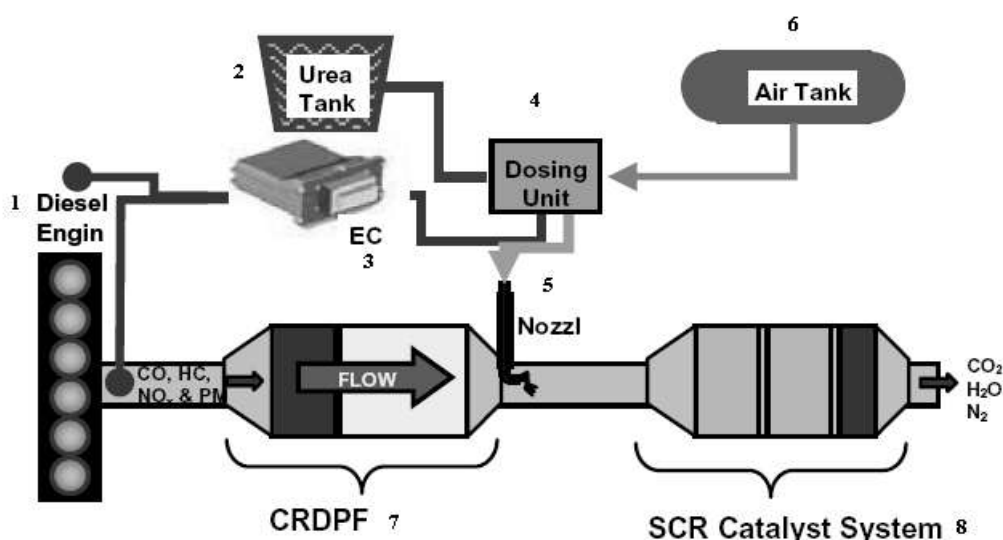


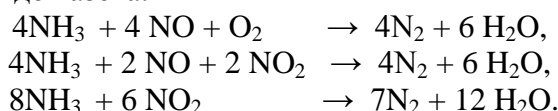
Рис. 1. Схема системы нейтрализации компании Jonson Matthey [1]:

- 1 – дизель; 2 – блок управления; 3 – резервуар с мочевиной; 4 – дозатор; 5 – форсунка;  
6 – баллон со сжатым воздухом; 7 – фильтр с непрерывной регенерацией дисперсных частиц;  
8 – каталитическая система SCR

На рис. 1 показана схема системы нейтрализации, в которой в качестве восстановителя используется мочевина. Система состоит из следующих основных компонентов: окислительного нейтрализатора с фильтром непрерывной регенерации дисперсных частиц (CRDPF), каталитической системы SCR и системы дозирования и впрыска мочевины.

Отработавшие газы из двигателя проходят сначала через систему CRDPF, а затем через систему SCR. В системе CRDPF удаляются CO, CH и PM. Мочевина впрыскивается в поток ОГ на выходе из CRDPF. Распыленная мочевина формирует  $\text{NH}_3$  в результате гидролиза и восстанавливает  $\text{NO}_x$  в ванадиевом SCR катализаторе на керамическом носителе. Аммиак, не использованный в SCR, окисляется в катализаторе, контролирующем его пропуск через SCR. По данным [1], ванадий имеет очень высокую селективность к азоту и широкое температурное «окно».

Ниже приведены три основные реакции между компонентами  $\text{NO}_x$  и аммиаком, обеспечивающие конверсию оксидов азота:



Анализ приведенных реакций показывает, что эффективность конверсии  $\text{NO}_x$  существенно зависит от отношения  $\text{NO}_2/\text{NO}$  и достигает максимума при температуре  $\sim 250^\circ\text{C}$ , когда это отношение равняется 1.

Испытания двигателей Volvo и Caterpillar подтвердили высокую эффективность процесса SCR, обеспечивающего снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на 76-88% по циклам FTP и ETC.

В SCR катализаторе в качестве восстановителя может использоваться не только жидкая мочевина, но и твердый восстановитель, а также газообразный ( $\text{H}_2$ ). На рис. 2 показана схема системы SCR с твердым восстановителем.

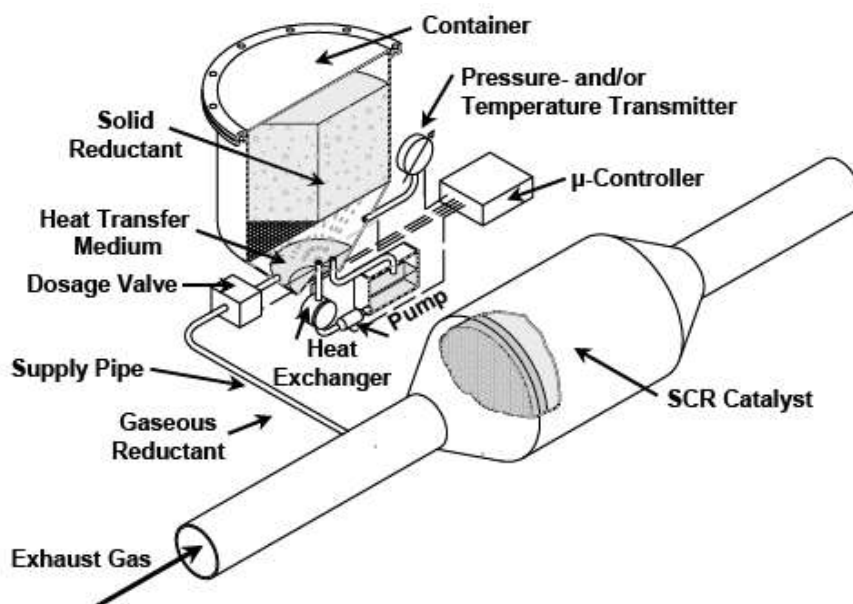


Рис. 2. Схема системы SCR с твердым восстановителем [6]

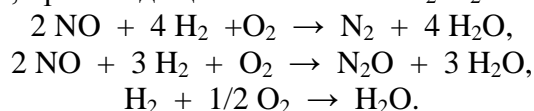
Система обеспечивает более быстрое включение катализатора при холодном пуске и требует для хранения восстановителя только треть объема, который занимает водный раствор мочевины.

### 3. SCR-процесс с $\text{H}_2$ в качестве восстановителя.

Водород является отличным восстановителем и высокоэффективен при введении в различные катализаторы, такие как трехкомпонентный катализатор,  $\text{NO}_x$  адсорбирующий катализатор и в селективно восстановительный катализатор, в том числе SCR [7]. Исследо-

вания показывают также, что водород значительно улучшает конверсию NO на Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> катализаторе в широком диапазоне температур [8]. Кроме того, водород уменьшает потери эффективности SCR катализатора, связанные с повышенной объемной скоростью и присутствием серы. Наконец, присутствие водорода в продуктах бедного сгорания позволяет ускорить процесс включения холодного катализатора [9, 10].

Известно несколько работ по восстановлению NO с использованием H<sub>2</sub> в условиях избытка кислорода [11–13]. Сильной стороной этого восстановителя является то, что реакция начинается при низкой температуре ≈100°C, что очень важно при холодном пуске двигателя. Ниже перечислены реакции, происходящие в смеси NO-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>:



Нанесенные платиновые катализаторы оказались самыми активными в реакции NO-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, в особенности катализаторы, нанесенные на различные оксиды, такие как ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub> и их смеси. Многие из них имеют большую площадь поверхности (около 200 м<sup>2</sup>/г). Некоторые из носителей были модифицированы молибденом, кобальтом или щелочными катионами. Как правило, концентрация платины равнялась 1 вес.% в этой системе. Для систем с относительно подвижным кислородом в решетке, таких как CeO<sub>2</sub> или смешанные оксиды на основе перовскитов (La-Ce-Mn-O или La-Sr-Ce-Fe-O) с небольшой площадью поверхности, содержание платины было 0,1 вес.%. Главное преимущество последних – относительно низкая селективность по N<sub>2</sub>O и более широкий температурный интервал работы катализатора (около 200°C).

Несмотря на многообещающие результаты, полученные в реакции селективного восстановления водородсодержащими смесями, необходима дополнительная работа по исследованию других химических композиций смешанных систем, нанесенных на перовскиты или флюориты, которые будут хорошо работать в широком диапазоне температур с меньшей активностью в реакции окисления водорода.

#### 4. Дизельный окислительный каталитический нейтрализатор.

Конструкция дизельного окислительного нейтрализатора существенно отличается от своих аналогов для бензиновых двигателей. Это связано:

- с наличием в ОГ дизелей дисперсных частиц и соединений серы (преимущественно SO<sub>2</sub>);
- относительно низкой температурой ОГ;
- определенными отличиями в составе катализатора (он обладает высокой активностью в реакциях окисления CO и CH и минимально окисляет SO<sub>2</sub>).

Кроме того, дизельный окислительный нейтрализатор является частью системы селективного восстановления оксидов азота, в комбинации с которым удаляет избыточный аммиак на выходе в соответствии с формулой NH<sub>3</sub> + O<sub>2</sub> = N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O.

Необходимо отметить следующие проблемы, связанные с использованием окислительных каталитических нейтрализаторов в дизельных двигателях:

- загрязнение каталитически активной поверхности сажей и остатками золы. Эту проблему можно решить соответствующим выбором размеров каталитического нейтрализатора;
- риск загрязнения серой может быть исключен выбором подходящего материала подложки и катализатора;
- формирование сульфата (SO<sub>3</sub>) ограничивается использованием платина-родий или палладий. Родий и палладий подавляют преобразование SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub>;
- если используется окислительный катализатор, то содержащаяся на частичных нагрузках в выбросах частиц растворенная органика уменьшается путем последующего сгорания. Однако наличие серы в дизельном топливе ведет к увеличению выбросов частиц из-за формирования сульфатов при повышенных температурах ОГ (350–400°C). Эта проблема решается использованием топлив с низким содержанием серы.

Экологические испытания показывают, что окислительный катализатор обеспечивает существенное снижение выбросов CO, CH и вредных частиц. Однако уменьшение выбросов частиц в основном зависит от выбранного испытательного цикла и содержания серы в топливе. Испытательный цикл определяет уровень формирования частиц (формирования сульфата) в зависимости от доли времени с высокими температурами ОГ.

### Дизельные фильтры дисперсных частиц

Снижение автомобилем выброса дисперсных частиц является проблемой с нарастающей значимостью, особенно для дизельных двигателей. С одной стороны, стандарты выброса частиц становятся все более жесткими, с другой – современные фильтры частиц, подходящие для массового использования в двигателях легковых и грузовых автомобилей, еще не полностью соответствуют перспективным требованиям.

При создании фильтров должны быть решены две задачи [2]:

- обеспечена эффективная фильтрация потока ОГ с частицами размером от 200 нм до 10 мкм;
- обеспечено периодическое или непрерывное удаление аккумулялированных частиц путем их окисления (регенерация фильтра).

#### 1. Особенности конструкции.

Для решения первой задачи предлагались различные системы фильтрации из разных фильтрующих материалов: керамики, стали, металлокерамики и волокон с каталитическим или тефлоновым покрытием. Отработавшие газы проходят сквозь плотно сплетенную ткань фильтра или пористую среду (пористые стенки) с небольшим проходным сечением и большой поверхностью. Более крупные частицы удерживаются непосредственно фильтром, более мелкие – откладываются на стенках фильтра в процессе абсорбции. По мере работы фильтр все больше забивается частицами, его эффективность уменьшается. Это ведет к увеличению сопротивления и соответственно к росту противодавления на выпуске. Поэтому фильтр должен иметь большую поверхность. При достижении критического сопротивления (обычно 700–1200 мм вод. столба) фильтр необходимо регенерировать. Продолжительность работы фильтра до регенерации зависит от концентрации дисперсных частиц в ОГ, размеров и характеристик фильтра, содержания серы в топливе и других факторов и обычно не превышает нескольких часов.

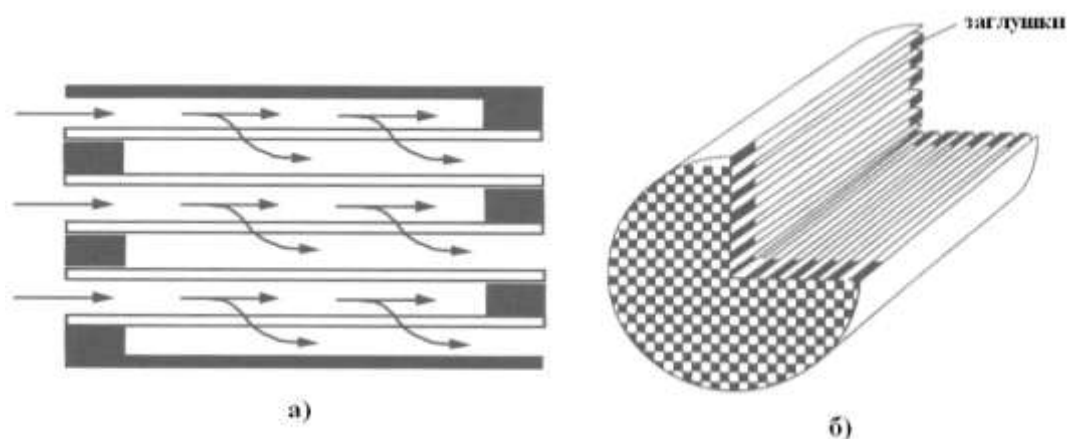
Циклонные и диффузорные уловители, активированный уголь и мокрые золоуловители, дожигание в потоке ОГ с помощью высокочастотного нагрева, использование плазмы и др. – все это оказалось непригодным для широкого использования на автомобилях. Проблемами таких систем являются: относительно низкая эффективность фильтрации (~50%), сложность конструкции, повышенный износ, вызываемый рециркуляцией частиц.

Практическое применение в настоящее время получила полнопоточная фильтрация на керамических структурах и волоконных материалах. Имеются следующие конструктивные версии.

*Керамический фильтр.* Особенности конструкции и схему фильтрации ОГ керамическим фильтром поясняет рис. 3. Фильтр имеет множество каналов, заглушенных с одного конца. Отработавший газ из двигателя проталкивается через пористые стенки, вызывая отложение частиц на стенках. Такие фильтры обладают большой фильтрующей поверхностью в единице объема (в пределах  $1-3 \text{ м}^2/\text{дм}^3$ ), не имеют подвижных элементов, что обеспечивает его длительную работоспособность, низкую стоимость и хорошее сопротивление керамического материала высоким температурам.

Эффективность фильтра зависит от размера пор, толщины стенок и ячеек. Керамический фильтр может быть покрыт каталитически активными материалами. Влияние катализа и соответствующих экзотермических реакций обеспечивают преимущества в отношении регенерации.

Недостатком фильтра является склонность к образованию трещин из-за термических напряжений и повышенное противодавление на выпуске, которое возрастает по мере эксплуатации системы (из-за отложения не окисляющихся компонентов сажи).



**Рис. 3. Схема фильтрации ОГ (а) и особенности конструкции дизельного фильтра с шахматным расположением заглушек (б)**

*Керамический вспененный фильтр.* Свойства фильтров этого типа в основном аналогичны керамическим монолитным фильтрам. Из-за трехмерной сотовой структуры и размеров пор габаритный объем фильтра больше. С другой стороны, скорость аккумуляции частиц ниже. Вспененные фильтры изготавливают путем насыщения фильтрующего материала (кордиерита) полиуретаном.

*Волоконные фильтры* имеют волокна диаметром от 5 до 25 мкм. Они пригодны для фильтрации дизельных частиц размером от 0,1 до 1 мкм. Поскольку волокна экстремально тонкие, системы этого типа имеют ограниченный срок службы. Чем больше диаметр фильтрующих волокон, тем ниже их фильтрующая способность и больше срок службы.

*Фильтр с навивкой керамических нитей.* Этот фильтр состоит из перфорированных стальных трубок, закрытых на концах, и керамических нитей. Для фильтрации поток ОГ пропускают через слой керамических нитей. Повышенная механическая прочность является основным преимуществом этой конструкции.

## 2. Регенерация фильтра.

Отложения частиц уменьшают площадь проходного сечения фильтра и вызывают увеличение противодавления на выпуске, что приводит к ухудшению топливной экономичности дизеля. Регенерация фильтра путем выжигания отфильтрованного материала может быть выполнена при повышении температуры до точки воспламенения, при этом ОГ, содержащие кислород, будут поддерживать сгорание и уносить выделяемое тепло. Без применения катализатора дизельные частицы воспламеняются и окисляются при температуре выше 500–600°C [1,2]. Такие значения температур ОГ дизеля достигаются довольно редко.

Это означает, что фильтр должен периодически регенерироваться путем окисления углерода сажи. Для этой цели возможна термическая регенерация, регенерация с помощью присадок к топливу, снижающих температуру окисления дисперсных частиц до 300–400°C и регенерация диоксидом азота ( $\text{NO}_2$ ), получаемым каталитическим окислением  $\text{NO}$ .

## Выводы

1. Выполнение перспективных экологических стандартов Евро-5 и Евро-6 требует реализации комплекса мер, в том числе разработки:

- мероприятий по конструкции и рабочему процессу дизеля, обеспечивающих дальнейшее снижение вредных выбросов;
- перспективной системы каталитической нейтрализации (ПЧН) токсичных компонентов отработавших газов, в первую очередь  $\text{NO}_x$ , дисперсных частиц, а также углеводородов;
- наличие дизельного топлива с очень низким содержанием серы.



2. Наиболее проблемными задачами обеспечения выполнения перспективных экологических стандартов Евро-5 и Евро-6 являются:

- выполнение перспективных экологических норм на выбросы оксидов азота при минимальной потере топливной экономичности и соответственно минимальном увеличении выбросов парникового газа CO<sub>2</sub>;
- выполнение перспективных экологических норм на выбросы дисперсных частиц при минимальном влиянии на топливную экономичность и выбросы CO<sub>2</sub>, связанные с процессом регенерации фильтра.

3. Применительно к автомобилям полной массой более 3,5 т целесообразно использовать более надежные системы нейтрализации, базирующиеся на селективно-каталитическом восстановлении (SCR) с использованием в качестве восстановителя водного раствора карбамида или газообразного водорода.

4. Перспективной концепцией контроля дисперсных частиц является полнопоточная фильтрация на керамических структурах или волоконных материалах. Регенерация таких фильтров путем непрерывного низкотемпературного окисления накопленных частиц диоксидами азота обеспечивает минимальные потери топливной экономичности и представляется наиболее целесообразной.

Настоящая работа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### Библиографический список

1. **Conway, R.** NO<sub>x</sub> and PM Reduction Using Combined SCR and DPF Technology in Heavy Duty Diesel Applications / R. Conway [et al.] // SAE Paper. 2005. № 2005-01-3548.
2. **Панчишный, В.И.** Дизельные фильтры и фильтры-нейтрализаторы отработавших газов дизелей // Автомобильная промышленность. 2008. № 12.
3. **Hirata, K.** Development of Urea-SCR System for a Heavy-Duty Commercial Vehicles / K. Hirata, [et al.] // SAE Paper. 2005. № 2005-01-1860.
4. **Walker, A.P.** The Development and In-Field Demonstration of Highly Durable SCR Catalyst Systems / A.P. Walker [et al.] // SAE. 2004. № 2004-01-1289.
5. **Havenith, C.** Transient Performance of a Urea DeNO<sub>x</sub> Catalyst for Low Emissions Heavy-Duty Diesel Engines / C. Havenith, R.P. Verbeek // SAE Paper. 1997. № 970185.
6. **Pfeifer, A.** U.S. 2007 - Which Way to Go? Possible Technical Solutions / A. Pfeifer, M. Krueger, D. Tomazic // SAE Paper. 2003. № 2003-01-0770.
7. **West, B.** In-Cylinder Production of Hydrogen During Net-Lean Diesel Operation / B. West [et al.] // SAE Paper. 2006. № 2006-01-0212.
8. **Satokawa, S.** Promotion Effect of H<sub>2</sub> on the Low Temperature Activity of the Selective Reduction of NO by Light Hydrocarbons over Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / S. Satokawa [et al.] // Applied Catalysis B: Environmental. 2003. 42. P. 179–186.
9. **Kirwan, J. E.** Advanced Engine Management Using On-Board Gasoline Partial Oxidation Reforming for Meeting Super-ULEV (SULEV) Emissions Standards / J. E. Kirwan, A. A. Quader, M. Grieve // SAE Paper. 1999. № 1999-01-2927.
10. **Kirwan, J. E.** Fast Start-Up On-Board Gasoline Reformer for Near Zero Emissions in Spark-Ignition Engines / J. E. Kirwan, A. A. Quader, M. Grieve // SAE Paper. 2002. № 2002-01-1011.
11. Frank B., Emig G., Renken A. Appl. Catal. B. 19, 45, 1998.
12. Burch R., Coliman M.D.. Appl. Catal. B. 23, 115, 1999.
13. Ueda, T. Nakao, M. Azuma, T. Kobayashi. Catal. Today. 45, 135, 1998.
14. **Каменев, В.Ф.** Конструктивное исполнение нейтрализатора отработавших газов и экологические показатели автомобиля / В.Ф. Каменев [и др.] // Автомобильная промышленность. 2007. № 1.
15. **Ипатов, А.А.** Автономные системы выработки тепловой и электрической энергии на биотопливе / А.А. Ипатов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 3. С. 6–12.
16. **Ипатов А.А.** Разработка технологической схемы автономной системы с комбинированным тепло- и электроснабжением отдельно стоящих объектов с возможностью использования в качестве топлива продуктов переработки биомассы / А.А. Ипатов [и др.] // Труды НАМИ /

ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств. – М., 2009. С. 85–95.

17. **Ипатов А.А.** Разработка элементов автономной когенерационной установки, работающей на биотопливе / А.А. Ипатов [и др.] // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств. – М., 2009. С. 96–104.

*Дата поступления  
в редакцию 20.02.2012*

**V.L. Khimich<sup>1</sup>, N.A. Khripach<sup>2</sup>, L.Yu. Lezhnev<sup>2</sup>, B.A. Papkin<sup>2</sup>,  
F.A. Shustrov<sup>2</sup>, D.A. Ivanov<sup>2</sup>, V.I. Sonkin<sup>2</sup>, I.A. Papkin<sup>2</sup>**

## **REDUCTION EXHAUST GASES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY NEUTRALIZATION UNTIL PROMISING EMISSION STANDARDS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev<sup>1</sup>,  
Moscow State Technical University «MAMI»<sup>2</sup>

In this work we consider the concept of promising system neutralization exhaust gases, which provide fulfillment of the requirements of emission standards Euro-5 and Euro-6 during operation of Russian cars and other vehicles equipped with internal combustion engines.

*Key words:* internal combustion engine, diesel engine, selective catalytic reduction neutralizer, dispersed particulate filter, particulate filter regeneration.

УДК 539.43

А.А. Миронов

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ ШВОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведено развитие теории критического расстояния для учета градиента напряжений в области объемных дефектов сварных швов при оценке усталостной прочности конструкций. Введен параметр материала  $d$ , определяющий протяженность минимального объема материала, в котором возможно развитие процесса усталости. Значение параметра  $d$  определяется из испытаний на циклическую трещиностойкость как расстояние от вершины трещины, на котором амплитуда напряжений принимает значение предела усталости при размахе коэффициента интенсивности напряжений, равном пороговому. Особенностью работы является использование распределения напряжений в вершине трещины с учетом поправки Дж. Р. Ирвина на пластичность. Значение эффективного коэффициента концентрации напряжений определяется отношением напряжений на расстоянии  $d$  от вершины концентратора к номинальному его значению. Приведено сравнение результатов расчетов с данными экспериментов для образцов с вырезами. Сделан вывод о необходимости учета влияния градиента напряжений в расчетах усталости сварных швов с объемными дефектами.

*Ключевые слова:* усталость, градиент напряжений, эффективный коэффициент концентрации напряжений.

**Введение**

Проблема усталости конструкций, несмотря на большой объем выполненных в этом направлении работ, остается актуальной до настоящего времени. Одной из центральных задач данной проблемы является задача определения продолжительности периода зарождения усталостной трещины в концентраторах напряжений. Образование усталостной трещины не ограничивает ресурс работы конструкции. Для конструкций с концентраторами напряжений существенной является и вторая стадия усталостного разрушения – стадия роста трещины. Определение продолжительности второй стадии усталостного разрушения требует определения начального размера образующейся в концентраторе макротрещины. Одним из распространенных концентраторов напряжений в конструкциях являются дефекты сварных швов. Экспериментальные исследования [1] показывают, что стадия зарождения трещины является существенной для объемных дефектов в виде пор и включений и может не учитываться для плоскостных дефектов.

Результаты многочисленных исследований, обзор которых приведен в работах [2-4], показывают, что для концентраторов с малым радиусом кривизны в вершине амплитудные значения максимальных деформаций и напряжений в концентраторе не могут быть использованы для оценки ресурса конструкции по кривым усталости гладких образцов. В этом проявляется эффект влияния градиента напряжений и деформаций. Для учета данного эффекта в расчетной практике используется эффективный коэффициент концентрации напряжений  $k_{\sigma}$ , определяемый как отношение напряжений в гладком и образце с концентратором при одинаковом числе циклов нагружения до образования макротрещины.

Основополагающими работами по учету влияния неоднородного напряженного состояния в концентраторах на предел усталости являются работы Нейбера [5], предложившего рассматривать осредненные напряжения в области концентратора, и Петерсона [6], выдвинувшего положение, что усталостное разрушение контролируется напряжением на некотором расстоянии от вершины концентратора. На основе выдвинутых гипотез авторами получены соответственно следующие выражения для эффективного коэффициента концентрации напряжений на пределе усталости:

$$k_{\sigma} = 1 + (\alpha_{\sigma} - 1) / [1 + \pi(g_2/\rho)^{1/2} / (\pi - \omega)];$$

$$k_{\sigma} = 1 + (\alpha_{\sigma} - 1) / (1 + g_1/\rho),$$

где  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;  $\rho$  – радиус кривизны в вершине концентратора;  $\omega$  – угол раствора надреза;  $g_i$  – параметр материала.

В работе [7] получено выражение в виде  $k_{\sigma} = \alpha_{\sigma} - (\alpha_{\sigma} - 1)\exp(-\rho/g_3)$ . Общим для рассмотренных формул является введение параметра материала  $g_i$ , подлежащего экспериментальному определению.

Дальнейшим развитием проблемы определения предела усталости деталей с концентраторами напряжений является разработка концепции критического расстояния [8]. В рамках данной концепции расстояние  $d$  от вершины концентратора, на котором напряжения контролируют процесс усталости, связывается с длиной трещины  $l$ , соответствующей пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при напряжениях, равных пределу усталости  $\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{-1}\sqrt{\pi l}$ . Критическое расстояние принимается равным  $d = 0,5l$ , что приводит к следующей зависимости для его определения:

$$d = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_{-1}} \right)^2. \quad (1)$$

Из большого числа работ, связанных с экспериментальным исследованием рассматриваемой проблемы, выделим [9, 10], посвященные исследованию закономерностей зарождения усталостных трещин в концентраторах напряжений для сплавов Д16Т, Д16чТ1 и стали 08кп в широком диапазоне изменения числа циклов до образования макротрещины, радиуса надреза  $\rho$ , толщины образцов  $s$ . Основной объем результатов соответствует области многоциклового усталости, характеризующейся размахом напряжений в концентраторе, не превышающем двух пределов текучести материала. Показано, что все многообразие кривых усталости материала сводится к единой кривой, если в качестве определяющего параметра использовать размах напряжения  $\Delta\sigma_d$  на характерном расстоянии  $d$  от вершины концентратора. В этом случае зависимость для  $k_{\sigma}$  принимает вид

$$k_{\sigma} = \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_n, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_n$  – размах номинальных напряжений.

Анализ результатов данных работ показывает, что параметр  $d$  не определяется размером зерна и принимает постоянное значение при числе циклов до образования макротрещины  $N_f < 10^5$ , а для образцов малой толщины во всем исследуемом диапазоне  $N_f$  до  $10^7$  циклов. Наблюдается увеличение параметра  $d$  при  $N_f > 10^5$  циклов с ростом толщины образца, что соответствует снижению значения  $k_{\sigma}$ .

Результаты наблюдения за процессом развития усталостного повреждения и образования макротрещины в концентраторе показывают, что начальный размер образующейся макротрещины согласуется со значением параметра  $d$ .

Описанные закономерности послужили основой для предлагаемой модели расчета  $k_{\sigma}$ .

### Расчетная модель

Процесс усталостного разрушения является результатом развития дислокационной структуры и связан с циклическими необратимыми деформациями [11–13]. В работе [14] в рамках теории накопления повреждений предложен подход к описанию процесса образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений на основе использования критерия локального разрушения материала:

$$\Theta(x_*, n) = \Theta_*,$$

где  $\Theta(x_*, n)$  - относительное остаточное увеличение объема (разрыхление) в точке с координатой  $x_*$  перед вершиной концентратора, накопленное за  $n$  циклов нагружения;  $\Theta_*$  - критическая величина разрыхления (является характеристикой материала).

Для концентраторов с малым радиусом кривизны в вершине следует учитывать, что развитие дислокационной структуры является коллективным процессом, реализуемым в конечном объеме материала. Влияние неоднородности напряженно деформированного состояния на процесс накопления усталостных повреждений в локальном объеме материала может быть описано при использовании интегральной формулировки критерия разрушения:

$$\frac{1}{V_0} \int_{V_0} \Theta(x, n) dV = \Theta_*,$$

где  $V_0$  - минимальный объем материала, в котором возможно развитие процесса накопления усталостных повреждений (является параметром материала).

Введем в рассмотрение структурно зависимый параметр материала  $d$ , характеризующий протяженность локального объема  $V_0$  вдоль оси концентратора. Его значение может быть определено из испытаний на циклическую трещиностойкость. Из условия нераспространения трещины при размахе КИН, не превышающем пороговое значения  $\Delta K_{th}$ , следует, что не во всей области на расстоянии  $d$  от вершины трещины амплитуды напряжений и деформаций достигают значений на пределе усталости материала  $\sigma_r$ , где  $r$  - коэффициент асимметрии цикла нагружения. С учетом поправки Дж. Р. Ирвина на перераспределение напряжений в вершине трещины в результате пластического деформирования (рис. 1) выражение для параметра  $d$ , определяемого как расстояние, на котором амплитуда напряжения достигает значения предела усталости при размахе КИН, равно  $\Delta K_{th}$ , запишется в виде

$$d = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{(1-r)\sigma_{0,2}} \right)^2 + \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{2\sigma_r} \right)^2. \quad (3)$$

Определение параметра  $d$  по выражению (3) предполагает использование результатов испытаний на циклическую трещиностойкость при  $r \geq 0$ , что позволяет исключить влияние эффекта закрытия трещины при отрицательных значениях  $r$ . Для материалов с  $2\sigma_r > \sigma_{0,2}$  выражение (3) следует рассматривать как условие достижения на расстоянии  $d$  эквивалентной величиной деформации значения на пределе усталости.

Развитие процесса накопления усталостных повреждений, мерой которых является разрыхление материала, зависит от граничных условий на поверхности локального объема  $V_0$  и, следовательно, в определенной мере будет контролироваться напряжениями и деформациями на расстоянии  $d$  от вершины концентратора.

Таким образом, для области многоциклового усталости расчетная модель для  $k_\sigma$  сводится к выражению (2) и включает в себя определение параметра  $d$  по зависимости (3) и расчет напряжений в

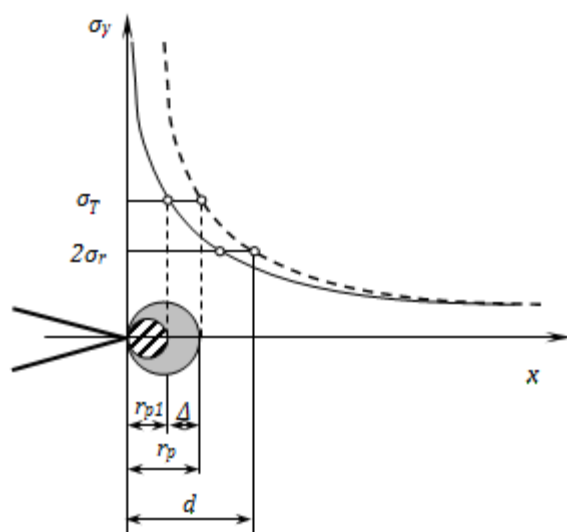


Рис. 1. Перераспределение напряжений в вершине трещины

области концентратора напряжений в упругой постановке.

### Описание экспериментальных данных

В табл. 1 приведены значения параметра  $d$ , полученные экспериментально в работах [9, 10], и его расчетные значения по зависимости (3) при  $r=0$ . В расчетах приняты значения  $\sigma_{02}$  по данным работ [9, 10], значения  $\sigma_r$  и  $\Delta K_{th}$  по данным [12, 15, 16], для сплава Д16чТ1 использованы ориентировочные значения  $\sigma_r$  и  $\Delta K_{th}$ .

Таблица 1

### Сравнение экспериментальных и расчетных значений параметра $d$

Материал	$s$ (мм)	$\sigma_{02}$ (МПа)	$d$ эксперимент (мм)		$\sigma_r$ (МПа)		$\Delta K_{th}$ (МПа·м <sup>1/2</sup> )	$d$ расчет (мм)
			$N_f < 10^5$	$N_f > 10^5$	$r = -1$	$r = 0$		
Д16Т	6	340	0,13	0,22	126	110	5	0,12
	12		0,13	0,3				
	24		0,13	0,4				
Д16чТ1	1,85	400	0,18	0,18	120	105	6	0,17
08кп	3	280	0,25	0,25	147	134	7,8	0,26

Анализ представленных результатов показывает возможность оценки параметра  $d$  по зависимости (3) для диапазона  $N_f < 10^5$  циклов, а при малых толщинах образцов во всем исследованном диапазоне  $N_f$  до  $10^7$  циклов.

Вычисление параметра  $d$  по зависимости (1) не согласуется в исследуемом диапазоне  $N_f$  с экспериментальными его значениями.

Повышение значения параметра  $d$  с увеличением толщины образца и ростом  $N_f$ , что соответствует снижению нагрузки на образец, может являться результатом перехода вида напряженно-деформированного состояния в подповерхностных слоях в вершине концентратора от плоского напряженного состояния к плоской деформации. Такой переход при неизменном поле распределения напряжений приводит к снижению значения интенсивности напряжений и, как следствие к снижению переменной составляющей остаточных микродеформаций, что и проявляется как факт снижения значения  $k_\sigma$  и соответственно увеличения характерного расстояния  $d$ . Данный эффект характерен для плоских образцов с концентраторами напряжений относительно малых размеров. В качестве примера на рис. 2 для эллиптического выреза протяженностью 2 мм приведена зависимость расстояния  $x$ , на котором максимальные растягивающие напряжения принимают значения, равные приведенному напряжению  $\sigma_{\text{в0}} = \sigma_1 - \sigma_3$ , вычисленному для условий плоской деформации на расстоянии  $d$  от вершины концентратора. Кривые получены для различных значений  $\alpha_\sigma$ :  $1 - \alpha_\sigma = 3$ ;  $2 - \alpha_\sigma = 4$ ;  $3 - \alpha_\sigma = 5$ .

В работе [17] приведены результаты ряда исследований по влиянию на предел усталости вырезов различной конфигурации. Используем данные, полученные при растяжении плоских образцов с круговым вырезом, изготовленных из стали SAE 1045 steel со следующими механическими характеристиками:  $\sigma_{02} = 466$  МПа,  $\sigma_b = 745$  МПа,  $\sigma_{-1} = 303$  МПа,  $\Delta K_{th, r=0} = 6,9$  МПа·м<sup>0,5</sup>. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по модели представлено на рис. 3 в виде зависимости  $k_\sigma$  на пределе усталости от радиуса отверстия  $\rho$ . Экспериментальные значения соответствуют отношению  $k_\sigma = \sigma_r / \sigma_{r,k}$ , расчетные

получены по зависимости (2). Использованы два значения предела усталости при  $r=0$ : принятое в работе [17]  $\sigma_0=224$  МПа и вычисленное по значению  $\sigma_{-1}$  на основе известной зависимости Гербера  $\sigma_0^*=265$  МПа. На рис. 3 точки 1, 2, 4 соответствуют экспериментальным данным при  $r=0$  и  $\sigma_0$ ;  $r=-1$ ;  $r=0$  и  $\sigma_0^*$ ; точки 3, 5 – расчету при  $\sigma_0$  и  $\sigma_0^*$ .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод о возможности использования построенной модели в практических расчетах усталости конструкций.

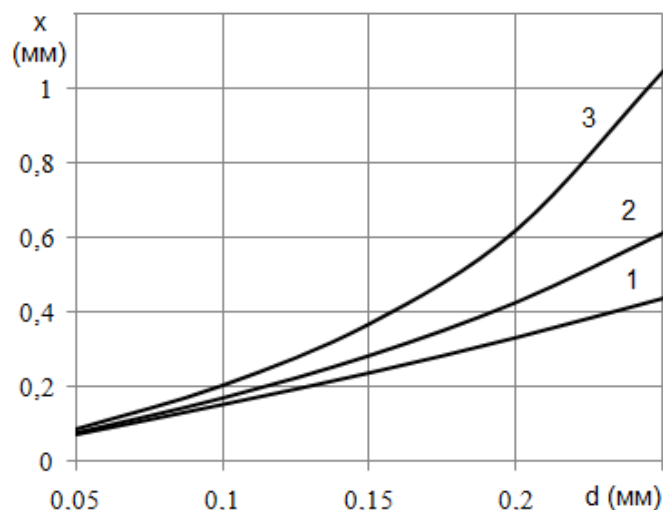


Рис. 2. Связь расстояний от вершины концентратора с одинаковым уровнем приведенных и максимальных напряжений для условий плоской деформации

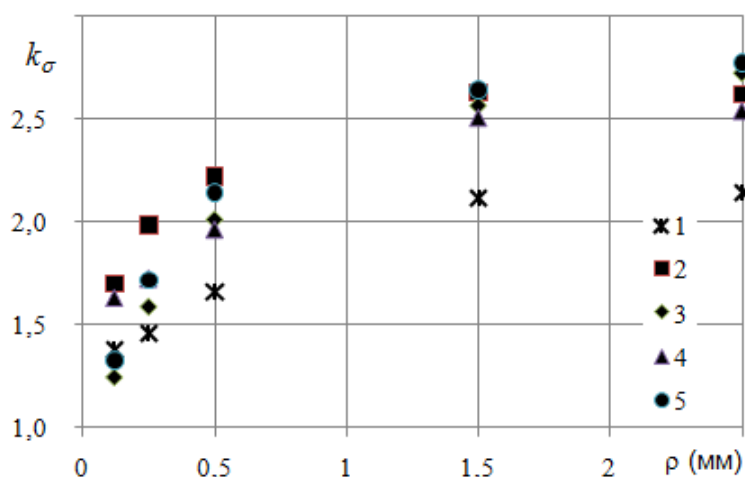


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений от радиуса кругового выреза в плоском образце

### Использование модели

Рассмотрим использование модели расчета  $k_\sigma$  для сварных швов с дефектами несплошности металла. Для оценки напряжений на малом расстоянии  $d$  от объемного концентратора примем постоянное значение относительного градиента напряжений  $\eta = (1/\sigma)d\sigma/dx = -2/\rho$ , соответствующее круговой выточке [12], что приводит к выражению:

$$\sigma_d = \sigma_{\max} \exp(-2d/\rho). \tag{4}$$

В этом случае зависимость (2) для  $k_\sigma$  примет вид

$$k_\sigma = \alpha_\sigma \exp(-2d/\rho). \tag{5}$$

Возможность использования приближенной зависимости (5) для описания усталости в концентраторах напряжений представлена на рис. 4. Точки соответствуют значениям  $k_\sigma$ , полученным по экспериментальным данным работы [18] для круглых образцов с кольцевыми выточками, выполненных из сталей 30ХН2МФА и Ст 3пс5 и имеющих теоретические значения коэффициентов концентрации напряжений, равные соответственно  $\alpha_\sigma=2,33$  и  $\alpha_\sigma=1,81$ . Сплошная и штриховая линии соответствуют расчету по зависимости (5) для следующих характеристик материалов: 30ХН2МФА -  $\sigma_{02}=1380$  МПа,  $\sigma_b=1674$  МПа,  $\sigma_{-1}=700$  МПа,  $\sigma_0^*=608$  МПа,  $\Delta K_{th,r=0}=6,0$  МПа·м<sup>0,5</sup>; Ст 3пс5 -  $\sigma_{02}=265$  МПа,  $\sigma_b=410$  МПа,  $\sigma_{-1}=200$  МПа,  $\sigma_0^*=167$  МПа,  $\Delta K_{th,r=0}=7,0$  МПа·м<sup>0,5</sup>.

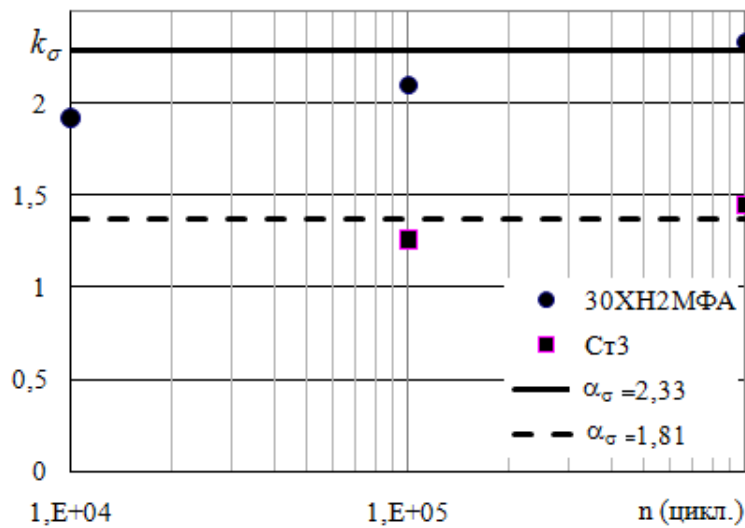
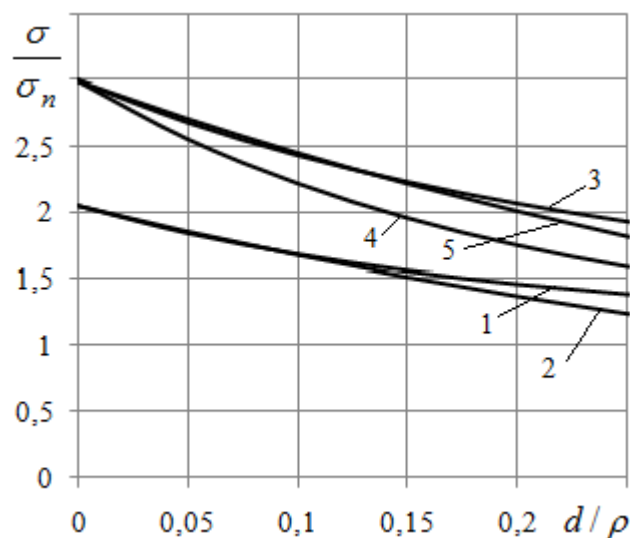


Рис. 4. Эффективный коэффициент концентрации напряжений для цилиндрических образцов с кольцевой выточкой

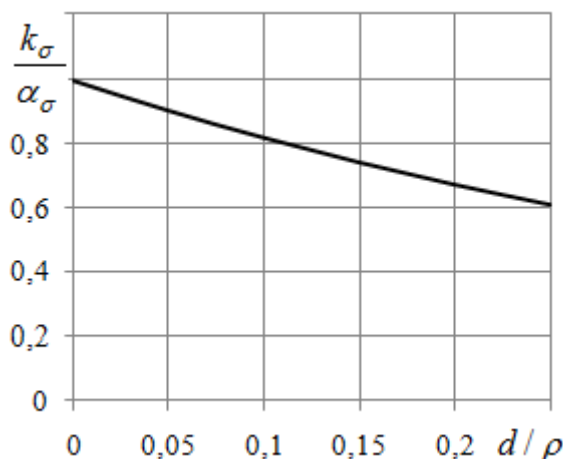




**Рис. 5. Распределение относительной величины напряжений в окрестности сферической и цилиндрической пор**

На рис. 5 представлено сравнение распределений относительных величин напряжений в окрестности сферической (кривые 1, 2) и вытянутой (кривые 3–5) пор, полученных на основе точных решений (кривые 1, 3, 4) и по приближенному выражению (4) (кривые 2, 5). Для вытянутой поры рассмотрено центральное сечение и использовано решение о растяжении пластины с круговым вырезом в условиях плоской деформации. Кривая 4 соответствует распределению приведенных напряжений  $\sigma_{np}$ . Принятый диапазон изменения отношения  $d/\rho$  соответствует порам с радиусом  $\rho > 1$  мм. При меньших размерах пор в конструкциях, как правило, выполняется условие нераспространения усталостных трещин  $\Delta K < \Delta K_{th}$ .

На рис. 6 в рамках принятого приближения для распределения напряжений (4) представлен график изменения отношения  $k_\sigma/\alpha_\sigma$  в рассматриваемом диапазоне  $d/\rho$ . Из представленных результатов следует, что в расчетах усталостной прочности сварных швов с дефектами в виде пор и включений следует учитывать эффект влияния градиента напряжений.



**Рис. 6. Изменение отношения эффективного к теоретическому значению коэффициента концентрации напряжений в зависимости от относительного размера пор**

Предложенная расчетная модель для  $k_\sigma$ , учитывающая градиент напряжений, позволяет получить его значение по стандартным механическим характеристикам материала без проведения дополнительных экспериментальных исследований. Использование структурно зависимого параметра  $d$  в качестве начального размера усталостной трещины позволяет перейти от расчета ресурса на стадии образования трещины к расчету ресурса на стадии ее развития.

#### Библиографический список

1. Куркин, С. А. Модели развития разрушения от дефектов типа несплошностей при циклическом нагружении, основанные на методах механики разрушения // Контроль. Диагностика. 1998. № 2. С. 17–20.
2. Трошенко, В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщение 1. Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования // Проблемы прочности. 2010. № 2. С. 5–24.
3. Трошенко, В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщение 2. Методы анализа результатов исследования // Проблемы прочности. 2010. № 3. С. 5–28.

4. **Трощенко, В. Т.** Усталость и неупругость металлов при неоднородном напряженном состоянии // Проблемы прочности. 2010. № 5. С. 14–30.
5. **Нейбер, Г.** Концентрация напряжений: [пер. с нем.] / Г. Нейбер; под ред. А.И. Лурье. – М.: Гостехиздат, 1947. – 204 с.
6. **Петерсон, Р.** Коэффициенты концентрации напряжений: [пер. с англ.] / Р. Петерсон. – М.: Мир, 1977. – 301 с.
7. **Кудрявцев, П. И.** Нераспространяющиеся усталостные трещины / П. И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 96 с.
8. **Taylor, D.** The Theory of Critical Distances. A New Perspective in Fracture Mechanics / D. Taylor. – Oxford: Elsevier, 2007. – 357 p.
9. **Панасюк В. В.** Зарождение усталостных трещин у концентраторов напряжений / В. В. Панасюк, О. П. Осташ, Е. М. Костык // ФХММ. 1985. №6. С. 3–10.
10. Применение  $\delta_k$ - модели для оценки периода зарождения усталостной трещины / В. В. Панасюк [и др.] // ФХММ. 1987. № 1. С. 55–61.
11. **Иванова, В. С.** Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 455 с.
12. **Трощенко, В. Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 344 с.
13. **Волков, В. М.** Разрыхление металлов и разрушение конструкций машин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. 4. Надежность и ресурс в машиностроении. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2004. С. 50–69.
14. **Волков, В. М.** Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений / В. М. Волков, А. А. Миронов // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб.– Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2005. Вып. 67. С. 20–25.
15. **Трощенко, В. Т.** Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. Ч.1 / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 347 с.
16. **Красовский, А. Я.** Хрупкость металлов при низких температурах / А. Я. Красовский. – Киев: Наукова думка, 1980. – 340 с.
17. **Castro, F. C.** On the application of multiaxial high-cycle fatigue criteria using the theory of critical distances / F. C. Castro, J. A. Araujo, N. Zouain // Engineering Fracture Mechanics. 2009. №76. P. 512–524.
18. **Дронов, В. С.** Влияние структурного состояния на кинетику локализованного усталостного разрушения конструкционных сталей: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 / В. С. Дронов. – Тула, 2008. – 46 с.

*Дата поступления  
в редакцию 03.02.2012*

**A.A. Mironov**

## **A MODEL FOR DETERMINING THE FATIGUE-STRENGTH REDUCTION FACTOR OF DEFECTS IN WELDS JOINTS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Shows the development of the theory of critical distances to account for the stress gradient in the bulk defects of welds joints in the evaluation of fatigue strength of structures. Introduced the parameter of the material  $d$  that determines the length of the minimum volume of material, in which may develop fatigue process. The value of parameter  $d$  is determined from tests on the cyclic crack growth as the distance from the crack tip, at which the amplitude of the stress takes the value of the fatigue limit at the range of stress intensity factor equal to the threshold. A feature of the work is the use of the stress distribution at the crack tip with a J.R. Irwin correction on plasticity. The value of the fatigue strength reduction factor determines as the ratio stress at a distance  $d$  from the notch root to the nominal value. Given the comparison of calculation results with experimental data for specimens with notches. Concluded the need to consider the influence of stress gradient in the calculation of fatigue of welds joints with bulk defects.

*Key words:* fatigue, stress gradient, fatigue-strength reduction factor.

УДК 629.124

В.А. Зуев, Н.М. Семенова

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЕДОКОЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ  
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ НА ТИХОЙ ВОДЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены результаты буксировочных испытаний моделей платформ на воздушной подушке на тихой воде.

*Ключевые слова:* сопротивление в чистой воде, ледокольные платформы на воздушной подушке, натурные испытания,

Ледокольные платформы на воздушной подушке (ЛПВП) принципиально отличаются от других судов на воздушной подушке (СВП) не только функциональным назначением, но и особенностями эксплуатации. Специфическими особенностями ЛПВП, в отличие от традиционных СВП, являются относительно высокие значения давления (5÷10 КПа) в воздушной подушке (ВП) и низкие эксплуатационные скорости хода (~ до 15 км/ч).

В основном эти суда несамходные. Режим движения их соответствует докритическим скоростям, при которых  $Fr_V$  не превышают 0,45. Требование к снижению мощности подъемного комплекса (при высоких значениях давления в ВП) приводит к снижению расхода воздуха и соответственно уменьшению зазора между нижней кромкой гибкого ограждения (ГО) и уровнем воды во впадине. Вследствие этого глубина погружения ГО у ЛПВП приблизительно равна глубине впадины  $h_{ВП}$ :

$$h_{ВП} = \frac{P_{П}}{\rho g}, \quad (1)$$

где  $P_{П}$  - давление в ВП;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для решения задач оптимального проектирования ЛПВП, как и любого другого судна, необходимо знать сопротивление их движению. Аналитически ее можно определить как совокупность компонентов различной природы и значимости с оговоркой метеоусловий и состояния нагрузки [1]. В общем случае, при движении СВП над водной поверхностью полную силу сопротивления на чистой воде можно разделить на следующие составляющие:

$$R = R_a + R_{имп} + R_b + R_{ост} + R_{волн}^{доп}, \quad (2)$$

где  $R_a$  – воздушное или аэродинамическое сопротивление;  $R_{имп}$  – импульсное сопротивление;  $R_b$  – волновое сопротивление;  $R_{ост}$  – остаточное сопротивление;  $R_{волн}^{доп}$  – дополнительное сопротивление на волнении.

Из-за низких эксплуатационных скоростей хода воздушным сопротивлением ЛПВП можно пренебречь; импульсное сопротивление также имеет небольшие значения, и в формуле определения сопротивления оно учтено косвенно.

Составляющая дополнительного сопротивления на волнении практически целиком определяется сопротивлением ГО, хотя, несомненно, и собственно волновое сопротивление СВП, и импульсное сопротивление будут изменяться в условиях движения СВП на волнении [1]. При отсутствии прототипа  $R_{волн}^{доп}$  можно найти через его относительное значение  $R_{волн}^{доп}/Dg$ , которое определяется по графику в зависимости от числа Фруда и отношения расчетной высоты волны к волне гибкого ограждения. Однако имеющаяся формула справедлива для чисел Фруда от 0,5, в то время как для ЛПВП характерен диапазон  $0 \leq Fr_L \leq 0,3$ .

Аналитические и экспериментальные данные по оценке сопротивления ЛПВП дают большой разброс получаемых значений, поэтому для определения сопротивления ЛПВП при низких скоростях хода и соответствующими давлениями и расходами воздуха были выполнены модельные испытания в ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева с использованием гравитационной системы буксировки моделей.

Цель эксперимента заключалась в определении сопротивления моделей ЛПВП в зависимости давления в воздушной подушке –  $P_{вп}$ , расхода воздуха –  $Q$ , соотношений размеров воздушной подушке в плане –  $L/B$ , а также влияния на сопротивление глубины воды –  $\frac{H_б}{h_{вп}}$ .

Основные размерения испытанных моделей приведены в табл. 1, а их вид в плане представлен на рис. 1.

Таблица 1

Главные размерения моделей ЛПВП

Номер модели	Длина ВП, м	Ширина ВП, м	Высота борта, м	L/B	Высота гибкого ограждения, м
1	0,83	0,71	0,10	1,14	0,060
2	0,83	0,59	0,10	1,41	0,060
3	0,59	0,83	0,10	0,71	0,060

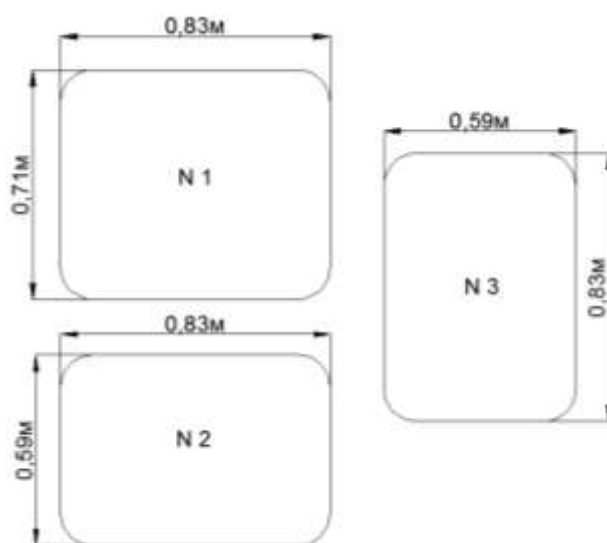


Рис. 1. Вид моделей ЛПВП в плане

Модели изготовлены из пенопласта и оргстекла, а гибкое ограждение – из ткани «болонья». ГО выполнено в виде поперечно расчлененных элементов (сегментов) открытого типа по всему периметру ВП. Схема формирования ВП – камерная с непосредственной подачей воздуха в подушку. На моделях установлен подъемный комплекс, состоящий из электродвигателя постоянного тока и вентилятора центробежного типа. Аэродинамическая схема соответствовала натурной и показана на рис. 2. Скорость движения модели определялась фоторезистором. Сигнал с фоторезистора регистрировался частотомером. В процессе испытаний варьировалось давление в ВП за счет приема твердого балласта и расход воздуха изменением частоты вращения вентилятора. Давление в ВП при проведении испытаний контролировалось по дифференциальному манометру. Необходимый расход в ВП был протарирован в зависимости от напряжения, подаваемого на клеммы электродвигателя. Методика испытаний в чистой воде не отличается от принятых в бассейнах гравитационного типа.

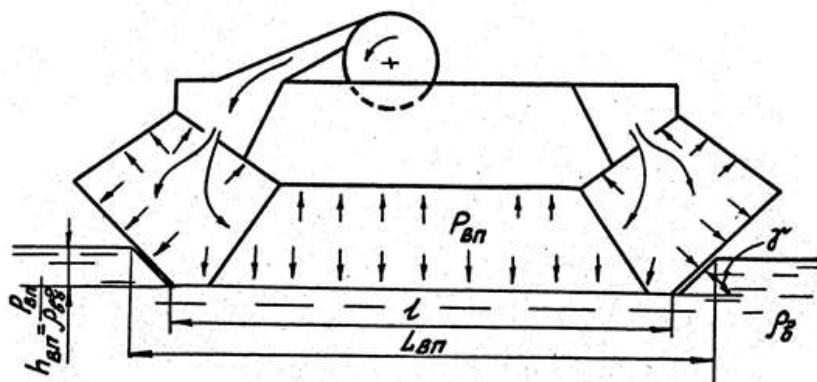


Рис. 2. Аэродинамическая схема ЛПВП

При испытаниях модели измерялось: масса модели (взвешиванием); давление в ВП (по дифференциальному манометру); расход воздуха (по калибровочной диаграмме, полученной с использованием дифференциального манометра и регулятора напряжений на приводном электродвигателе); скорость движения модели (по частотомеру); сопротивление (по весу буксировочного груза).

Для рассматриваемых случаев сопротивление ЛПВП в чистой воде можно записать в виде

$$R = f_1(m, L, B, H_б, g, \rho_в, P_{вп}, Q, v...) \quad (3)$$

Представим формулу (3) сопротивления следующим образом:

$$\frac{R}{Dg} = \prod_{i=1}^k f_i^{m_i}, \quad (4)$$

где  $f_i^{m_i}$  – безразмерные комплексы, составленные из параметров, определяющих процесс взаимодействия ЛПВП с окружающей средой. Предполагается, что  $f_i^{m_i}$  является взаимонезависимыми.

Отбирая наиболее важные, на наш взгляд, параметры, перепишем (4) следующим образом:

$$\frac{R}{Dg} = f_1(Fr_v)^{m_1} \cdot f_2\left(\frac{-}{q}\right)^{m_2} \cdot f_3\left(\frac{L}{B}\right)^{m_3} \cdot f_4\left(\frac{H_б}{h_{вп}}\right)^{m_4}, \quad (5)$$

где  $Fr_v = \frac{v}{\sqrt{g^3 D / \rho_в}}$  – значение числа Фруда по водоизмещению ( $v$  – скорость, м/с;  $D$  – мас-

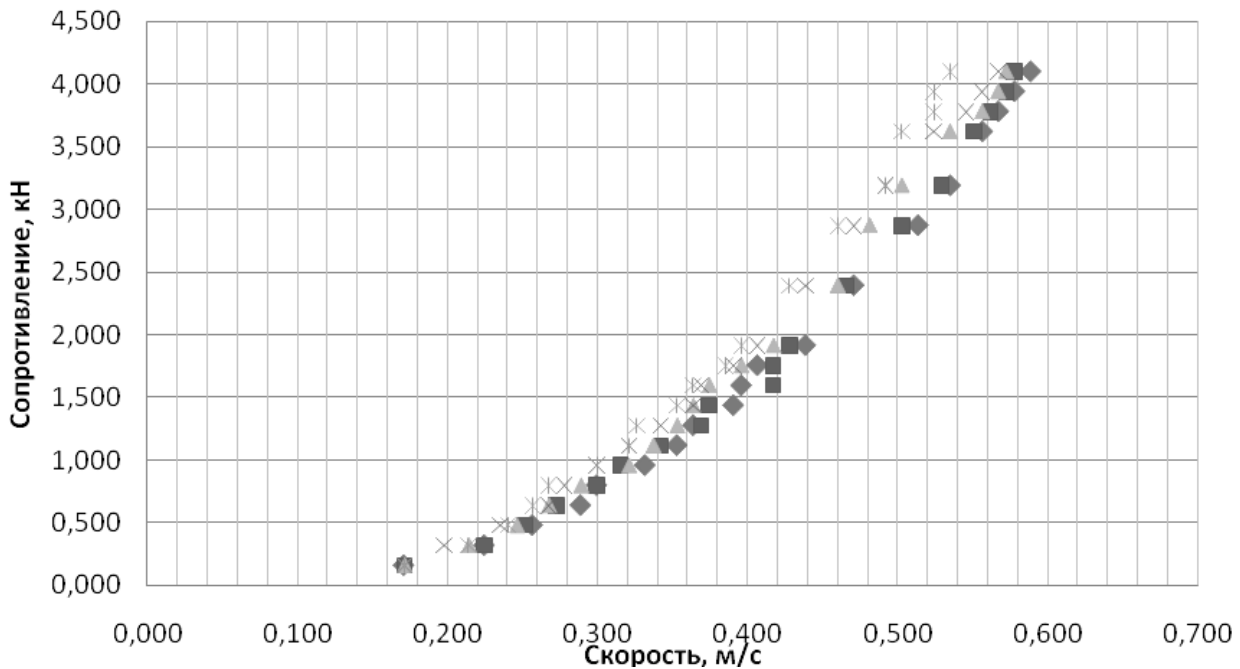
совое водоизмещение, т;  $\rho_в = 1$  – плотность воды, т/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>);

$\bar{q} = \frac{Q}{S_{вп} \sqrt{2P_{вп} / \rho_{возд}}}$  – безразмерный расход ( $Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $S_{вп}$  – площадь

воздушной подушки, м<sup>2</sup>;  $P_{вп}$  – давление в воздушной подушке, Па;  $\rho_{возд} = 0,001225$  – плотность воздуха, т/м<sup>3</sup>);  $L$  – длина воздушной подушки, м;  $B$  – ширина воздушной подушки, м;  $H_б$  – глубина бассейна, м;  $h_{вп}$  – глубина воздушной впадины, м.

При проведении экспериментов за базовую была принята модель №1 с отношением  $L/B \approx 1$ , и масса модели варьировалась от 14 до 21 кг при сохранении постоянных значений расходов. График зависимости сопротивления от скорости при различных массах представлен на рис. 3. Безразмерное сопротивление для этой модели достаточно плотно представляется в виде

$$\frac{R}{mg} = f_1(Fr_v). \quad (6)$$



**Рис. 3. График зависимости сопротивления ЛПВП от скорости хода:**

- ◆ - масса модели  $m=14,75$  кг,  $P_{ВП} = 213,5$ Па,  $Q = 0,01337$  м<sup>3</sup>/с; ■ - масса модели  $m=16,17$  кг,  $P_{ВП} = 245$ Па,  $Q = 0,01337$  м<sup>3</sup>/с; ▲ - масса модели  $m=17,58$  кг,  $P_{ВП} = 263,5$ Па,  $Q = 0,01337$  м<sup>3</sup>/с;
- × - масса модели  $m=19,11$  кг,  $P_{ВП} = 286$ Па,  $Q = 0,01337$  м<sup>3</sup>/с;
- Ж - масса модели  $m=20,52$  кг,  $P_{ВП} = 308$ Па,  $Q = 0,01337$  м<sup>3</sup>/с;

Функцию  $f_1$  представим в виде

$$f_1(Fr_V) = \alpha \cdot Fr_V^\beta. \quad (7)$$

Используя пакет программ Microsoft Office Excel, методом наименьших квадратов найдем такие коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , чтобы функция

$$\sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{эксп}} - \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{теор}} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Данное выражение примет вид

$$\left( \left( \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{эксп}} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{теор}} \cdot \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{эксп}} + \left( \left( \frac{R}{mg} \right)_i^{\text{теор}} \right)^2 \right). \quad (9)$$

Решая уравнение (8) с использованием (7), находим искомые коэффициенты  $\alpha=0,32$ ,  $\beta=2,5$ . Формула примет вид

$$\frac{R}{mg} = 0,32 Fr_V^{2,5} \quad (10)$$

со среднеквадратичным отклонением, не превышающим 10%.

Выражение (10) соответствует условиям опытов и справедливо для диапазонов

$$\begin{aligned} 0 \leq Fr_V \leq 0,40, \\ 0 \leq Fr_L \leq 0,30. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее эта же модель испытывалась с разными расходами воздуха. В работе рассматривается два диапазоне безразмерных расходов  $\bar{q} = Q / S_{ВП} \sqrt{2P_{ВП} / \rho_{возд}}$ . Первый составлял от 0,0007 до 0,0013. Как показали испытания в чистой воде, такое изменение незначительно, но

все же влияет на сопротивление. Примером тому является рис. 4, где показаны результаты испытаний модели №1.

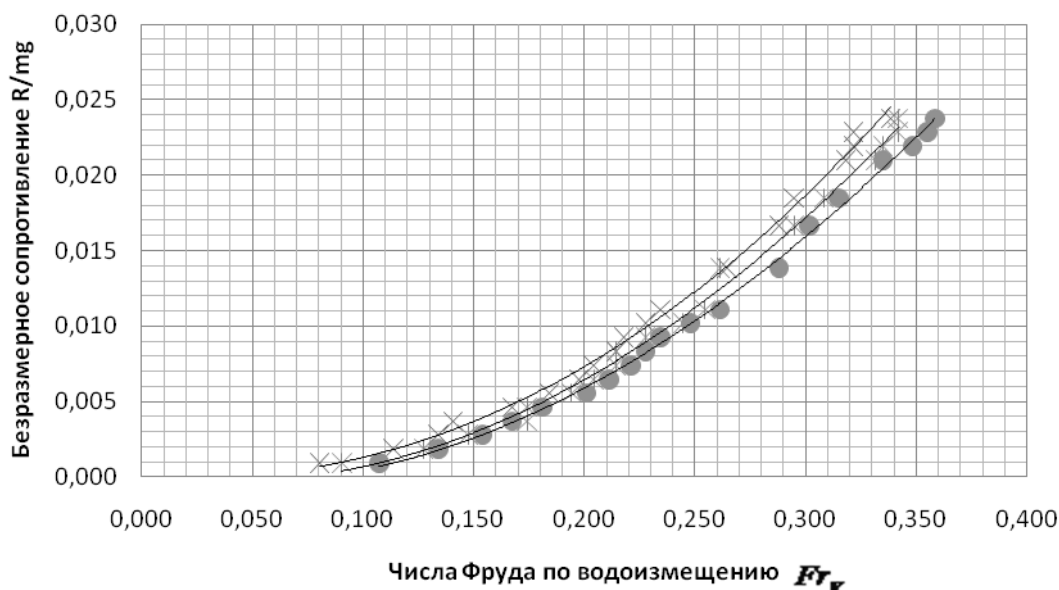


Рис. 4. Безразмерное сопротивление модели №1 при массе 17,58 кг:

× -  $Q = 0,00932 \text{ м}^3/\text{с}$ , Ж -  $Q = 0,01266 \text{ м}^3/\text{с}$ , • -  $Q = 0,01337 \text{ м}^3/\text{с}$

Для каждого значения скорости были сняты значения безразмерного сопротивления для модели с соответствующим безразмерным расходом и построен график зависимости безразмерной величины от  $\bar{q}$ , анализ которого показал, что функция  $f_2\left(\bar{q}\right)^{m_3}$  может принять степенной вид.

Воспользовавшись выражением (10), безразмерное сопротивление с учетом влияния расхода, примет вид

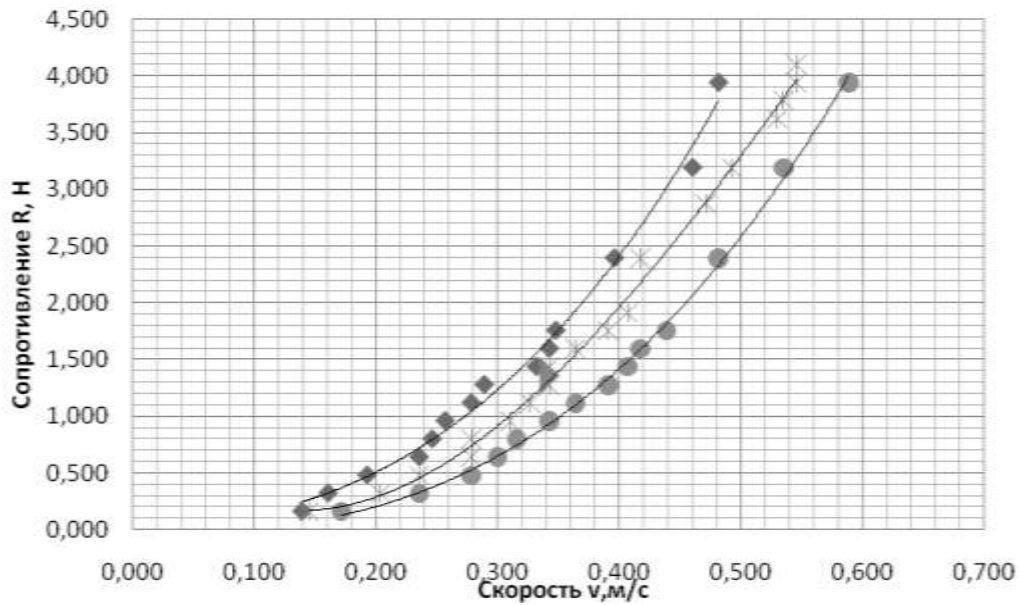
$$\frac{R}{mg} = 0,32 \cdot Fr_v^{2,5} \alpha_1 \left(\bar{q}\right)^{\beta_1}. \quad (12)$$

Используя пакет программ Microsoft Office Excel, методом наименьших квадратов были найдены искомые коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ , и в результате функция  $f_2$  примет следующий вид

$$f_2\left(\bar{q}\right) = 0,07 \left(\bar{q}\right)^{-0,41}. \quad (13)$$

Второй диапазон расходов  $\bar{q}$  составлял от 0,0020 до 0,0036 и исследовался в работе [2]. Испытания в чистой воде показали, что это изменение практически не повлияло на сопротивление. Таким образом, значение функции в диапазоне  $0,0020 \leq \bar{q} \leq 0,0036$  можно принять равной единицы  $f_2\left(\bar{q}\right) = 1$  [2].

В опытах с моделями № 1, 2, 3 оценивалось влияние отношения главных размерений  $L/B$  на сопротивление моделей. Эти отношения находились в пределах  $0,71 < L/B < 1,41$ , характерных для построенных и спроектированных ледокольных платформ на воздушной подушке. При изменении отношения  $L/B$  давление в воздушной подушке оставалось неизменным. Результирующие кривые представлены на рис. 5.



**Рис. 5. Влияние отношения L/B на сопротивление моделей ЛПВП**

- ◆ - масса модели  $m=14,6$  кг;  $P_{вп} = 263,5$ Па;  $Q = 0,01266$  м<sup>3</sup>/с;  $L/B=0,71$ ;
- Ж - масса модели  $m=17,58$  кг;  $P_{вп} = 263,5$ Па;  $Q = 0,01266$  м<sup>3</sup>/с;  $L/B=1,17$ ;
- - масса модели  $m=14,6$  кг;  $P_{вп} = 263,5$ Па;  $Q = 0,01266$  м<sup>3</sup>/с;  $L/B=1,41$

Анализ полученных данных показал, что функция  $f_3\left(\frac{L}{B}\right)^{m_3}$  примет вид

$$f_3\left(\frac{L}{B}\right)^{m_3} = 1,27 - 0,27\left(\frac{L}{B}\right) \tag{14}$$

Ее значения справедливы в указанном диапазоне скоростей и отношений L/B.

Модель № 1 испытывалась на глубокой воде и мелководье. Характерным безразмерным параметром, определяющим влияние мелководья, может служить отношение  $\frac{H_6}{h_{вп}}$ . Сопротивление модели приведено на рис. 6.

Анализ результатов позволил установить, что функция  $f_4\left(\frac{H_6}{h_{вп}}\right)$  в рассматриваемом диапазоне скоростей определяется зависимостью, которую можно аппроксимировать в виде:

$$f_4\left(\frac{H_6}{h_{вп}}\right) = \frac{1,05}{\left(\frac{H_6}{h_{вп}}\right)^{1,6}} + 1. \tag{15}$$

Окончательно формула сопротивления примет следующий вид:

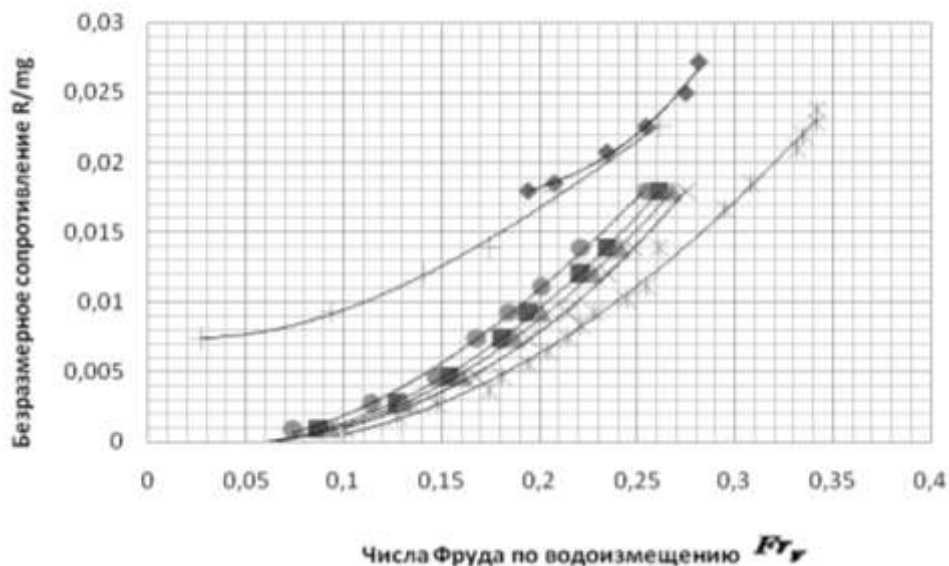
- для  $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$

$$R = \left(0,32 \cdot Fr_V^{2,5}\right) \left(0,07 \cdot \left(\bar{q}\right)^{-0,41}\right) \left(1,27 - 0,27 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)\right) \left[\frac{1,05}{\left(\frac{H_6}{h_{вп}}\right)^{1,6}} + 1\right] mg. \tag{16}$$

- для  $0,0022 \leq \bar{q} \leq 0,0036$



$$R = \left( 0,32 \cdot Fr_V^{2,5} \right) \left( 1,27 - 0,27 \left( \frac{L}{B} \right) \right) \left( \frac{1,05}{\left( \frac{H_6}{h_{вп}} \right)^{1,6}} + 1 \right) mg \cdot \quad (17)$$



**Рис. 6. Кривые сопротивления модели № 1 на глубокой воде и на мелководье:**

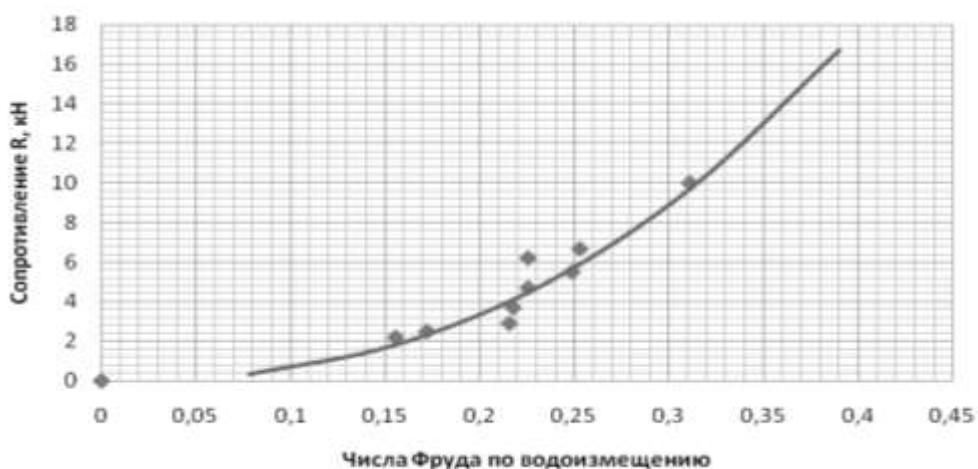
масса модели  $m=17,58$  кг; давление в ВП  $P_{ВП}=263,5$  Па; глубина воздушной впадины

$h_{ВП}=0,027$ м; расход воздуха  $Q=0,01266$ м<sup>3</sup>/с; ◆ – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=1,0$ ; + – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=1,2$ ;

● – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=1,5$ ; ■ – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=2,0$ ; ▲ – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=2,5$ ; × – мелководье  $\frac{H_6}{h_{ВП}}=3,0$ ;

Ж – глубокая вода

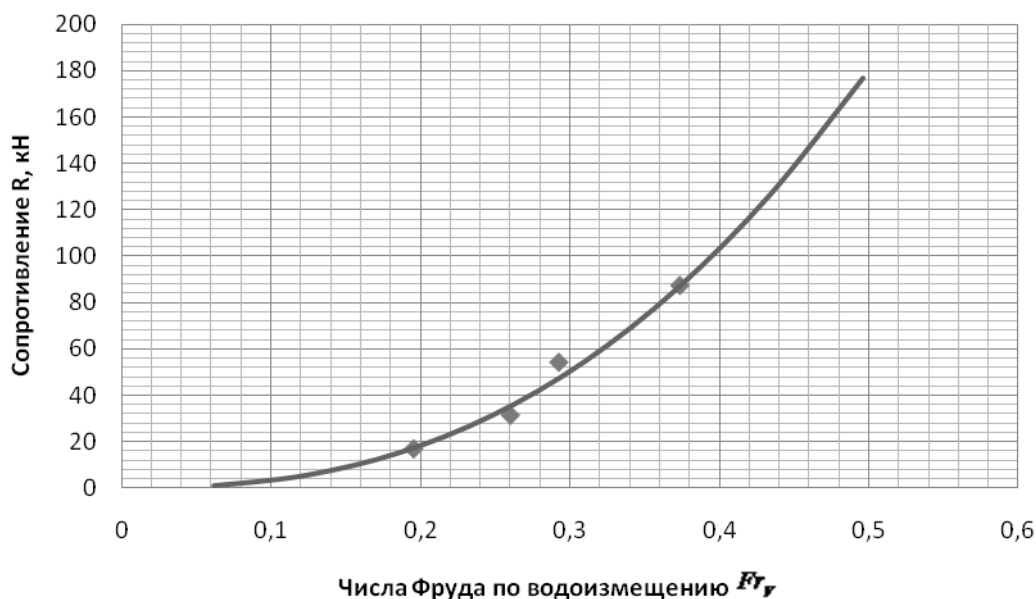
Для оценки адекватности полученной зависимости были использованы результаты натуральных испытаний соответствующих ледокольных платформ на воздушной подушке ВП-1 и 107П на глубокой воде. Графики сравнения натуральных данных с предлагаемой формулой представлены на рис. 7 и рис. 8.



**Рис. 7. График сравнения данных натуральных испытаний ВП-1 [3] с формулой (17):**

◆ - данные натуральных испытаний ВП-1;

— - теоретическая кривая сопротивления ВП-1, полученная по формуле (17)



**Рис. 8.** График сравнения данных натуральных испытаний 107П с формулой (16):

◆ - данные натуральных испытаний 107П;

— - теоретическая кривая сопротивления 107П, полученная по формуле (16)

Таким образом, в указанном диапазоне применения параметров испытания моделей ЛПВП и сравнение с натурными данными позволяют рекомендовать зависимости (16) и (17) для прогнозирования сопротивления ЛПВП при движении с малой скоростью в чистой воде.

#### Библиографический список

1. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: учебник: в 2 кн. Кн. 1 / Г.Ф. Демешко. – СПб.: Судостроение, 1992.
2. Зуев, В.А. Сопротивление платформы на воздушной подушке при малых числах Фруда / В.А. Зуев // Автоматизация проектирования судов новых типов. – Горький: ГПИ, 1989.
3. Смирнов, Ю.И. Результаты эксплуатационных испытаний платформы на воздушной подушке финской постройки ВП-1 / Ю.И. Смирнов // Перспективные типы судов, мореходные и ледовые качества: сб. науч. тр. – Л.: ЦНИИМФ, 1985.

Дата поступления  
в редакцию 03.02.2012

V.A. Zuev, N.M. Semenova

#### CALM-WATER RESISTANCE OF ICE-BREAKING AIR CUSHION PLATFORM

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

The results of towing-basin tests of an ice-breaking air cushion platform model in still water are considered.

*Key words:* water resistance, ice-breaking air cushion platform, full-scale test.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.4-52

А. Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Р.Ш. Бедретдинов

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УЗЛА НАГРУЗКИ 20 кВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ РАВНОМЕРНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания интеллектуальных электрических сетей и предложен новый подход к построению распределительных сетей. Рассмотрена схема РУ узла нагрузки 20 кВ равномерно-распределенной сети с интегрированным модулем управления. Показаны результаты моделирования и исследования режимов работы узла нагрузки интеллектуальной равномерно-распределенной электрической сети.

*Ключевые слова:* узел электрической нагрузки, интеллектуальная равномерно-распределенная сеть, составная конфигурация, режимы работы, интегрированный модуль управления, компьютерная модель.

Ситуация, сложившаяся в энергетике России (дефицит мощности, износ энергетического оборудования, участвовавшие перебои в электроснабжении потребителей в результате аварий, значительные потери электроэнергии, отсутствие автоматического управления распределением и потреблением электроэнергии и др.), свидетельствует о назревшей необходимости скорейшего перехода электроэнергетики на качественно новый уровень.

Большие надежды возлагаются на создание интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid) [1], характерными особенностями которых являются:

- способность к самовосстановлению после сбоев в подаче электроэнергии;
- устойчивость сети к физическому и кибернетическому вмешательству злоумышленников;
- обеспечение требуемого качества передаваемой электроэнергии;
- обеспечение синхронной работы источников генерации и накопителей электроэнергии;
- повышение эффективности работы энергосистемы в целом и др.

В «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» одним из приоритетных направлений научно-технического прогресса в электроэнергетике отмечено «создание высокоинтегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети – Smart Grid)».

В настоящее время создание интеллектуальных электрических сетей России заключается в замене старого энергетического оборудования современным с установкой многочисленных датчиков. Однако вместе с этими мероприятиями необходимо изменение и самой структуры распределительных электрических сетей. Новому подходу к построению распределительных сетей авторами посвящен ряд статей [2].

С точки зрения надежности и равномерности распределения энергии наиболее рациональными являются электрические сети, состоящие из равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой линиями одинакового сечения, поэтому предлагается

сотовая конфигурация электрической сети [2]. Вся обслуживаемая территория покрывается равномерно-распределенной сетью, имеющей конфигурацию связанных шестиугольников, в вершинах которых располагают узлы нагрузки. Каждый узел сети имеет строго определенную зону обслуживания, а в центре кольца имеется зона совместного обслуживания (рис. 1, а).

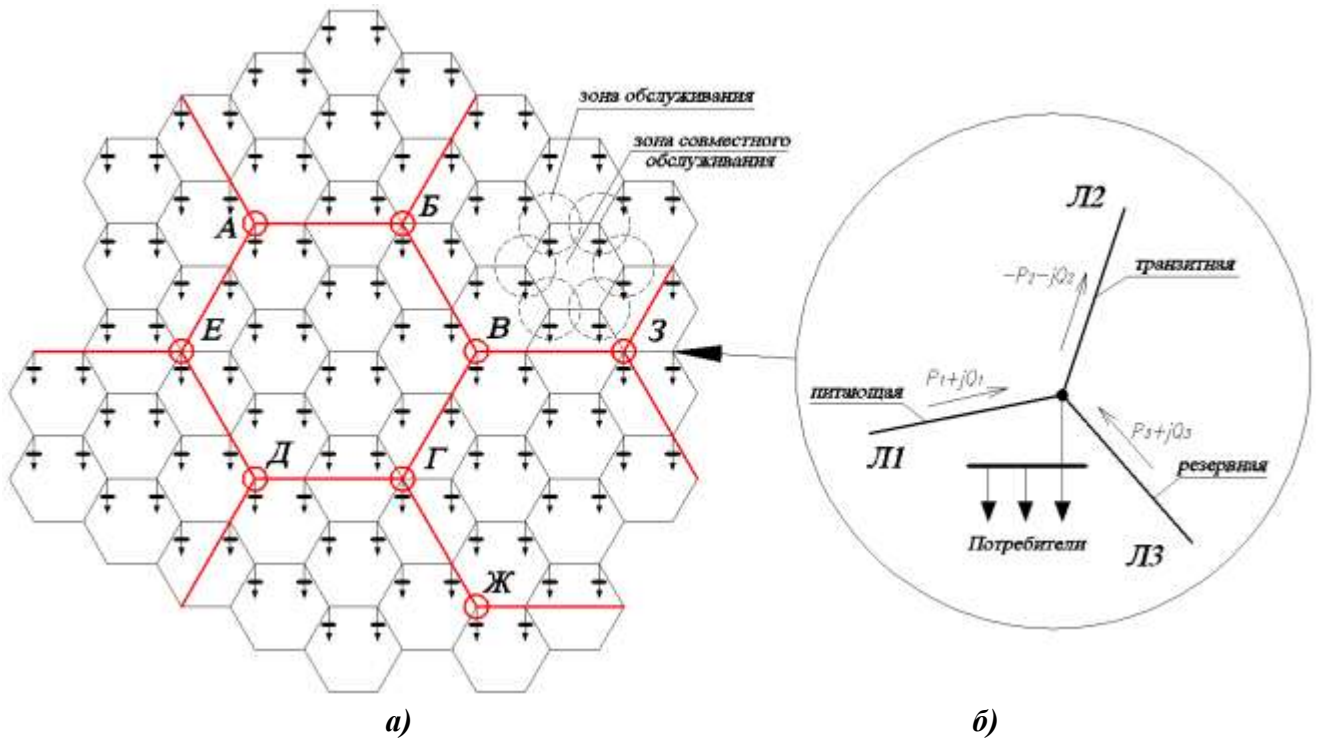


Рис. 1. Принцип формирования распределительной сети и узлов нагрузки

Как показано на рис. 1, б, узел нагрузки имеет три луча. Первый и второй – лучи, питающие нагрузку сети, которые в зависимости от схемно-режимной ситуации могут осуществлять транзитные перетоки к другим узлам, третий – резервный (т.е. находится в горячем резерве).

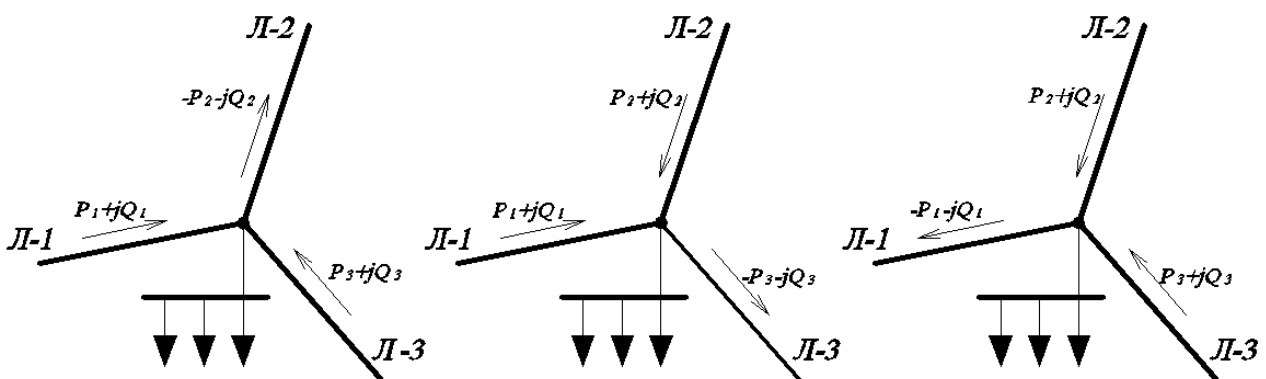


Рис. 2. Варианты питания узла нагрузки

Данная сеть инвариантна: питающие лучи могут стать, при необходимости, транзитным или резервным, резервный – питающим и т. п., т. е. возможна переконфигурация узла и изменение потоков мощности в сети в зависимости от той или иной ситуации (рис. 2).

Равномерно-распределенную сеть можно конфигурировать в зависимости от территории и необходимости в узлах нагрузки, т.е. там, где нет нагрузки, там сеть отсутствует.

Электрическая распределенная сеть является многоуровневой, в зависимости от распределяемой мощности и напряжения. Сеть первого уровня наиболее рационально выполнять на напряжении 20 кВ, что обеспечивает возможность построения узлов большей мощности, увеличение пропускной способности ЛЭП, снижение потерь электрической энергии и уровня токов короткого замыкания по сравнению с напряжениями класса 6-10 кВ. Узлами нагрузки сети первого уровня будут распределительные пункты 20 кВ. В сети второго уровня узлами нагрузки являются подстанции 110-220-500/20 кВ (точки А - 3 на рис. 1, а).

Возможным вариантом распределительного устройства (РУ) узла нагрузки сети 1 уровня может быть схема (рис. 3). В данной схеме имеются две системы шин: рабочая и обходная; рабочие и обходные выключатели, служащие для инвариантных переключений и выполнения профилактических, ремонтных работ. Так же возможно подключение генераторов на напряжение 20 кВ малой и средней мощности, в том числе и на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). Схема имеет ограниченное количество вариантов состояния, поэтому легко алгоритмируется.

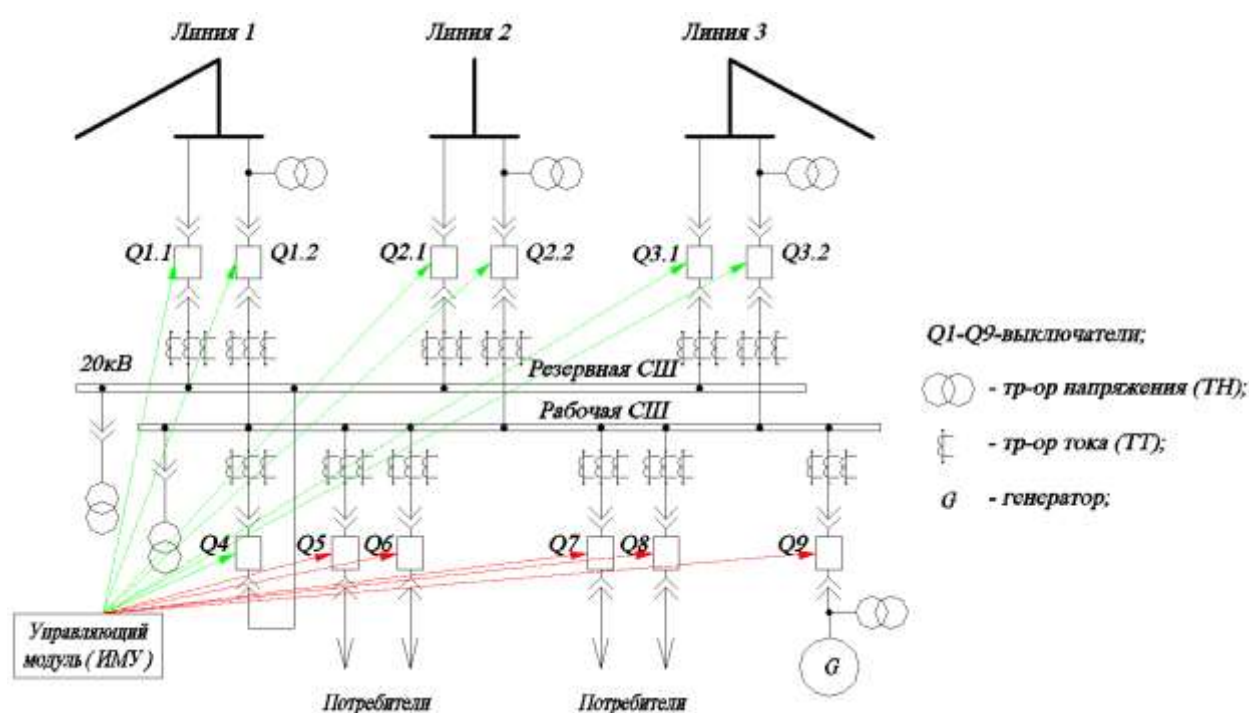


Рис. 3. Схема узла электрической нагрузки

Узловым элементом интеллектуальной равномерно-распределенной сети является интегрированный модуль управления (ИМУ) (рис. 3), позволяющий реализовать функции управления, защиты, хранения и передачи информации, а также функцию оплаты за электроэнергию.

Основная функция ИМУ – управление узлом нагрузки в автоматическом режиме. Смена режима узла выполняется путем изменения состояния выключателей в схеме (включен – выключен). ИМУ сам оценивает ситуацию в распределительной сети и выбирает оптимальный из возможных режимов. При этом на каждый из выключателей подается сигнал на включение или отключение.

Рассмотрены состояния выключателей РУ 20 кВ (рис. 3) при различных вариантах питания и режимах работы узла нагрузки (табл. 1).

Работу ИМУ можно алгоритмизировать с помощью логических уравнений для каждого выключателя, в зависимости от режима работы узла. Логические уравнения составляются с помощью простейшей операции булевой алгебры и задают вид электрической схемы.

Таблица 1

## Нормальные, предаварийные и аварийные режимы работы узла нагрузки

№ п/п	Состояние выключателей							Варианты питания узла	Режим	Описание
	Линия 1		Линия 2		Линия 3		СВ			
	Q1.1	Q1.2	Q2.1	Q2.2	Q3.1	Q3.2	Q4			
1	-	+	-	+	+	-	-	Л-1-питание Раб.СШ, Л-2-транзит Раб.СШ, Л-3-питание Рез.СШ (горячий резерв).	Нормальный	Узел находится в рабочем режиме. На экране горят зеленые лампы
2	-	+	+	-	-	+	-	Л-1-питание Раб.СШ, Л-2-питание Рез.СШ (горячий резерв), Л-3-транзит Раб.СШ	Нормальный	Узел находится в рабочем режиме На экране горят зеленые лампы
3	-	+	+	-	+	-	-	Л-1-питание Раб.СШ, Л-2-питание Рез.СШ, Л-3-транзит Рез.СШ.	Нормальный	Узел находится в рабочем режиме На экране горят зеленые лампы
4	-	+	+	-	+	-	-	Л-1-питание Раб.СШ, Л-2-транзит Рез.СШ, Л-3-питание Рез.СШ.	Нормальный	Узел находится в рабочем режиме На экране горят зеленые лампы
5	-	+	-	+	-	+	-	Л-1-питание Раб.СШ, Л-2-транзит Раб.СШ, Л-3-транзит Раб.СШ	Предаварийный	Нет резерва. Требуется перевода Л-2 или Л-3 в горячий резерв. На управляющий модуль подается предупредительный сигнал
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
22	-	-	-	+	-	-	-	Л-1- нет питания (авария), Л-2- питание Раб.СШ, Л-3- нет питания (авария)	Авария	Авария на Л-1 и Л-3. Требуется восстановление питания на Л-1 и Л-3. Возможно питание только ответственных потребителей. На управляющий модуль подается сигнал аварии
23	-	-	-	-	-	+	-	Л-1- нет питания (авария), Л-2- нет питания (авария), Л-3- питание Раб.СШ	Авария	Авария на Л-1 и Л-2. Требуется восстановление питания на Л-1 и Л-2. Возможно питание только ответственных потребителей. На управляющий модуль подается сигнал аварии

Логическое уравнение для выключателя  $Q1.1$ , когда узел находится в нормальном режиме (режим №1 -  $Q1.1, Q2.1, Q3.2, Q4$  – отключены,  $Q1.2, Q2.2, Q3.1$  – включены) будет иметь вид:

$$Y_{Q1.1}^{откл} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} ; \quad (1)$$

$$Y_{Q1.1}^{вкл} = \overline{Y_{Q1.1}^{откл}} , \quad (2)$$

где  $Y_{Q1.1}^{откл}$  - выходной сигнал на катушку отключения выключателя  $Q1.1$ ;  $Y_{Q1.1}^{вкл}$  - выходной сигнал на катушку включения выключателя  $Q1.1$ ;  $\overline{X_{Qn}}$  и  $X_{Qn}$  - состояние вторичного контакта, дублирующего состояние выключателя.

Контактный аналог данного уравнения показан на рис. 4.

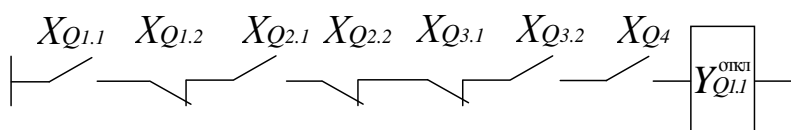


Рис. 4. Контактный аналог логического уравнения

Пример логических уравнений для одного из режимов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Логические уравнения для выключателей

№ п/п	Режим	Логическое уравнение	Описание
1	1	$Y_{Q1.1}^{откл.} = \overline{X_{Q1.1}} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q1.1}^{вкл.}}$	Сигнал на катушку отключения выключателя $Q1.1$
2		$Y_{Q1.2}^{вкл.} = X_{Q1.1} \cdot X_{Q1.2} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q1.2}^{откл.}}$	Сигнал на катушку включения выключателя $Q1.2$
3		$Y_{Q2.1}^{откл.} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q2.1}^{вкл.}}$	Сигнал на катушку отключения выключателя $Q2.1$
4		$Y_{Q2.2}^{вкл.} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot X_{Q2.2} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q2.2}^{откл.}}$	Сигнал на катушку включения выключателя $Q2.2$
5		$Y_{Q3.1}^{вкл.} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot X_{Q3.1} \cdot X_{Q3.2} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q3.1}^{откл.}}$	Сигнал на катушку включения выключателя $Q3.1$
6		$Y_{Q3.2}^{откл.} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot \overline{X_{Q3.2}} \cdot X_{Q4} = \overline{Y_{Q3.2}^{вкл.}}$	Сигнал на катушку отключения выключателя $Q3.2$
7		$Y_{Q4}^{откл.} = X_{Q1.1} \cdot \overline{X_{Q1.2}} \cdot X_{Q2.1} \cdot \overline{X_{Q2.2}} \cdot \overline{X_{Q3.1}} \cdot X_{Q3.2} \cdot \overline{X_{Q4}} = \overline{Y_{Q4}^{вкл.}}$	Сигнал на катушку отключения выключателя $Q1.1$

Для реализации и проверки правильности работы алгоритмов по перестроению интеллектуальной равномерно-распределенной сети при аварийных режимах, а также для наглядного отображения топологии сети с численными значениями параметров узлов нагрузки и каждой линии, соединяющих их, в пакете прикладных программ Matlab разработана компьютерная модель интегрированной системы управления электрическими сетями. Компьютерная модель сети учитывает три возможных режима работы узлов нагрузки 20 кВ: нормальный, предаварийный и аварийный.

Нормальный режим работы узла – это режим, когда потребители получают питание в полном объеме, а также через узел проходит транзит мощности к соседним узлам. В этом случае первая линия является питающей, вторая находится в горячем резерве, а третья выполняет функцию транзита.

Предаварийный режим наблюдается при потере резервной линии. В этом случае питание потребителей и транзит мощности выполняется в полном объеме, но отсутствует ре-

зев. В этом режиме узел может находиться определенный лимит времени до ликвидации аварии на резервной линии.

Аварийный режим работы характеризуется потерей резервной и транзитной линий. В этом случае питание потребителей осуществляется, но, возможно, не в полном объеме. Данный режим возможен крайне редко.

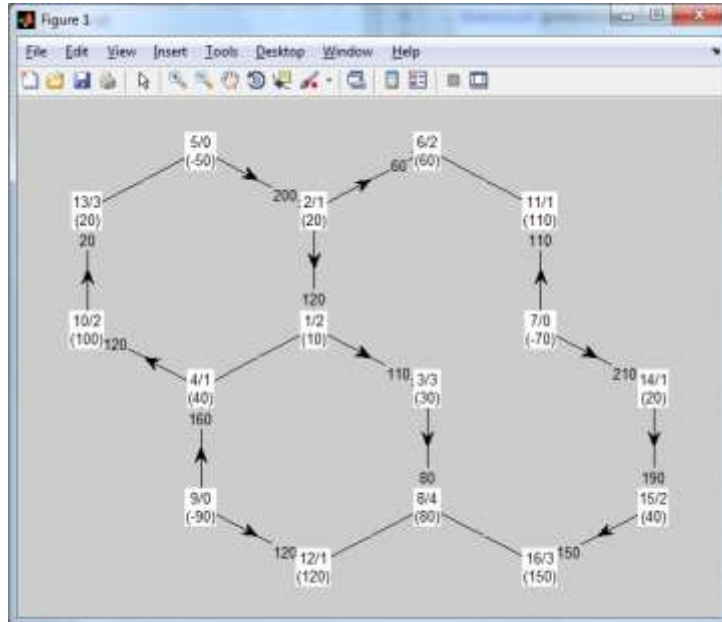


Рис. 5. Конфигурация электрической сети в нормальном режиме работы

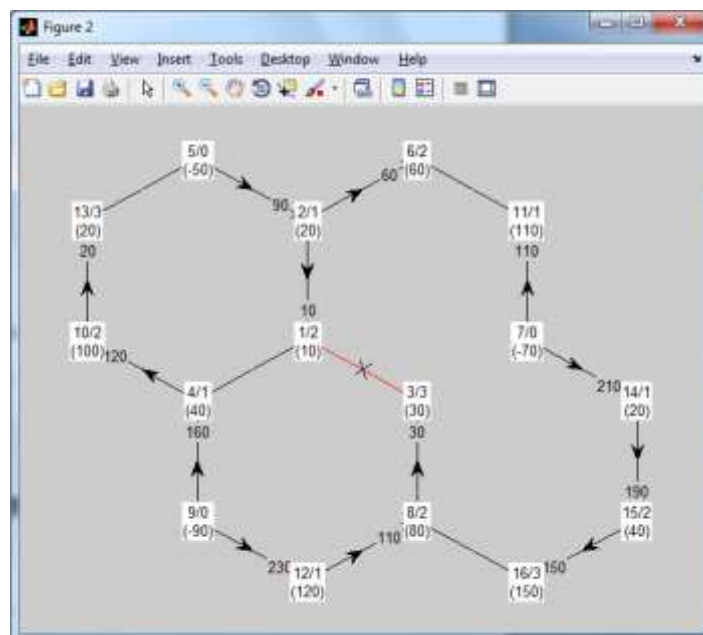


Рис. 6. Конфигурация электрической сети после аварийного режима работы

При запуске файла, содержащего конфигурацию сети, выполняется некоторое количество внутренних итераций и на экране отображается первоначальное состояние сети в нормальный режим работы (рис. 5).

Условные обозначения графа сети:

- Линии со стрелками обозначают питающие или транзитные линии, без стрелок — линия резерва.
- Цифры на линиях указывают нагрузку, протекающую по данной линии.



- Обозначения в узлах:
  - номер узла;
  - уровень удаленности узла от ПС 110(220)/20 кВ.
- В скобках указано значение расчетной нагрузки узла. Знак «-» указывает на то, что данный узел питается от высоковольтной линии 110(220) кВ.

При разрыве линии, например, соединяющей узлы №1 и №3, происходит переконфигурация схемы, с целью обеспечения непрерывного питания нагрузки в узле №3. Данные действия выполняются в соответствии с заложенными алгоритмами управления. В итоге узел №3, который питался по линии от узла №2, после разрыва этой линии будет получать питание от наиболее близкого источника – узла №8 (рис. 6). Таким образом, отказ одного из элементов в схеме не приводит к потере питания потребителей.

Разработанная компьютерная модель позволяет наглядно отразить поведение равномерно-распределенной электрической сети при различных режимах работы узлов нагрузки 20 кВ. Программа выдает численные значения параметров элементов, а также топологию электрической сети, на основе которых можно судить о корректности разработанных алгоритмов и моделей интегрированной системы управления.

Анализ нормальных и аварийных режимов работы узлов распределенной электрической сети показал, что сотовая конфигурация распределительной сети и принятая схема РУ узла нагрузки 20кВ (см. рис. 3) обеспечивают гарантированное электроснабжение потребителей в случае выхода из строя одной из линий, питающей узел нагрузки.

#### Библиографический список

1. **Ледин, С.** Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике./ 2010. № 11 (16).
2. **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: научно-теоретический журнал. 2011. №3. С. 148–152.

*Дата поступления  
в редакцию 07.02.2012*

**A.B. Loskutov, E.N. Sosnina, A.A. Loskutov, R.Sh. Bedretdinov**

#### **OPERATING MODES RESEARCH OF KNOT OF LOADING 20 kV IN THE UNIFORMLY-DISTRIBUTED SMART GRIDS**

**Purpose:** Creation and research of topology of the smart distributive electric networks raising reliability of an electrical supply of consumers.

**Design/methodology/approach:** It is proposed configuration of the cellular electrical network. For working out of algorithms of management in site of electrical loads the logic equations algebras of Boole are used. Moreover for an estimation correctness work algorithms of site loading uniformly-distributed electric network created a computer model of functioning site of electrical loads 20 kV.

**Findings:** Researches normal and emergency operation of work of knot of loading have shown that the cellular configuration of a distributive network and the accepted scheme of the switching center of knot of loading 20 kV provide the guaranteed electrical supply of consumers in case of failure of one of the lines, loading feeding knot.

**Research limitations/implications:** Research limitations – electric power industry. Working out has great value for an uninterrupted food of receivers of the electric power of the industry, transport, a life and sphere of services, agriculture.

**Originality/value:** The central element of intellectual uniformly distributed network is an the integrated module of management (IMM), which serves as the control, protection, storage and transmission of information, as well as the function of paying for electricity. Thus the proposed approach in the construction of electricity networks and the selected circuit site load will improve the controllability and automation level of the electrical network.

*Key words:* knot of electric loading, uniformly-distributed smart grid, cellular configuration, the operating modes, the integrated module of management, computer model.

УДК 621.317.629.12.

Г.И. Коробко, С.В. Попов, В.В. Лебедев, А.С. Макаев

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»

Рассмотрены основные показатели качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах и причины их ухудшения. Проведен анализ негативного влияния снижения качества электроэнергии на работу судового электрооборудования, а также устройств, позволяющих улучшить его показатели. Показана возможность комплексного решения задачи повышения качества электроэнергии с помощью вольтдобавочных устройств. Проведено моделирование переходных процессов судовой электроэнергетической системы, подтверждающее эффективность их использования.

*Ключевые слова:* качество электроэнергии, судовые электроэнергетические системы, вольтдобавочные устройства, моделирование переходных процессов.

Важнейшая из характеристик эффективности работы судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) – это качество электроэнергии в различных режимах ее работы. Специфической особенностью судовой электростанции (СЭС) является то, что она представляет собой автономный объект, в котором процессы выработки, распределения и потребления электроэнергии неразделимы. Это означает, что любое изменение в состоянии одного из элементов судовой электростанции – генераторных агрегатов, преобразователей параметров электроэнергии, распределительных устройств и потребителей будет влиять на состояние других элементов. Следствием этого является многообразие переходных процессов работы СЭЭС, которое сопровождается изменением электрического, электромагнитного и механического состояния электрических машин, аппаратов, преобразователей и других устройств в составе судовой электроэнергетической системы.

Изменение нагрузки СЭС (включение и отключение потребителей) или изменение мощности, потребляемой отдельными мощными приемниками, приводит к изменению напряжения и частоты, т.е. к переходному процессу. Таким образом, показатели качества электроэнергии в СЭЭС постоянно меняются относительно значений, принятых за номинальные и допустимые.

Все потребители электроэнергии на судне нормально работают тогда, когда бесперебойно получают электроэнергию необходимого качества в необходимом количестве. Поэтому напряжение и частота на шинах ГРЩ должны поддерживаться на номинальном уровне, мощность работающих генераторных агрегатов должна превышать мощность, потребляемую приемниками, а действие регуляторов напряжения и частоты, и других устройств, улучшающих качество электроэнергии, должно восстанавливать номинальные параметры как можно быстрее.

Качество электроэнергии принято оценивать совокупностью свойств, обуславливающих ее пригодность для нормальной работы приемников в соответствии с их назначением. Его основные показатели – это отклонение частоты ( $\Delta f$ ) и напряжения ( $\Delta U$ ) в установившихся и переходных режимах.

В установившемся режиме работы СЭС, в соответствии с требованиями Российского Речного Регистра (РРР) [1], допускается отклонение частоты  $\Delta f_{уст} = \pm 1,0\%$  и напряжения  $\Delta U_{уст} = \pm 2,5\%$ . В переходных режимах  $\Delta f_{перех} = \pm 10\%$ , время восстановления 5 с;  $\Delta U_{перех} = -15\% + 20\%$ , время восстановления 1,5 с.

Современные системы стабилизации частоты вращения дизель-генераторных агрегатов строятся на базе актуаторов, обеспечивающих непрерывное регулирование подачи топлива в дизель, и электронных регуляторов частоты вращения. Такие системы обладают высокой точностью поддержания частоты вращения, как в статических, так и динамических режимах работы. Применение в них ПИД (ПИ) - регуляторов, а также двухконтурных систем подчиненного регулирования, позволяет практически исключить статическую ошибку. Реально отклонение частоты вращения от номинального значения в установившемся режиме не превышает  $\pm 0,5\%$ , во всем диапазоне изменения нагрузки. Динамические провалы и всплески частоты вращения (при набросе и сбросе активной нагрузки генератора) также имеют небольшую величину, вследствие высокого быстродействия системы регулирования подачи топлива и значительной механической инерционности дизель-генераторного агрегата. Таким образом, требования Регистра в отношении точности стабилизации частоты вращения дизель-генераторных агрегатов в установившихся и переходных режимах обеспечиваются с большим запасом.

Стабилизацию напряжения на зажимах генератора обеспечивает регулятор тока возбуждения, которым управляет электронный регулятор (корректор) напряжения. Обычно такие системы используют отрицательную обратную связь по напряжению и положительную, зависящую от характера нагрузки, связь по току (системы компаундирования). В настоящее время, большинство судовых синхронных генераторов являются бесщеточными. В них встроен возбудитель в виде обращенной синхронной машины и блок вращающихся диодов, от которого питается обмотка возбуждения генератора. Применение бесщеточных генераторов позволяет существенно снизить мощность и габариты регулятора возбуждения. За счет двухкаскадной схемы значительно увеличивается остаточная ЭДС, что очень важно для обеспечения самовозбуждения генератора в судовых условиях. Однако в связи с этим бесщеточный генератор имеет существенный недостаток, который заключается в невозможности снижения до нуля основного магнитного потока машины. Следовательно, при сбросе нагрузки (особенно индуктивной) будет иметь место значительный всплеск напряжения на зажимах генератора, который невозможно быстро погасить. Дополнительным негативным фактором, влияющим на скорость переходных процессов в генераторе, является значительная постоянная времени обмотки возбуждения. В этом отношении щеточные генераторы находятся в более выгодных условиях, так как имеется возможность быстрого уменьшения тока возбуждения за счет смены полярности напряжения на обмотке возбуждения.

Уменьшение величины и длительности провалов напряжения достигают форсировкой возбуждения, которая позволяет ускорить процесс нарастания тока возбуждения (величина форсировки может достигать шестикратного значения относительно номинального напряжения возбуждения генератора). То же самое может быть обеспечено и в отношении всплесков напряжения, однако, только для генераторов со щетками.

Как показывает анализ, проведенный в [2], отклонение напряжения в судовой сети в переходных режимах может существенно превышать допустимые значения. Это будет негативно влиять на работу ряда элементов СЭЭС. В связи с этим, возникает необходимость создания специальных устройств, позволяющих снизить величину динамических провалов и всплесков напряжения.

Наиболее эффективным, на наш взгляд, является использование вольтодобавочных устройств, обеспечивающих стабилизацию напряжения во всей судовой сети, либо для группы потребителей, особо критичных к изменению питающего напряжения [3]. Мощность вольтодобавочных устройств может быть заметно снижена за счет применения накопителей электроэнергии, в качестве которых могут использоваться конденсаторы большой емкости, либо аккумуляторы сравнительно малой емкости, но на высокое напряжение (300В и более).

Еще одним важным показателем качества электроэнергии в СЭЭС является небаланс напряжений. Он оценивается коэффициентом небаланса трехфазной системы и равен разности максимального и минимального напряжений в фазах судовой сети, отнесенной к номинальному напряжению генератора, и выражен в процентах:

$$k_{\text{неб}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% .$$

Небаланс возникает вследствие несимметричного распределения токов нагрузки по отдельным обмоткам фаз статора генератора, по причине неравномерного распределения однофазных приемников по фазам и суммарного небаланса несимметричных трехфазных приемников. Также небаланс напряжений имеет место за счет собственного небаланса напряжений синхронного генератора в режиме холостого хода. По разным оценкам коэффициент небаланса генераторов колеблется от десятых долей до 2–2,5%.

Небаланс напряжений трехфазной системы отрицательно сказывается как на работе силового электрооборудования, так и на других приемниках. У синхронных генераторов возникает дополнительный нагрев ротора и статора, увеличивается вибрация генератора. У асинхронных двигателей возникают значительные дополнительные потери и, как следствие, дополнительный нагрев, снижаются обороты за счет увеличения вибрации. Однофазные приемники воспринимают небаланс как повышение или понижение напряжения. В трехфазных выпрямителях небаланс напряжений проявляется как низкочастотная пульсация выходного напряжения.

Наибольшая несимметрия напряжения возникает при включении однофазной нагрузки на генератор, работающий в режиме холостого хода. Трехфазная симметричная нагрузка (особенно асинхронная) способствуют уменьшению несимметрии напряжения.

Одним из наиболее простых методов уменьшения несимметрии напряжений является равномерное распределение однофазной нагрузки по фазам. Однако в действительности полностью достичь этого практически не удается.

В настоящее время для снижения несимметрии применяют специальные симметрирующие устройства, использующие компенсационный способ, которые позволяют снизить токи нулевой и обратной последовательности. Эти устройства могут быть нерегулируемыми, либо регулируемыми, при заведомо известном изменении коэффициента несимметрии, а для их построения используются электрические и электромагнитные связи. К таким устройствам относится так называемая «схема Штейнметца», «схема Скотта» [4], а также устройства на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, в котором, за счет изменения угла поворота вторичной обмотки, можно добиться изменения потребления устройством токов нулевой и обратной последовательностей.

В СЭЭС изменение параметров нагрузки может происходить достаточно быстро и по неизвестному заранее закону. В связи с этим, применение существующих симметрирующих устройств не дает желаемого эффекта. Поэтому возникает необходимость использования устройств компенсации асимметрии с автоматически изменяющимися параметрами, обладающих достаточно высоким быстродействием.

Одним из вариантов реализации такого устройства является система, использующая принцип вольтодобавки (вольтоотбавки). При появлении несимметрии, например, вследствие включения однофазной нагрузки, происходит «вольтодобавка» в две фазы, к которым подключена нагрузка, и «вольтоотбавка» из третьей фазы. Как следует из изложенного, система компенсации несимметрии во многом схожа с системой стабилизации напряжения в судовой сети при его провалах и всплесках. Ее отличие будет заключаться в длительном режиме вольтодобавки (вольтоотбавки) и меньшей ее величине (2–3% от номинального значения).

В настоящее время существенное значение приобретает такой показатель качества электроэнергии, как коэффициент нелинейных искажений, показывающий насколько фактическая форма кривой напряжения отличается от синусоидальной, который определяется выражением:

$$k_{\text{н}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} ,$$

где  $n$  – порядок высшей гармоники;  $U_n$  – действующее значение гармоники напряжения  $n$ -го порядка;  $U_1$  – действующее значение первой (основной) гармоники напряжения.

Нелинейные искажения присутствуют в сети постоянно, так как сами генераторные агрегаты, даже на холостом ходу генерируют напряжение, форма которого отлична от синусоидальной. Такие искажения относятся к собственным искажениям источников напряжения и обусловлены их конструктивным исполнением. Однако величина собственных искажений для большинства судовых синхронных генераторов не превышает 2–3%, что соответствует требованиям Российского Речного Регистра.

Основными источниками нелинейных искажений в судовой сети являются статические преобразователи, основу силовых схем которых составляют полупроводниковые приборы – диоды и тиристоры, являющиеся по своей природе нелинейными элементами.

Нелинейное искажение оказывает отрицательное влияние, как на работу самой электростанции, так и на работу потребителей, вызывая дополнительные потери и снижение коэффициента мощности. Наибольшие потери имеют место в трансформаторах, генераторах и двигателях, что приводит к их перегреву и повышенной вибрации. Присутствие высших гармоник в судовой сети может привести к «качанию» дизель-генераторного агрегата при совпадении частоты собственных колебаний дизеля с частотой высших гармоник генератора.

При наличии высших гармоник в кривой напряжения более интенсивно протекает процесс старения изоляции, что ведет к повышению аварийности в кабельных сетях.

Системы автоматики отрицательно реагируют на наличие высших гармоник тока и напряжения, что является причиной необоснованных срабатываний и колебаний в замкнутых системах регулирования. Высокий уровень гармоник в питающем напряжении может приводить к сбоям в работе различного рода радиоэлектронной аппаратуры. Высшие гармоники тока, кроме того, могут быть причиной возбуждения радиопомех.

Способы снижения искажений напряжения питающей сети основываются на уменьшении двух факторов: амплитуд высших гармонических составляющих потребляемого преобразователями тока и импедансов системы для этих гармоник. Это приводит к необходимости использования многофазных схем преобразователей, совершенствованию схем их управления, а также к применению генераторов с меньшими значениями сверхпереходных сопротивлений  $X_q''$  и  $X_d''$  и установке специальных сетевых дросселей и фильтров [5].

Установка сетевых дросселей и особенно фильтров – достаточно дорогостоящее мероприятие, а более дешевые резонансные фильтры не нашли применения в СЭС, в силу того, что частота судовой сети может отклоняться от номинальной как в установившихся, так и в переходных режимах, кроме того, в процессе эксплуатации суммарная емкость конденсатора фильтра может уменьшиться, поэтому требуется непрерывный контроль за состоянием батареи конденсаторов.

В настоящее время ведется разработка полупроводниковых преобразователей-компенсаторов высших гармоник на базе силовых активных фильтров (САФ) [6]. Достоинством данного способа компенсации является возможность учета импеданса источника, что позволяет компенсировать нелинейные искажения более эффективно. Однако САФ являются довольно сложными устройствами, поэтому их разработка и настройка является трудоемкой задачей. К недостаткам данных устройств следует отнести эффективность их работы только в системах с симметричной нелинейной нагрузкой.

Альтернативным вариантом активного устройства компенсации нелинейных искажений является компенсатор высших гармоник на базе вольтодобавочных устройств. Принцип действия данного компенсатора заключается в том, что напряжение сети сравнивается с эталонным напряжением, а полученное напряжение рассогласования, после усиления, поступает вольтодобавочный трансформатор, включенный последовательно с сетью. Степень компенсации искажений зависит в основном от частотных свойств вольтодобавочного трансформатора и настройки регуляторов системы.

Таким образом, существенного улучшения качества электроэнергии в СЭС можно достичь в комплексе, решая задачу с использованием вольтодобавочных устройств.

Как показывает анализ [7], построение силовой схемы вольтодобавочного устройства должно быть выполнено с использованием трех однофазных вольтодобавочных трансформаторов (рис. 1). Они включены в каждую из фаз судовой сети между генератором СЭС и нагрузкой.

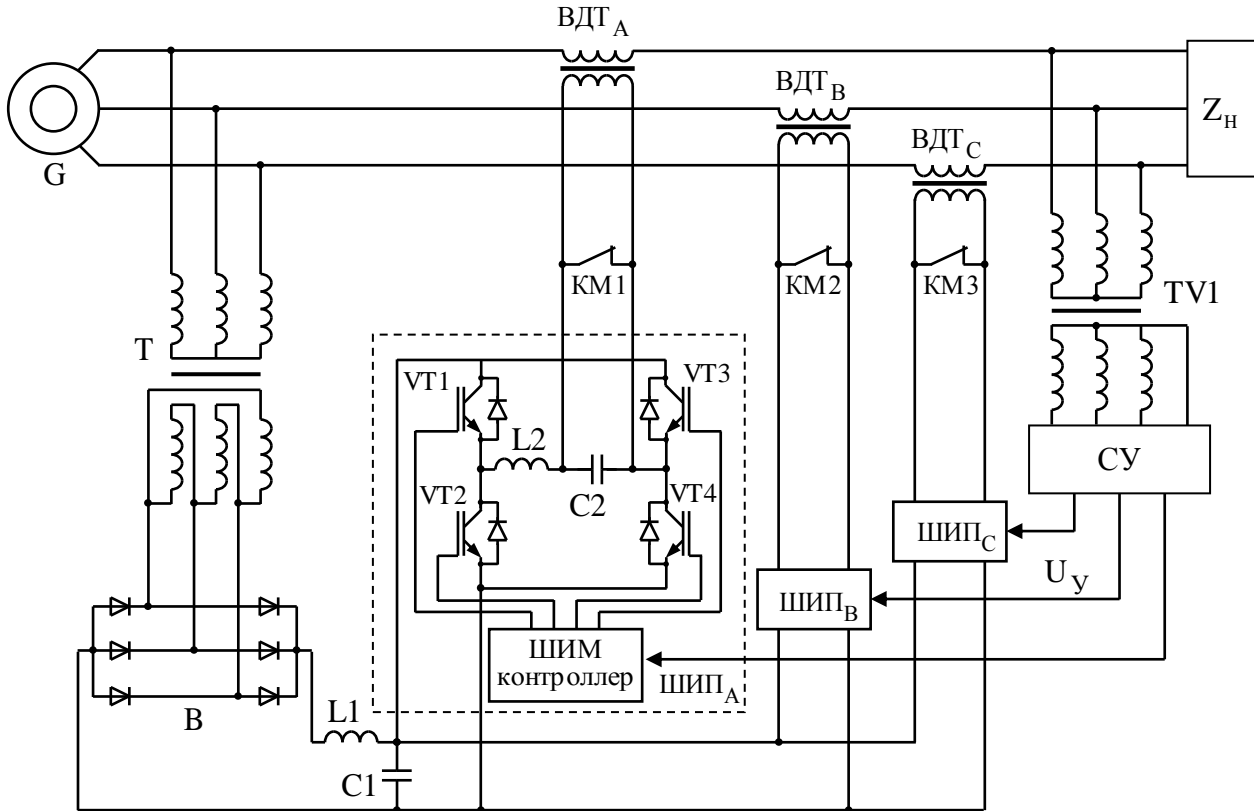


Рис. 1. Функциональная схема вольтодобавочного устройства

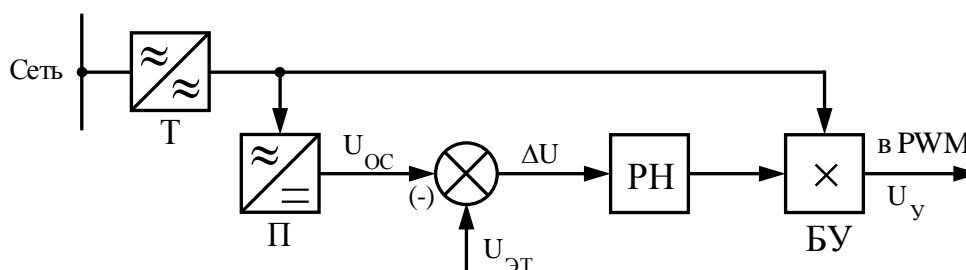
На первичную обмотку трансформаторов подано напряжение с выхода широтно-импульсных преобразователей (ШИП), выполненных по реверсивной мостовой схеме. Питание преобразователей осуществляется от трехфазного мостового выпрямителя – В, через согласующий трансформатор – Т. Он собран по схеме «звезда-треугольник» и подключен к судовой сети. Данная схема включения может позволить снизить уровень нелинейных искажений в сети, за счет их частичной компенсации при наличии в составе СЭС других выпрямителей [5]. Выходное напряжение выпрямителя фильтруется  $L(R)C$ -фильтром, конденсатор которого одновременно служит для сброса энергии при работе устройства в режиме «вольтоотбавки» напряжения. ШИП работает в режиме несимметричной модуляции и формирует на выходе импульсный сигнал в соответствии с управляющим напряжением –  $U_y$ . Последнее поступает на вход ШИМ-контроллера от системы управления (СУ). С помощью фильтра  $L_2C_2$  выходной сигнал преобразователя фильтруется и поступает на первичную обмотку вольтодобавочного трансформатора. Параллельно обмотке включен силовой контакт контактора КМ, шунтирующий ее в случае выхода из строя преобразователя. При этом вольтодобавочный трансформатор переводится в режим трансформатора тока, сохраняя тем самым работоспособность СЭС. Управление контактором обеспечивает система защиты преобразователя.

Для контроля напряжения в судовой сети и обеспечения работы системы управления в схеме использован трехфазный трансформатор –  $TV1$ . Его обмотки включены по схеме «звезда-звезда с нулевым выводом», что позволяет контролировать фазные напряжения сети.

Нулевой вывод трансформатора может быть соединен с нулевой точкой обмотки статора генератора при ее включении в «звезду».

В качестве  $Z_H$  при исследованиях могут быть использованы активная, активно-индуктивная, асинхронная, симметричная, несимметричная, нелинейная нагрузки и их сочетания.

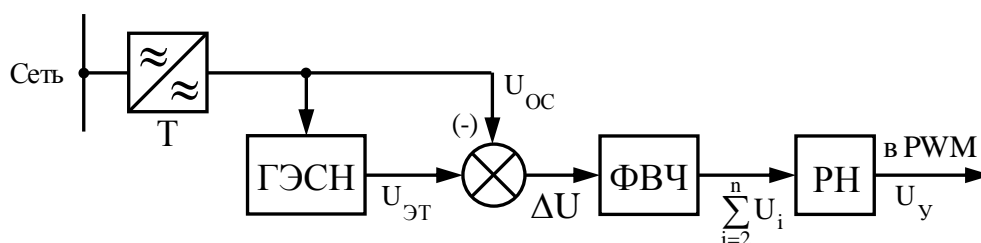
Блок-схема системы управления компенсацией провалов и всплесков, а также несимметрии напряжения, выполненная на базе сигналов постоянного тока, показана на рис. 2.



**Рис. 2. Блок-схема одного канала системы управления компенсацией провалов (всплесков) и асимметрии напряжения на постоянном токе**

Сигнал пропорциональный фазному напряжению сети, снимаемый с измерительного трансформатора, преобразуется преобразователем – П в постоянное напряжение и сравнивается с эталонным напряжением  $U_{эт}$ , соответствующим номинальному фазному напряжению сети. Сформированное на выходе блока сравнения отклонение поступает на регулятор напряжения РН, где усиливается и преобразуется в соответствии с его передаточной функцией. Выходной сигнал регулятора поступает на блок умножения – БУ, где умножается на синусоидальное напряжение соответствующей фазы, в результате чего формируется сигнал управления –  $U_y$ .

На рис. 3 представлена блок-схема системы управления, выполненная на переменном токе.



**Рис. 3. Блок-схема системы управления на переменном токе**

Она является универсальной и может быть использована как для компенсации нелинейных искажений, так и для компенсации провалов (всплесков) и асимметрии напряжения сети.

Напряжение обратной связи –  $U_{ос}$ , поступающее с измерительного трансформатора Т, сравнивается с эталонным напряжением –  $U_{эт}$ , которое формирует генератор эталонного синусоидального напряжения (ГЭСН). Его выходной сигнал синхронизирован с сетью по частоте и имеет постоянную амплитуду [8]. Сигнал рассогласования –  $\Delta U$  будет содержать отклонение основной гармоники сетевого напряжения (50 Гц) от номинального значения, а также суммарный сигнал высших гармоник, присутствующих в сети. Для управления системой компенсации нелинейных искажений из общего сигнала, с помощью фильтра высоких частот – ФВЧ, выделяется сумма высших гармоник. Этот сигнал поступает на вход регулятора напряжения – РН, выходной сигнал которого управляет работой ШИП.

При управлении системой компенсации провалов (всплесков) и асимметрии напряжения сети вместо ФВЧ используется фильтр низких частот ФНЧ.

Для исследования разработанных устройств были построены их модели и проведено моделирование переходных процессов. Моделирование проводилось в пакете прикладных программ *Matlab Simulink*. Модель силовой части системы вольтодобавки показана на рис. 4.

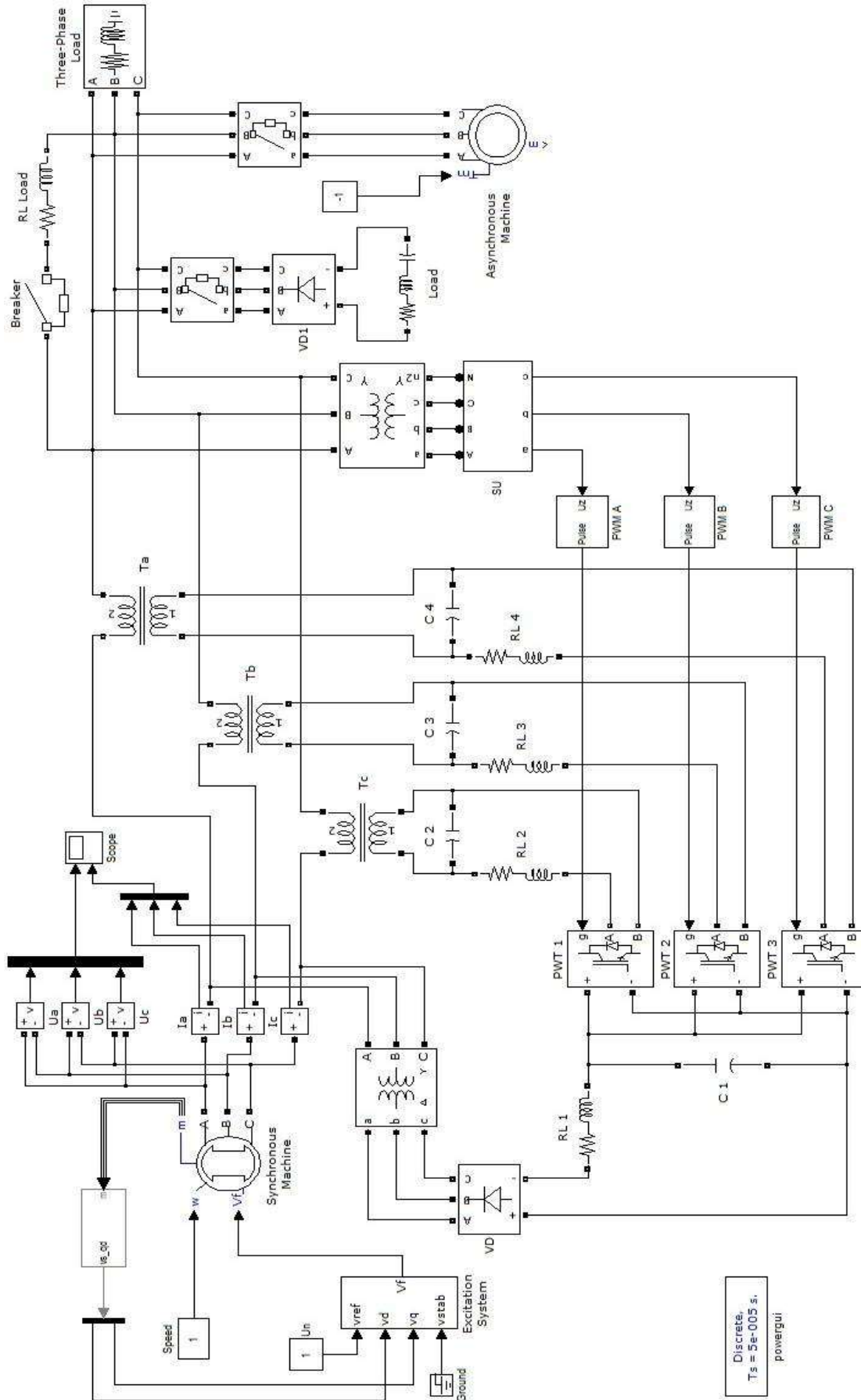
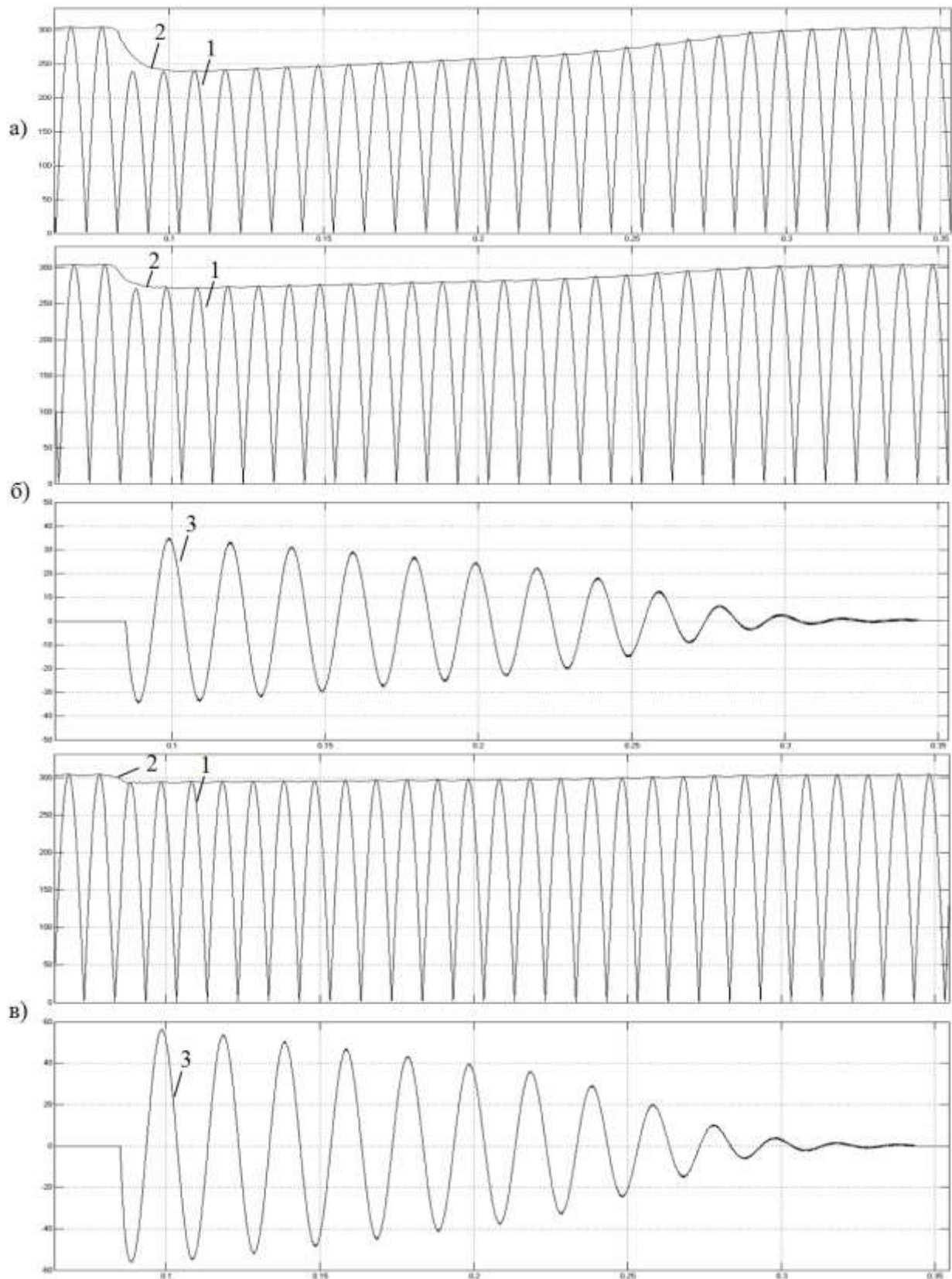


Рис. 4. Модель силовой части трехфазного вольтдобавочного устройства





**Рис. 5.** Диаграммы переходных процессов при прямом пуске асинхронного двигателя:  
 а – без устройства компенсации провалов напряжения; б, в – с устройством компенсации;  
 1 – модуль напряжения на нагрузке; 2 – огибающая напряжения; 3 – напряжение вольтодобавки

За основу была взята модель синхронной машины с демпферной обмоткой – *Synchronous Machine* с постоянным входным параметром угловой частоты вращения, а также стан-

дартный блок *Excitation System*, который является моделью системы возбуждения синхронной машины. К выходам генератора подключена измерительная система, с помощью которой можно определить значения линейных напряжений и фазных токов сети. В качестве симметричной нагрузки взят блок трехфазной последовательной активно-индуктивной нагрузки, по мощности соизмеримой с мощностью генератора. Через блок Breaker в модели может подключаться активно-индуктивная нагрузка, трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный неуправляемый выпрямитель с *RLC* нагрузкой на выходе. Питание вольтодобавки обеспечивает трехфазный трансформатор напряжения с выбранной в параметрах модели схемой «звезда-треугольник». К его выходу подключен трехфазный выпрямитель с Г-образным фильтром, собранным из двух моделей цепей: *RL-Branch* и *C-Branch*. Широтно-импульсные преобразователи (*PWT1-PWT3*) собираются на базе модели *Universal Bridge*. В их параметрах задается количество плечей и базовые элементы – *IGBT* транзисторы с обратными диодами. Вход «g» служит для управления ключами, на этот порт поступают четыре последовательности импульсов от *PWM*-модуляторов.

К выходам ШИП подключаются фильтры, собранные таким же образом, как и предыдущий. Параллельно конденсатору фильтра включена первичная обмотка вольтодобавочного трансформатора, а вторичная включается в соответствующую фазу сети.

Таким образом, приведенная модель позволяет, используя различные варианты систем управления и нагрузок, произвести моделирование работы СЭЭС в переходных режимах, а также оценить установившиеся значения параметров электроэнергетики судовой сети.

Для исследования системы вольтодобавки было произведено ее моделирование в режиме компенсации провалов напряжения сети при пуске асинхронного двигателя соизмеримой мощности. При моделировании был использован синхронный генератор мощностью 100 кВт и двигатель мощностью 30 кВт напряжением 400 В, частотой 50 Гц.

На диаграмме рис. 5, а представлен переходный процесс прямого пуска электродвигателя для системы управления на переменном токе, с использованием ГЭСН (рис. 3). Провал напряжения в первый момент пуска составил 23% от номинального напряжения сети. По мере разгона двигателя напряжение в сети увеличивается и, при достижении двигателем критического скольжения ( $t \approx 0,25$  с), быстро возрастает до номинального значения.

Включение устройства вольтодобавки позволяет снизить величину провала напряжения, в зависимости от коэффициента усиления регулятора. Как видно из диаграмм рис. 5, б, в, полученных для коэффициентов усиления 10 и 40, величина максимального провала напряжения составляет 12,8% и 7,8%, а достижение допустимого, для установившегося режима, отклонения ( $\pm 2,5\%$ ) происходит через 0,22 с и 0,16 с соответственно.

Аналогичное моделирование было проведено и для системы управления, построенной на постоянном токе (рис. 2). Его результаты показали, что система вольтодобавки обладает меньшим быстродействием, поэтому величина максимального провала и его длительность несколько больше.

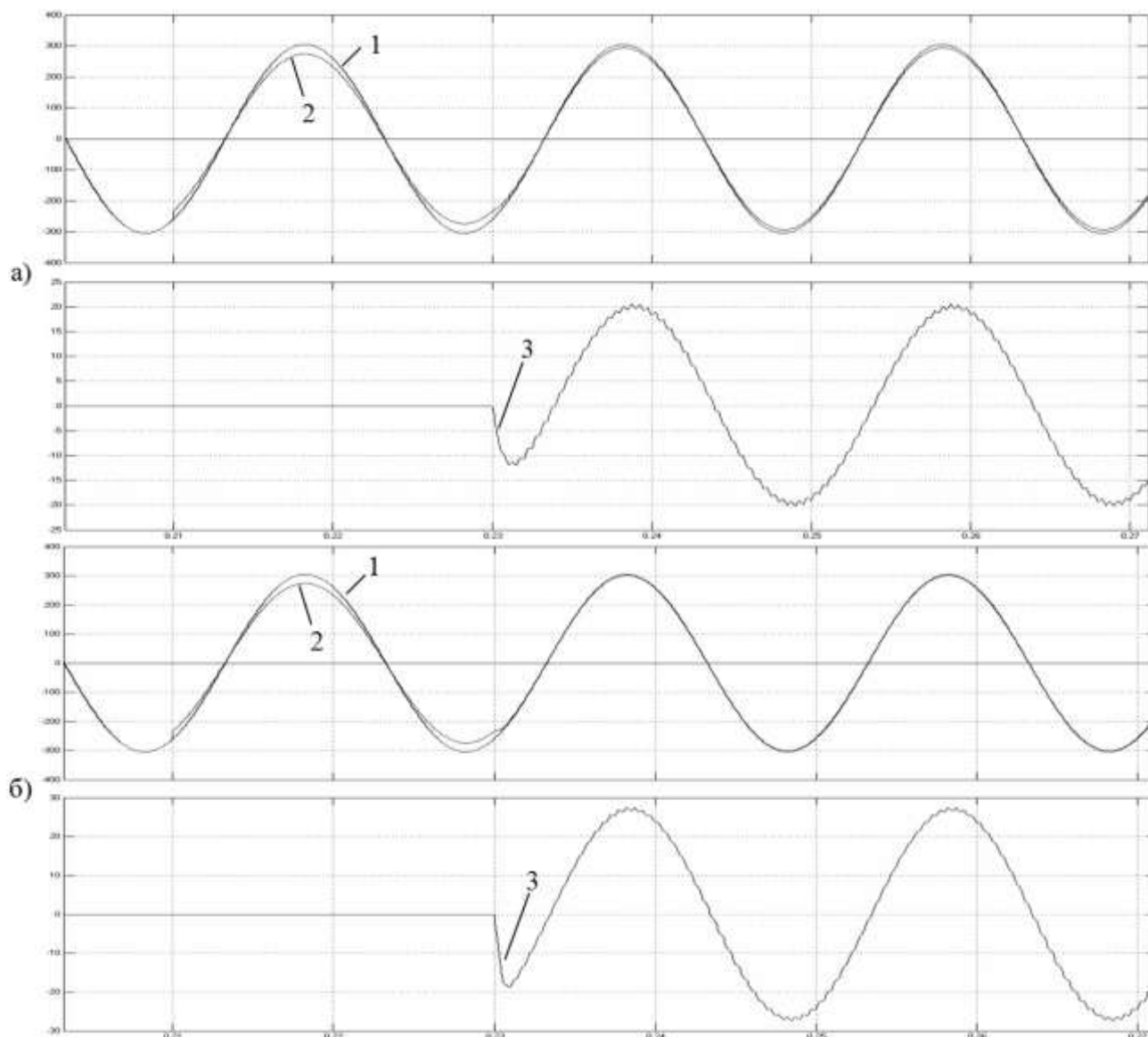
Результаты моделирования устройства вольтодобавки в режиме компенсации асимметрии с СУ на переменном токе представлены на рис. 6. Здесь, в момент времени  $t_1 = 0,21$  с в сеть включалась однофазная нагрузка, что приводило к отклонению напряжения примерно на 10%. В момент времени  $t_2 = 0,23$  с вступала в действие система компенсации, за счет чего напряжение в «просевшей» фазе поднималось. Величина установившейся ошибки составила 3,6 и 1,0% для коэффициентов усиления регулятора 10 и 40 соответственно. Такая большая асимметрия вводилась с целью более наглядного визуального представления работы системы. На самом деле реальная величина асимметрии значительно меньше.

Моделирование устройства с системой управления на постоянном токе дало результаты, аналогичные описанным ранее, для случая компенсации провалов напряжения.

Моделирование вольтодобавочных устройств в режиме компенсации всплесков напряжения и вольтоотбавки при компенсации асимметрии практически полностью совпадают с результатами, описанными ранее.

Для моделирования системы компенсации нелинейных искажений в качестве нелинейного потребителя был использован трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой на выходе.

Результаты моделирования иллюстрируются диаграммами, представленными на рис. 7.



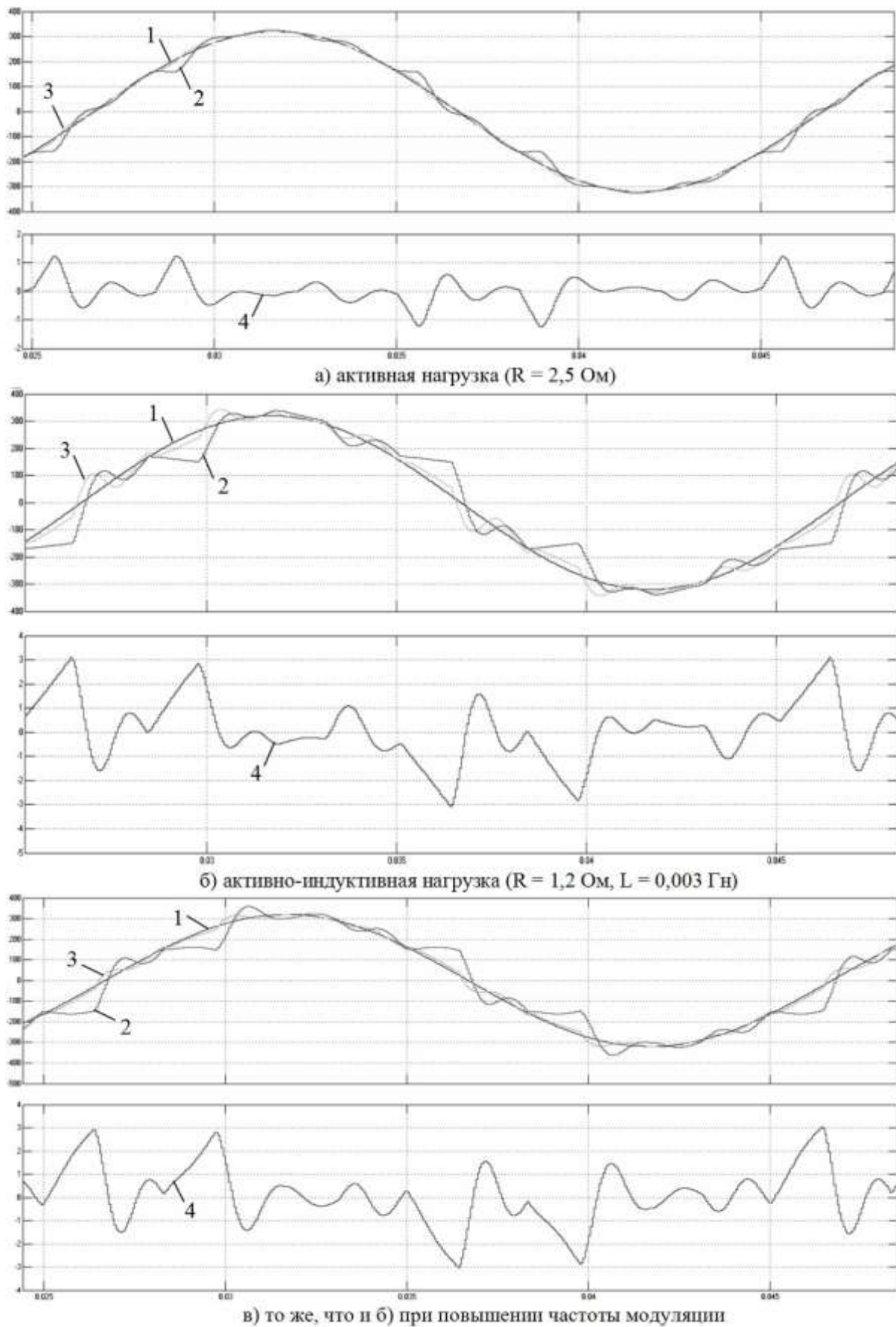
**Рис. 6. Диаграммы переходных процессов при включении однофазной нагрузки:**

*а* – при коэффициенте усиления регулятора напряжения 10;

*б* – при коэффициенте усиления регулятора напряжения 40;

*1* – номинальное напряжение сети; *2* – напряжение на нагрузке; *3* – напряжение вольтодобавки

Степень искажения напряжения сети регулировалась за счет изменения величины и характера нагрузки, которая была соизмерима с мощностью генератора. Из диаграмм видно, что после включения компенсации высших гармоник, напряжение сети становится более синусоидальным (кривая 3). Нелинейные искажения уменьшаются в 3–5 раз. Анализ диаграмм на рис. 7, *а* и на рис. 7, *б* показывает, что с увеличением нагрузки напряжение рассогласования растет, однако степень компенсации снижается. Сравнивая рис. 7, *б* и рис. 7, *в* видно, что увеличение несущей частоты модуляции ШИП увеличивает степень компенсации нелинейных искажений.



**Рис. 7. Результаты моделирования системы компенсации нелинейных искажений:**  
 1 – эталонное напряжение; 2 – напряжение сети до компенсации;  
 3– напряжение сети после компенсации; 4 – напряжение  $U_\gamma$

При моделировании устройства компенсации искажений напряжения их величина была сильно завышена, как и при моделировании асимметрии, для лучшего визуального представления работы устройства.

Результаты проведенных исследований и моделирования показали, что использование вольтодобавочных устройств позволяет повысить качество электроэнергии в судовых (и других автономных) электростанциях, в отношении уменьшения провалов и всплесков напряжения, его асимметрии, а также снижения уровня высших гармоник. С точки зрения быстродействия и точности работы устройств вольтодобавки предпочтение следует отдать системам управления, построенным с использованием сигналов переменного тока. Разработанные модели могут быть использованы для выбора параметров элементов вольтодобавочных устройств, с целью их наилучшего использования, а также для оценки их энергетических показателей.

### Библиографический список

1. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. Т. 3. – М., 2008. – 432 с.
2. Качество электрической энергии на судах / В.В. Шейнихович [и др.]: справочник. – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
3. **Коробко, Г.И.** Накопители электроэнергии в стабилизаторах переменного напряжения для специальных судовых потребителей / Г.И. Коробко, С.В. Попов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. 13. Судовая и промышленная энергетика / ФГОУ ВПО ВГАВТ. – Н. Новгород, 2005. С. 54–57.
4. **Жежеленко, И.В.** Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 2000. – 252 с.
5. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Л.: «Судостроение», 1983. – 232 с.
6. **Кириенко, В.П.** Математическая модель трехфазного силового параллельного активного фильтра / В.П. Кириенко, А.И. Чивенков, М.Н. Слепченков // Электрооборудование промышленных установок: Тр. НГТУ / НГТУ. – Н. Новгород, 2005. Т. 49.
7. **Коробко, Г.И.** Анализ построения силовых схем стабилизаторов переменного напряжения (СПН) с широтно-импульсными преобразователями. / Г.И. Коробко, С.В. Попов // Электрооборудование промышленных установок: межвуз. сб. научн. тр. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. С. 25–28.
8. **Коробко, Г.И.** Источник эталонного синусоидального напряжения, синхронизированного с сетью / Г.И. Коробко, С.В. Попов, В.В. Лебедев // 12-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки 2010»: труды конгресса / ННГАСУ. – Н. Новгород, 2011. Т. 2. С. 576–578.

*Дата поступления  
в редакцию 06.02.2012*

**G.I. Korobko, S.V. Popov, V.V. Lebedev, A.S. Makaev**

### **INCREASING OF ELECTRIC POWER QUALITY IN SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS BY MEANS OF VOLT-ADDING DEVICES**

Volga State Academy of Water Transport

The article describes the main parameters of power quality in ship electric power systems and the causes of their deterioration. The analysis of the negative impact of reducing the quality of electricity to work the ship electrical equipment and devices for bettering its characteristics. The possibility of a complex solution to improve the quality of electricity with the help of volt-adding devices. The simulation of transient ship power system, confirming the effectiveness of their use

*Key words:* quality of electric power, ship power system, volt-adding devices, simulation of transient processes.

УДК 621.314

А.С. Плехов<sup>1</sup>, В.Г. Титов<sup>2</sup>, Д.В. Умяров<sup>3</sup>

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГРУЗОВЫХ НАСОСОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

ООО «Энергосбережение»<sup>1</sup>,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>,

ОАО «ЦКБ «ВЫМПЕЛ»<sup>3</sup>

Обсуждаются вопросы чувствительности электротехнической судовой системы к кратковременным нарушениям нормального режима электроснабжения. Реальный запас устойчивости энергетической системы должен обеспечиваться не только системой токовых защит, согласованностью программ работы систем противоаварийной автоматики, но и структурой системы электроприводов, алгоритмом управления ее работы. Предложены технические решения, ограничивающие токи в энергосистеме при пуске грузовых насосов танкера и допускающие динамическое управление реактивной мощностью, генерируемой в судовую сеть, обеспечивающее значения показателей качества электроэнергии в допустимых пределах и устойчивое протекание переходных процессов.

*Ключевые слова:* возмущения в сети электроснабжения; запас устойчивости узла нагрузки; динамическая компенсация реактивной мощности; компенсационный преобразователь частоты; условия режима генерации реактивной мощности.

Известны проблемы проектирования судовой электроэнергетической системы, обусловленные необходимостью ограничения провалов напряжения в сети при пуске мощных асинхронных двигателей, уменьшения потерь электроэнергии и габаритов электроаппаратов, вызванных перетоками реактивной мощности. Настоящая статья посвящена обсуждению одного из подходов к решению этих проблем.

Во всех возможных режимах любой, в том числе судовой, электроэнергетической системы (СЭС) должны выполняться функции:

- генерирование электроэнергии требуемого количества и качества;
- бесперебойное обеспечение потребителей электроэнергией определенного качества и в нужном количестве;
- обеспечение возможности приведения в действие потребителей в соответствии с их назначением.

Обязательными для любой электроэнергетической системы являются установившийся и переходный режимы. Допуская возможность отождествления понятий «переходный режим» и «переходный процесс» (переход), следует иметь в виду, что режим – более широкое понятие и включает в себя множество процессов, в том числе нормальные, аварийные и послеаварийные переходные процессы [1].

Особенностями судовых систем, влияющими на переходные процессы в них, являются:

- отсутствие мощной сети и, следовательно, наличие резкого изменения значений напряжения и частоты тока сети при набросах нагрузки и авариях;
- наличие коротких линий и связанное с этим отсутствие значительных реактивных линий и в то же время наличие относительно больших активных сопротивлений в цепи статора;
- наличие значительно меньших постоянных времени электрических цепей системы и связанных с этим больших скоростей протекания электромагнитных переходных процессов;
- соизмеримость мощностей генераторов и приводов и связанные с этим более тяжелые переходные режимы.

Методы исследования и расчета в зависимости от принятых допущений могут быть различными [2]. Сделаем допущение, что происходят значительные изменения параметров режима при малых изменениях угловой скорости генераторов. Это относится к решению задач динамической устойчивости, точной синхронизации, больших качаний роторов генераторов, токов коротких замыканий, провалов напряжений. Здесь для статорных уравнений генераторов допускается  $s = 0$  и частота в СЭС полагается неизменной.

Основную часть нагрузки СЭС составляют асинхронные двигатели, свойства которых существенно проявляются в характере переходных процессов всего узла нагрузки. Анализ статической устойчивости асинхронных двигателей можно осуществлять на основе статических характеристик. Для построения статической характеристики асинхронного электродвигателя обычно используют упрощенную Г-образную схему замещения, представленную на рис. 1, в которой не учитываются потери активной мощности в стали, а также активные потери в статоре.

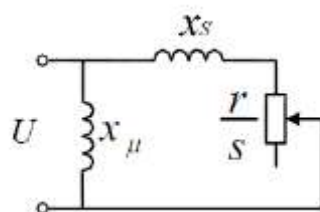


Рис. 1. Схема замещения асинхронного двигателя

Активная мощность, потребляемая двигателем, определяется как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения магнитного потока двигателя. Данная скорость при неизменной частоте питающей сети остается постоянной при любом скольжении двигателя, и поэтому вращающий момент двигателя пропорционален его активной мощности. В относительных единицах вращающий момент двигателя принимается равным потребляемой им активной мощности.

Зависимость активной мощности от скольжения определяется выражением

$$P = I^2 \frac{r}{s} = \frac{U^2}{x_s^2 + (r/s)^2} \cdot \frac{r}{s} = \frac{U^2 r s}{x_s^2 s^2 + r^2}. \quad (1)$$

Эта зависимость дает известную характеристику мощности или вращающего момента двигателя, показанную на рис. 2.

Статическая устойчивость асинхронного двигателя будет осуществляться только в тех случаях, когда рабочие точки располагаются на восходящей части характеристики двигателя, для которой справедливо соотношение

$$\frac{dP}{ds} > 0. \quad (2)$$

Таким образом, критерием статической устойчивости асинхронного двигателя является положительный знак избыточного момента  $dP$  при увеличении скольжения  $s$ .

Следует отметить, что в общем случае, когда  $P_{max} \neq const$ , критерий статической устойчивости асинхронного двигателя имеет вид

$$\frac{dP}{ds} - \frac{dP_{max}}{ds} > 0. \quad (3)$$

Предельный по сохранению устойчивости режим имеет место при  $dP/ds = 0$  и характеризуется максимальной мощностью  $P_m$  (или, так называемым, максимальным опрокидывающим моментом) и критическим скольжением  $s_{кр}$ , что отображено на рис. 2.

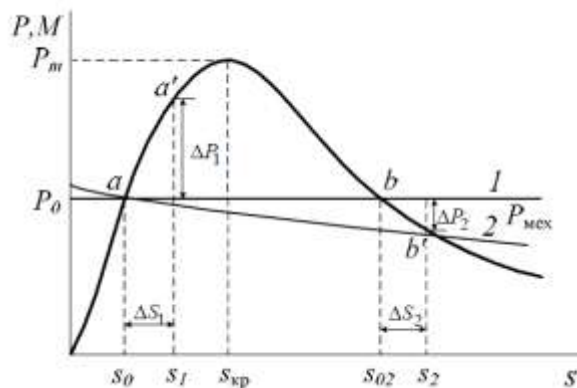
Математически эти параметры режима можно найти, воспользовавшись выражением (1), продифференцировав его по скольжению и приравняв производную к нулю

$$\frac{dP}{ds} = U^2 r \frac{r^2 - x_s^2 s^2}{(r^2 + x_s^2 s^2)^2} = 0. \quad (4)$$

Тогда

$$s_{кр} = \frac{r}{x_s}; \quad (5)$$

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}. \quad (6)$$



**Рис. 2. Статическая характеристика мощности и вращающего момента асинхронного двигателя:**  
 $1 - P_{мех} = \text{const}; 2 - P_{мех} \equiv s$

Зная предельные значения скольжения и мощности по условию сохранения статической устойчивости двигателя, можно определить запасы устойчивости по скольжению и мощности (опрокидывающему моменту) путем расчета коэффициентов запаса по этим параметрам:

$$k_s = \frac{s_{кр} - s_0}{s_0} 100\%; \quad (7)$$

$$k_p = \frac{P_m - P_0}{P_0} 100\%. \quad (8)$$

При нормальном напряжении на выводах двигателя значение максимальной мощности или опрокидывающего момента примерно вдвое превышает номинальную мощность двигателя. С уменьшением напряжения на выводах двигателя значение опрокидывающего момента падает по квадратичной зависимости в соответствии с формулой (4), и при снижении напряжения примерно на 30%, двигатель опрокидывается.

Напряжение, при котором электромагнитная мощность, развиваемая двигателем, становится равной механической мощности ( $P_0 = P_m$ ), называют *критическим*, и его значение, согласно формуле (4), определяется выражением

$$U_{кр} = \sqrt{2P_0 x_s}. \quad (9)$$

Запас устойчивости двигателя по напряжению в этом случае оценивается коэффициентом запаса, вычисляемым по выражению

$$k_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0} 100\%. \quad (10)$$

Обычно двигатели, подключенные непосредственно к шинам напряжения, не зависящего от их режима, работают с большим запасом устойчивости. Иная ситуация возникает, когда двигатель подключается к шинам через внешнее сопротивление  $x_{вн}$  (например, при

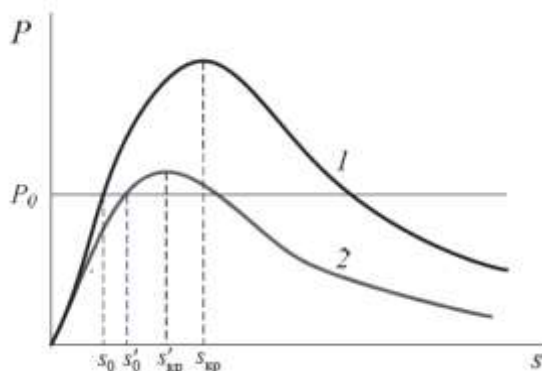


подключении двигателя с помощью кабеля). В этом случае значения критического скольжения и опрокидывающего момента могут быть найдены по формулам:

$$s_{кр} = \frac{r}{x_S + x_{BH}} ; \tag{11}$$

$$P_m = \frac{U^2}{2(x_S + x_{BH})} . \tag{12}$$

Изменение характеристики мощности при учете внешнего сопротивления показано на рис. 3.



**Рис. 3. Влияние внешнего сопротивления на характеристику мощности:**

1 – характеристика без учета внешнего сопротивления;

2 – с учетом внешнего сопротивления

Как известно, асинхронный двигатель может устойчиво работать в диапазоне от  $s_0$  до  $s_{кр}$ . С учетом внешнего сопротивления уменьшается диапазон устойчивой работы и значительно снижается запас устойчивости двигателя. При больших внешних сопротивлениях возможны такие режимы, при которых небольшое понижение напряжения на шинах может привести к нарушению статической устойчивости и опрокидыванию асинхронного двигателя.

Большие возмущения, оказывающие влияние на систему электроснабжения, вызывают существенные и резкие изменения режима работы потребителей. Эти возмущения могут быть как внешними (идущими от энергосистемы), так и внутренними (возникающими в схеме электроснабжения предприятия).

Большие возмущающие воздействия на систему электроснабжения приводят к снижению напряжения на зажимах двигателя и изменению механического момента на валу двигателя.

Предположим, что как изменение напряжения, так и изменение момента происходит скачком в момент времени  $t_0$  и  $t_1$ , как это показано на рис. 4. При отключении двигателя от сети  $U_1 = 0$ . В обоих случаях в момент времени  $t_1$  возмущение прекращается и механический момент и напряжение восстанавливают свои прежние значения.

В нормальном установившемся режиме при напряжении  $U_0$  асинхронный двигатель работает со скольжением  $s_0$ , соответствует точке  $a$  на рис. 2. При резком снижении напряжения до  $U_1$  происходит переход на другую электромагнитную характеристику, расположенную ниже характеристики при  $U_0$ .

Так как электромагнитный момент  $M_{эм}$  становится меньше механического  $M_{мех}$ , то на валу двигателя появляется избыточный момент тормозящего характера. Двигатель переходит в режим постоянного торможения, скольжение двигателя возрастает вплоть до  $s = 1$  и он останавливается (опрокидывается).

Чтобы сохранить устойчивость двигателя, необходимо своевременно восстановить напряжение. Если прежнее значение напряжения будет восстановлено при скольжении  $s_1$ , меньшем чем  $s_{пр}$  в соответствии с рис. 5,  $a$ , то на вал двигателя начнет действовать ускоряю-

щий избыточный момент  $\Delta M_1$ , который вернет двигатель в устойчивый режим работы со скольжением  $s_0$ .

Если восстановление произойдет при скольжении  $s_2$ , которое превышает  $s_{пр}$ , то избыточный момент  $\Delta M_2$  будет иметь тормозной характер, скольжение будет продолжать увеличиваться и двигатель опрокинется.

Аналогичная картина будет наблюдаться при увеличении механического момента на валу асинхронного двигателя.

При резком набросе нагрузки механический момент возрастает до  $M_1$ , превосходящего максимальное значение электромагнитного момента  $M_m$  в соответствии с рис. 5, б. Если механический момент будет уменьшен при скольжении, большем чем  $s_{пр}$ , то торможение двигателя продолжится и он остановится.

Таким образом, как при снижении напряжения, так и при увеличении механического момента, вызванном набросом нагрузки, возмущение должно быть снято до достижения скольжением значения  $s_{пр}$ . Но для практической реализации противоаварийного управления в системах электроснабжения необходимо знать время, в течение которого будет достигнуто то или иное значение скольжения. Для этого следует решить уравнение движения ротора асинхронного двигателя, которое можно записать в виде

$$Tj \frac{ds}{dt} = M_{МЭХ} - M_{ЭМ}, \quad (13)$$

где  $Tj$  – постоянная инерции ротора агрегата «двигатель – механизм».

Решение уравнения движения ротора асинхронного двигателя в форме  $s = f(t)$  дает возможность определить скольжение, соответствующее времени  $t_1$  на рис. 4. Зная это значение, можно судить о возможности сохранения устойчивости двигателя при больших возмущениях.

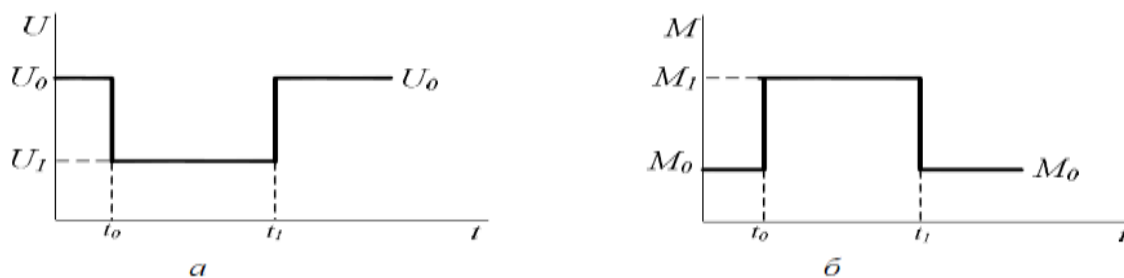


Рис. 4. Изменение напряжения (а) на зажимах и механического момента (б) на валу двигателя

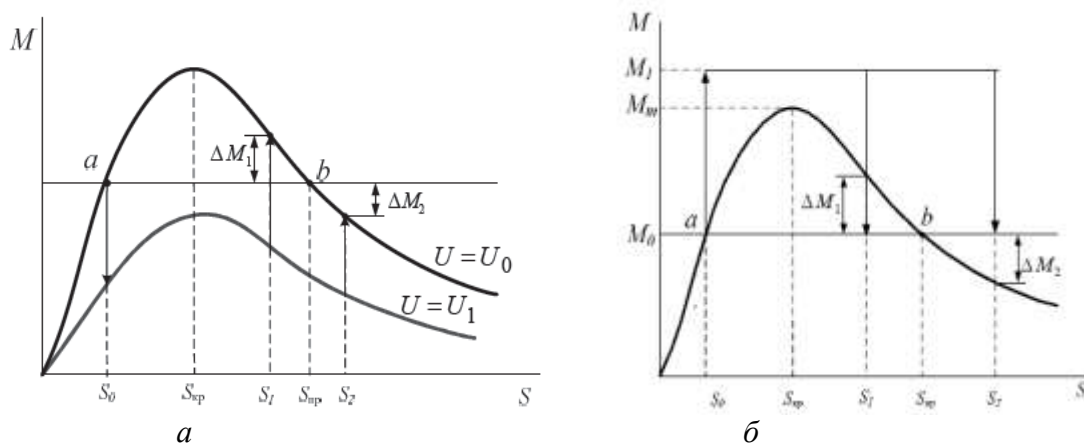


Рис. 5. Изменение режима работы асинхронного двигателя при снижении напряжения (а) и при увеличении механического момента (б)

Пуск двигателей – нормальный переходный процесс, который заключается в переходе двигателей и соответствующих рабочих механизмов из неподвижного состояния ( $\omega = 0$ ) в состояние вращения с нормальной скоростью ( $\omega = \omega_0$ ).

Пуск двигателей рассматривается с точки зрения нормальной работы системы электроснабжения. При расчете пуска двигателей решаются такие основные задачи, как

- определение пускового тока двигателя;
- определение остаточного напряжения на выводах двигателя;
- определение пускового момента;
- оценка возможности группового пуска двигателей.

Во время пуска двигатель должен развивать вращающий момент, необходимый для преодоления момента сопротивления механизма и для создания определенной кинетической энергии вращающихся масс агрегата. При этом он потребляет значительно большее количество энергии, чем в нормальном режиме, что сопровождается увеличением пускового тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному составляет при пуске с короткозамкнутым ротором – 5...8.

Условия пуска обычно разделяют на легкие, нормальные и тяжелые.

При легких условиях требуемый момент в начале вращения составляет 10...40 % от номинального.

К нормальным условиям относятся такие, при которых механизм требует пускового момента, равного 50...75 % от номинального.

К тяжелым условиям относятся такие, при которых требуемый начальный момент составляет 100 % от номинального и выше.

Для облегчения тяжелых условий пуска в некоторых приводах применяются специальные механизмы: центробежные, гидравлические, сцепные и другие муфты, с помощью которых двигатель нагружается лишь после того, как он достигнет нужной скорости вращения и станет развивать соответствующий этой скорости механический момент.

Для управления пуском и ограничения пускового тока могут применяться пускорегулирующая аппаратура и специальные схемы пуска.

Для повышения надежности работы ответственных электроустановок при кратковременных понижениях или отключениях напряжения в питающей сети используется самозапуск электродвигателей.

*Самозапуск* – это процесс восстановления нормального режима работы двигателей после кратковременного отключения источников питания или снижения напряжения. Основная задача самозапуска заключается в том, чтобы не допустить останова ответственных рабочих механизмов и, тем самым, предотвратить нарушение технологического процесса.

Переходный электромеханический процесс при кратковременных нарушениях электроснабжения потребителей с учетом самозапуска может быть условно представлен тремя периодами:

I – групповой выбег, характеризующийся затормаживанием двигателей, увеличением их скольжения. При этом между двигателями, подключенными к общим шинам, происходит переток мощностей за счет запасенной кинетической и электромагнитной энергии;

II – индивидуальный выбег, наступающий после того, как напряжение на общих шинах снизится до 50 % от номинального или даже станет равным нулю. Двигатели при этом начинают затормаживаться в основном в соответствии с индивидуальными механическими характеристиками.

III – самозапуск, наступающий после восстановления напряжения на питающих шинах.

Перерыв питания должен быть таким, чтобы к моменту восстановления питания частота вращения самозапускаемых двигателей была больше нуля, и значение остаточного напряжения на зажимах электропремников должно быть таким, чтобы вращающий момент электродвигателей превышал статический момент сопротивления механизмов.

Необходимо отметить, что в процессе самозапуска и повторного пуска асинхронные

электродвигатели потребляют преимущественно реактивную мощность. Электропотребление выбегающего асинхронного двигателя, сохранившего связь с питающей энергосистемой, также имеет в основном реактивный характер. Реактивный характер тока пуска и самозапуска асинхронных двигателей при преимущественно реактивном характере эквивалентного сопротивления питающей энергосистемы и генераторов собственных нужд приводит к практически максимально возможному снижению напряжения в узлах нагрузки в послеаварийных режимах. Данное обстоятельство лимитирует суммарную мощность приводов, участвующих в повторном пуске и самозапуске, и приводит к увеличению времени раскрутки каждой из ступеней и времени паузы между ступенями повторного пуска. В целом это приводит к увеличению продолжительности послеаварийных режимов. В целях сокращения этой продолжительности можно рекомендовать включение устройств компенсации реактивной мощности на свою максимальную мощность в режимах самозапуска и автоматического повторного пуска.

В практике проектирования применяются методы, основанные на рассмотрении статических режимов и предусматривающие большие запасы устойчивости [3]. Поэтому зачастую при проектировании не прибегают к устройствам динамической компенсации. Однако тенденции к оптимизации массогабаритных показателей оборудования, к увеличению степени использования установленной мощности и к развитию СЭС при модернизации требуют улучшения использования возможностей генерирующего оборудования. В этих целях целесообразно использование быстродействующих систем компенсации реактивной мощности в СЭС переменного тока.

Авторы предлагают использовать компенсирующее устройство в составе двухзвенного преобразователя частоты [4, 5, 6] для обеспечения плавного пуска асинхронных двигателей привода грузовых насосов (рис. 6). По известной схеме приводные асинхронные двигатели грузовых насосов в количестве, например, 12 штук поочередно запускаются через двухзвенный преобразователь частоты с током статора, не превышающем двукратного номинального. После достижения номинальной скорости запускаемый двигатель напрямую подключается к сети СЭС.

В установившемся режиме работы этих механизмов компенсационный выпрямитель (КВ) в звене постоянного тока используется в качестве динамического компенсатора реактивной мощности. При таком режиме работы выход КВ замкнут на дроссель  $L$  через открытые ключи автономного инвертора тока (АИТ), отключенного от двигателя.

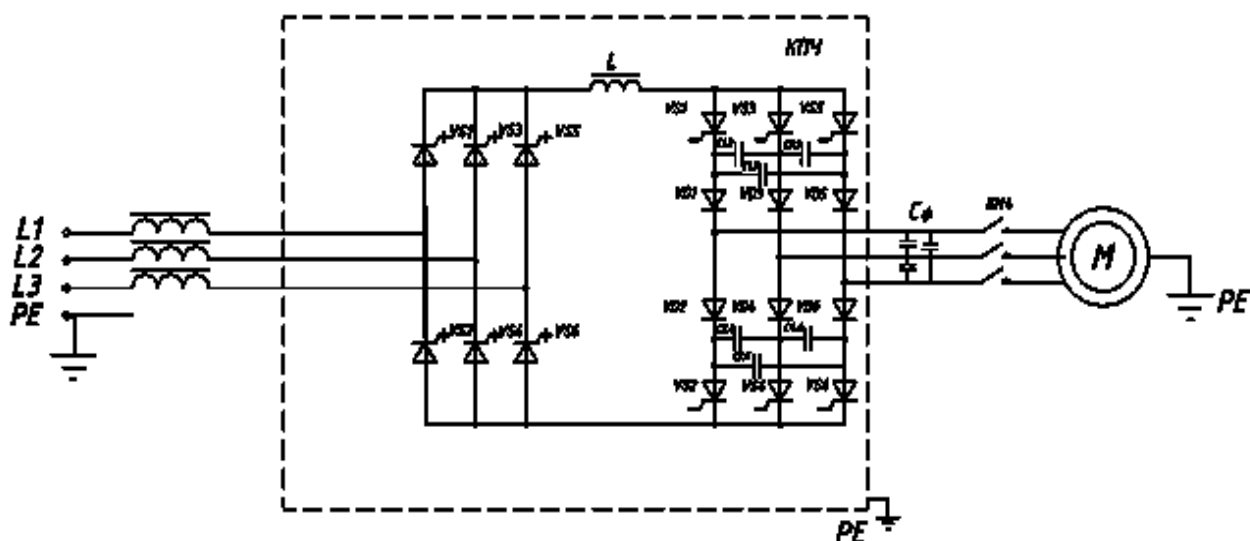


Рис. 6. Принципиальная схема двухзвенного преобразователя частоты

В этой связи необходимо определить полную реактивную мощность устройства

компенсации, которую необходимо генерировать в сеть, а также требования к структуре такого устройства.

Уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за постоянного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствует изменение мгновенного значения напряжения в сети.

Предложены два способа решения этой проблемы [5, 6]:

- использовать раздельное управление углами  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$  вентилей групп, работающих соответственно при естественной и принудительной коммутации;
- применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе посредством изменения угла управления  $\alpha_u$  КВ также и регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменяя степень регулирования  $\gamma_{\text{оѐи}}$ .

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Изменением управления – в координатах  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$  в допустимой для них области можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

Рассмотрим зависимости переменных процесса электропотребления, характерные для первого технического решения.

Реактивная мощность, генерируемая компенсационным выпрямителем в сеть, будет:

$$Q_{\text{АКВ}} = m \cdot \frac{U}{2} \cdot I \cdot (\sin a_e + \sin a_u) = \frac{S}{2} \cdot (\sin a_e + \sin a_u). \quad (14)$$

Потребляемая электроприводом активная мощность при углах управления  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$ :

$$P_{\text{АКВ}} = m \cdot \frac{U}{2} \cdot I \cdot (\cos a_e + \cos a_u) = \frac{S}{2} \cdot (\cos a_e + \cos a_u). \quad (15)$$

Разделим уравнения (14) и (15) на полную мощность, получив относительные значения активной и реактивной мощностей:

$$Q'_{\text{АКВ}} = \frac{1}{2} \cdot (\sin a_e + \sin a_u), \quad (16)$$

$$P'_{\text{АКВ}} = \frac{1}{2} \cdot (\cos a_e + \cos a_u). \quad (17)$$

Выражая из (17)  $a_e$  и подставляя в (16), получаем:

$$Q'_{\text{АКВ}} = \frac{1}{2} \cdot (\sin(\arccos(2P'_{\text{АКВ}} - \cos a_u)) + \sin a_u). \quad (18)$$

Полученное выражение (18) позволяет:

- при заданном значении относительной активной мощности и требуемой реактивной мощности вычислить угол коммутации  $a_u$ ;
- при заданном значении относительной активной мощности и определенном угле коммутации вычислить генерируемую реактивную мощность.

Однако для оптимального использования компенсационного выпрямителя необходимо произвести вычисление угла управления, при котором достигается максимально возможная генерация реактивной мощности. Для этого, по формуле (18), задаваясь относительным значением активной мощности  $P'_{\text{АКВ}}$  от 0, до 1, с шагом 0,1 построим серию графиков  $Q'_{\text{АКВ}}$ , при изменении  $\alpha_u$  в диапазоне  $(-\pi, \pi/2)$ , которые приведены на рис. 7.

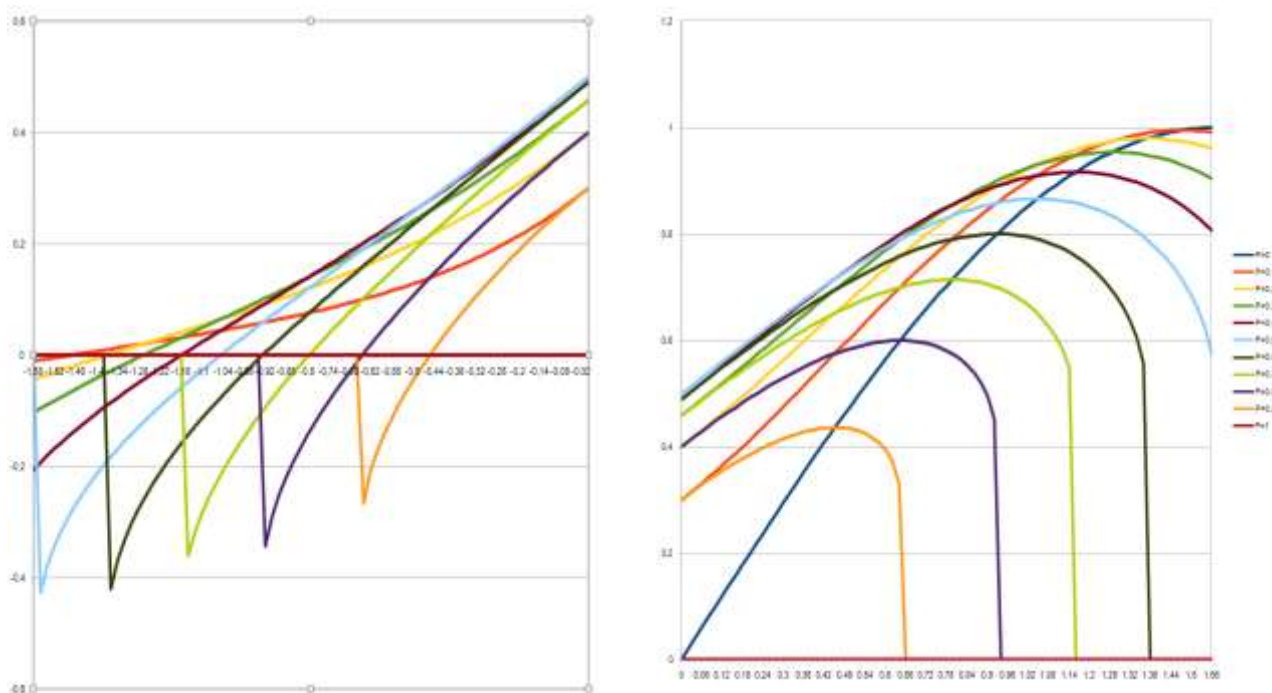


Рис. 7. Зависимости  $Q'_{AKB}$  при изменении  $\alpha_u$  и разных заданных значениях  $P'_{AKB}$

По приведенным графикам можно сделать следующие выводы:

1. Для заданной активной мощности, оптимальный угол коммутации  $\alpha_u$  и максимально генерируемая реактивная мощность определяются по формуле (18) с начальным условием  $P=0$ , поскольку, если через максимумы кривых  $Q'_{AKB}(\alpha_u)/P'_{AKB} = 0 \dots 1$  провести линию, она будет совпадать с кривой при  $P=0$ .

2. Кривые с обеих сторон ограничены определенными значениями  $P$  и  $\alpha_u$ . Это обусловлено тем, что значение аргумента функции  $\arccos()$  в выражении (18) должно находиться в пределах:

$$-1 < (2P'_{AKB} - \cos \alpha_u) < 1. \quad (19)$$

Из этой формулы можно находить угол управления  $\alpha_u$ , при котором происходит максимальная генерация в сеть реактивной энергии емкостного характера. При этом уравнение примет следующий вид:

$$\alpha_u = \arccos(2P'_{AKB} - 1). \quad (20)$$

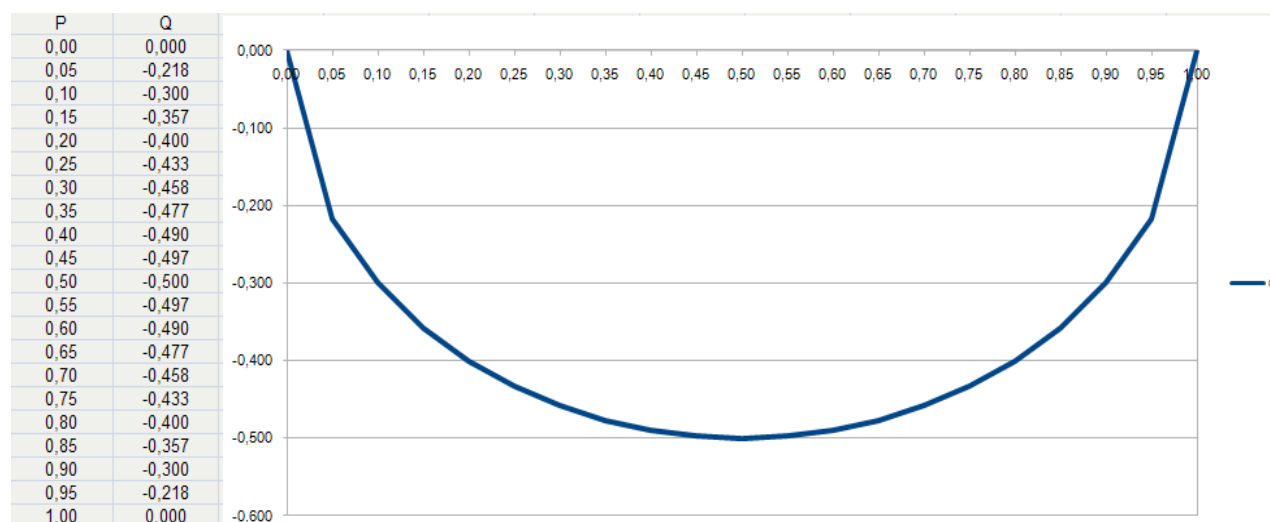
3. При полном диапазоне генерирования реактивной энергии индуктивного характера от 0 до 100% с положительными углами управления  $\alpha_u$ , имеется две области при отрицательных углах управления  $\alpha_u$ . До определенного момента в сеть продолжает генерироваться реактивная энергия индуктивного характера и при дальнейшем увеличении модуля угла  $\alpha_u$  происходит смена знака генерируемой реактивной энергии. Диапазон генерируемой энергии при этом варьируется от 20 до 40%. Подставляя условие (19) в (18), получим численное значение максимально возможного численного значения активной емкостной мощности:

$$Q'_{Cmax} = \frac{1}{2} \cdot (\sin 0 + \sin \alpha_u) = \frac{1}{2} \cdot \sin(\arccos(2P'_{AKB} - 1)). \quad (21)$$

Угол управления  $\alpha_u$ , при котором происходит смена знака, находится путем подстановки в уравнение (18) значений  $P=0$  и  $Q=0$ .

Резервы компенсационного выпрямителя в части генерирования в сеть реактивной

мощности  $Q$  в зависимости от активной мощности, потребляемой рабочей машиной могут характеризоваться диаграммой на рис. 8.



**Рис. 8. Резервы компенсационного выпрямителя в части генерирования в сеть реактивной мощности  $Q$  в зависимости от активной мощности, потребляемой рабочей машиной**

Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор – гармоники тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [6].

Другая использованная авторами возможность – регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора посредством изменения степени ШИМ  $\gamma_{\text{ШИМ}}$  независимо от напряжения на входе инвертора, то есть независимо от напряжения на выходе КВ, изменяемого только углом управления  $\alpha_u$ . Такое управление позволяет обеспечить как заданные момент и скорость вращения двигателя, так и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности.

Задача управления рассматриваемыми системами электроприводов – найти оптимальное соотношение между значениями углов управления  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$ , в первом случае, и угла управления  $\alpha_u$  вентилями компенсационного выпрямителя и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора  $\gamma_{\text{ШИМ}}$ , во втором случае, доставляющие

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{сети}} = \left( \frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right) \left| \begin{array}{l} \alpha_u = \text{var}, \\ \gamma_{\text{ШИМ}} = \text{var}. \end{array} \right. \quad (22)$$

где  $Q_{\text{КВ}}$  и  $P_{\text{КВ}}$  – реактивная и активная мощности компенсационного выпрямителя. В этом случае требуется вычислить такие значения углов управления группами вентилях  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$ , которые обеспечат как необходимое значение выпрямленного напряжения  $U_d$ , так и желаемую величину потребляемой или генерируемой в сеть реактивной мощности. Это достигается не только совместным решением уравнений (16), (17) и (22). При вычислении углов необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание как мощность искажения, так и необходимую величину  $U_d$  при заданной технологической мощности на валу двигателя.

Мощность искажений, потребляемая компенсационным выпрямителем учитывается посредством вычисления  $\text{THD}_{o,e}$  в зависимости от углов управления КВ. Зависимость  $\text{THD}_{o,e}$  от углов управления разными группами вентилях  $\alpha_e, \alpha_u$  в виде результата линейной регрессии, определяется, согласно [7], формулой (24).

$$THD_{o.e} = 7.8958 + 0.1897 \cdot X_1 + 0.1847 \cdot X_2 - 0.0042 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.0009 \cdot X_1^2 + 0.001 \cdot X_2^2 + e, \quad (23)$$

где  $X_1$  – это  $\alpha_e$ , а  $X_2$  – соответствует  $\alpha_u$ .

Для второй структуры с одинаковыми углами управления обеими группами вентиляей  $\alpha_e$  вычисление значения  $THD_{o.e}$  следует производить на основе уравнения

$$THD_{o.e} = 12.85703 - 0.151206 \cdot X_1 + 0.010149 \cdot X_1^2 - 0.000084 \cdot X_1^3, \quad (24)$$

где  $X_1$  – значение углов управления  $\alpha_u$ .

Авторы используют в алгоритмах микропроцессорного управления соотношениями  $\alpha_e$ ,  $\alpha_u$  и  $\alpha_u, \gamma_{\text{ШИМ}}$  опорную таблицу значений  $THD_{o.e}$  в зависимости от углов управления разными группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$  или от переменных  $\alpha_u, \gamma_{\text{ШИМ}}$ , соответственно структуре преобразователя частоты, с последующей интерполяцией для вычисления мощности искажений при определении ограничений на величины переменных управления.

При допущении малости угла перекрытия  $\gamma/2 \cong 0$ , можно считать, что  $\varphi_{(1)} = \alpha$ . Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) КВ будет:

$$Q_{\text{КВ}} = mU I_{1(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_u), \text{ где } \alpha_u < 0. \quad (25)$$

В этом случае требуется вычислить такие значения углов управления группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$ , которые обеспечат как необходимое значение выпрямленного напряжения  $U_d$ , так и желаемую величину потребляемой или генерируемой в сеть реактивной мощности. В этом случае  $THD_{o.e}$  будет функцией двух углов управления согласно (23).

Результаты вычислений  $THD_{o.e}$  для второй схемы ДПЧ с компенсационным преобразователем [6], все вентиляи которого принудительно коммутируются с углом управления  $\alpha_u$ , были аппроксимированы полиномиальным выражением (24). Поскольку АИТ с ШИМ не влияет на потребляемую из сети мощность искажения, то значения  $THD_{o.e}$ , полученные из аппроксимирующего выражения, являются опорными для вычисления мощности искажений, потребляемой компенсационным преобразователем при текущем угле управления  $\alpha_u$ .

Таким образом, решена задача определения резерва при проектировании или ограничений при эксплуатации предложенных схем ДПЧ с компенсационными преобразователями в разрезе предельной генерируемой в сеть реактивной мощности.

Для первой схемы предельная реактивная мощность может быть вычислена согласно зависимости [7]:

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{\text{ycm}}^2 - P_{(1)}^2 - (S_{\text{ycm}} * THD_{o.e}(\alpha_u, \alpha_e))^2}. \quad (26)$$

Для второй схемы с компенсационным преобразователем и АИТ с ШИМ:

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{\text{ycm}}^2 - P_{(1)}^2 - (S_{\text{ycm}} * THD_{o.e}(\alpha_u))^2}. \quad (27)$$

## Выводы

1. Компенсационный преобразователь частоты обеспечивает плавный пуск очередного двигателя в группе электроприводов грузовых насосов с ограничением пускового тока в пределах  $2I_{\text{ном}}$  за время в два раза меньшее времени прямого пуска приводного двигателя грузового насоса.

2. Динамическое управление реактивной мощностью, генерируемой в судовую сеть, обеспечивает значения показателей качества электрической энергии в допустимых пределах.



3. Перечень требований к качеству электропотребления с их количественной оценкой позволяет определить необходимую для их обеспечения полную установленную мощность для управления потоком генерируемой реактивной мощности.

#### Библиографический список

1. **Веретенников, Л.П.** Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы / Л.П. Веретенников. – Л.: Судостроение, 1975. – 375 с.
2. **Веников, В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1970.
3. **Дюдюда, Л.** Силовая электроника в энергосистемах: Статические компенсаторы реактивной мощности // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 6. С. 204–217.
4. Пат. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / Зайцев А.И., Плехов А.С., № 78018; 2008, Бюл. № 31.
5. **Плехов, А.С.** Возможности применения компенсационных преобразователей в звене постоянного тока электроприводов на основе автономного инвертора тока / А.И. Зайцев, А.С. Плехов, В.Г. Титов // Известия ТулГУ. Технические науки: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Вып. 3. Ч. 4. С. 23–35.
6. **Титов, В.Г.** Комплексные технические решения для энергосберегающих электроприводов / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2010. С. 44–53.
7. **Плехов, А.С.** Учет мощности искажений при энергосберегающем управлении электроприводами / А.С. Плехов, В.Г. Титов, К.А. Бинда // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 4(91). С. 203–210.

*Дата поступления  
в редакцию 06.02.2012*

**A.S. Plehov<sup>1</sup>, V.G. Titov<sup>2</sup>, D.V. Umyarov<sup>3</sup>**

#### **ENSURING THE FIRM FUNCTIONING THE SHIP SYSTEM OF THE POWER SUPPLY CARGO PUMP BY MEANS OF COMPENSATION CONVERTER OF THE FREQUENCY**

Ltd "Energy Saving" <sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod State Technical University. RE Alexeeva <sup>2</sup>,  
JSC "Design Bureau" Vympel " <sup>3</sup>

They Are Discussed questions to sensitivity ship system electrical to short breaches of the normal mode of supply. The Real spare to stability of the energy system must be provided not only by system of current protection, consensus of the programs of the functioning the systems automations, but also structure of the system electrical drive, algorithm of control of its functioning. They Are Offered technical decisions, limiting токи in power system when starting cargo pump tanker and allowing dynamic control reactive power, generated in ship network, providing importances of the factors quality to electric powers in possible limit and firm behavior connecting processes.

*Key words:* indignations in network of supply; the spare to stability of the element of the load; the dynamic compensation to reactive power; the compensation converter of the frequency; the conditions of the mode to generations to reactive power.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.746

Д.В. Руцкий, С.Б. Гаманюк, Н.А. Зюбан, В.В. Шмаль, А.Я. Пузиков

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СЛИТКАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Волгоградский государственный технический университет

Приводится исследование распределения неметаллических включений на различных горизонтах слитков с различной геометрией: слитка обычной геометрии массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА и слитка с измененной геометрией донной части (выпуклым поддоном, обеспечивающим повышенный выход годного в поковку) массой 22,5 т стали 38ХНЗМФА. Установлено, что применение слитка новой геометрии не ухудшает качества металла, является технологичным, и в связи с увеличением выхода годного может быть рекомендовано к широкому промышленному внедрению.

*Ключевые слова:* слиток, неметаллические включения, оксиды, сульфиды, оксисульфиды.

Целью данной работы являлось исследование распределения неметаллических включений на различных горизонтах слитков с различной геометрией: слитка обычной геометрии массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА и слитка с измененной геометрией донной части (выпуклым поддоном, обеспечивающим повышенный выход годного в поковку) массой 22,5 т стали 38ХНЗМФА. Для достижения поставленных целей в опытном и сравнительном слитках на четырех горизонтах исследовали количественное распределение и размер включений, по формуле (1) подсчитывалась загрязненность стали неметаллическими включениями:

$$И = \frac{b \sum a_i \cdot m_i}{l}, \quad (1)$$

где  $b$  – цена деления окулярной шкалы при данном увеличении в мкм;

$a_i$  – среднее значение размеров включений в делениях окулярной шкалы;

$m_i$  – количество включений данной группы;

$l$  – длина подсчета в мкм.

Предельную ошибку ( $\sigma_{ox}$ ) загрязненности вычисляли по формуле:

$$\sigma_{ox} = \pm \frac{\sigma \cdot 1,65}{\sqrt{l}}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение распределения на 25 см длины подсчета;

1,65 – постоянный множитель для вероятности 0,9;

$l$  – выбранная длина для подсчета, см.

Ошибка при определении загрязненности составляла 0,0001.

Природу включений определяли металлографическим методом [1], по которому включения изучаются под микроскопом непосредственно на полированном шлифе, вырезанном из металла.

Загрязнённость стали неметаллическими включениями и размер неметаллических включений определяли с помощью метода Л по ГОСТ 1178-70. Оценку загрязнённости стали включениями производили под микроскопом на нетравленных шлифах.

В соответствии с результатами проведенных металлографических исследований в опытном и сравнительном слитках стали 38ХНЗМФА были выявлены следующие типы сложных оксидных включений:  $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$ ;  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ;  $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ;  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ;  $n\text{FeO} \cdot m\text{MnO} \cdot p\text{SiO}_2$ ;  $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ;  $(\text{FeO} \cdot \text{MnO}_2) \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Твердый раствор оксидов железа и марганца  $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$  является наиболее часто встречающимся типом сложных оксидных включений (по результатам идентификации его содержание в общем объеме включений составляет 25%).

Данный тип оксидных включений встречается в виде глобулей (капель) с большим содержанием ( $\text{FeO}$ ) потому, что содержание марганца в стали данной марки (по результатам химического анализа) не превышает 1% [2]. Расположение случайное, наблюдались группы из 3–5 включений.

Признаки включений и химический состав стали указывают на то, что в ней также имеются стекловидные шарообразные включения силикатов. Включения фаялита, то есть - силиката железа ( $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ), содержатся в количестве до 20%.

Следующий, наиболее часто встречающийся тип оксидных включений в слитке, представлен силикатами марганца ( $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ) – тефроит и ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ) – роданит, содержащиеся в слитке в количестве 20 и 15% соответственно. Включения имеют глобулярную форму. Расположение силикатных включений случайное.

В слитке встречаются сложные силикаты железа и марганца ( $n\text{FeO} \cdot m\text{MnO} \cdot p\text{SiO}_2$ ), содержание которых составляет 10 %. Включения имеют случайное расположение. По признакам, описываемым в литературе, при идентификации установлены также ванадиты  $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_3$  в количестве около 1,5.

Предположительно, по химическому составу слитка, в нём могут присутствовать в небольшом количестве (3 %) оксиды хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Наряду с хромитами, были идентифицированы сложные включения, состоящие из хромитов, внедренных в массу твердого раствора  $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$ , их содержание примерно 3 %.

В небольшом количестве (до 0,5 %) выявлено содержание  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Включения  $\text{FeO}$  присутствуют в количестве 1,5%, также в слитке содержатся алюминаты  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , в количестве 0,5%.

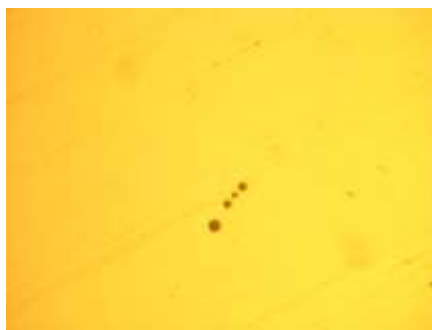
Сульфидная фаза в слитке представлена в виде твердого раствора сульфида железа и марганца. При соотношении марганца и серы, равного примерно 5 %, содержание железа в сульфидах составляет около 3 %. Расположение наблюдалось случайное в виде глобулей.

Оксисульфидная фаза в слитке представлена сложными сульфидами марганца, содержащими оксиды ( $\text{FeO}, \text{MnO}, \text{SiO}_2$ ) и  $\text{FeS}$ .

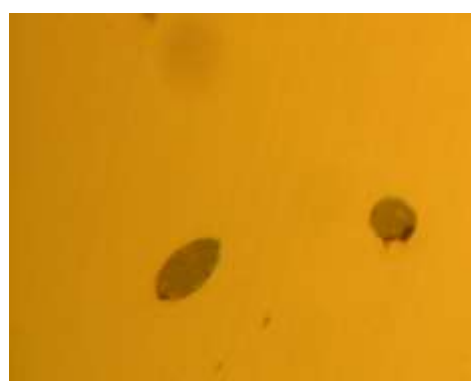
Загрязнённость шлифов оценивали отдельно по кислородным, сульфидным и оксисульфидным включениям.

Идентификация неметаллических включений была проведена в светлом, темном поле и поляризованном свете. При наблюдении неметаллических включений под микроскопом в трех полях зрения определялись форма, цвет, прозрачность, степень анизотропии и расположение неметаллических включений (рис. 1–3).

Таким образом, идентификация неметаллических включений показала, что все включения имеют сложный состав, глобулярную форму, случайное расположение, что оказывает положительное влияние на технологические свойства стали. Так, например, по литературным данным В. Даля, Х. Хенгхтенберга, К. Дюрена оксидные включения сложного состава и сферической формы почти не ухудшают ударную вязкость, сульфидные включения деформируются наиболее легко, как и оксисульфиды [2].



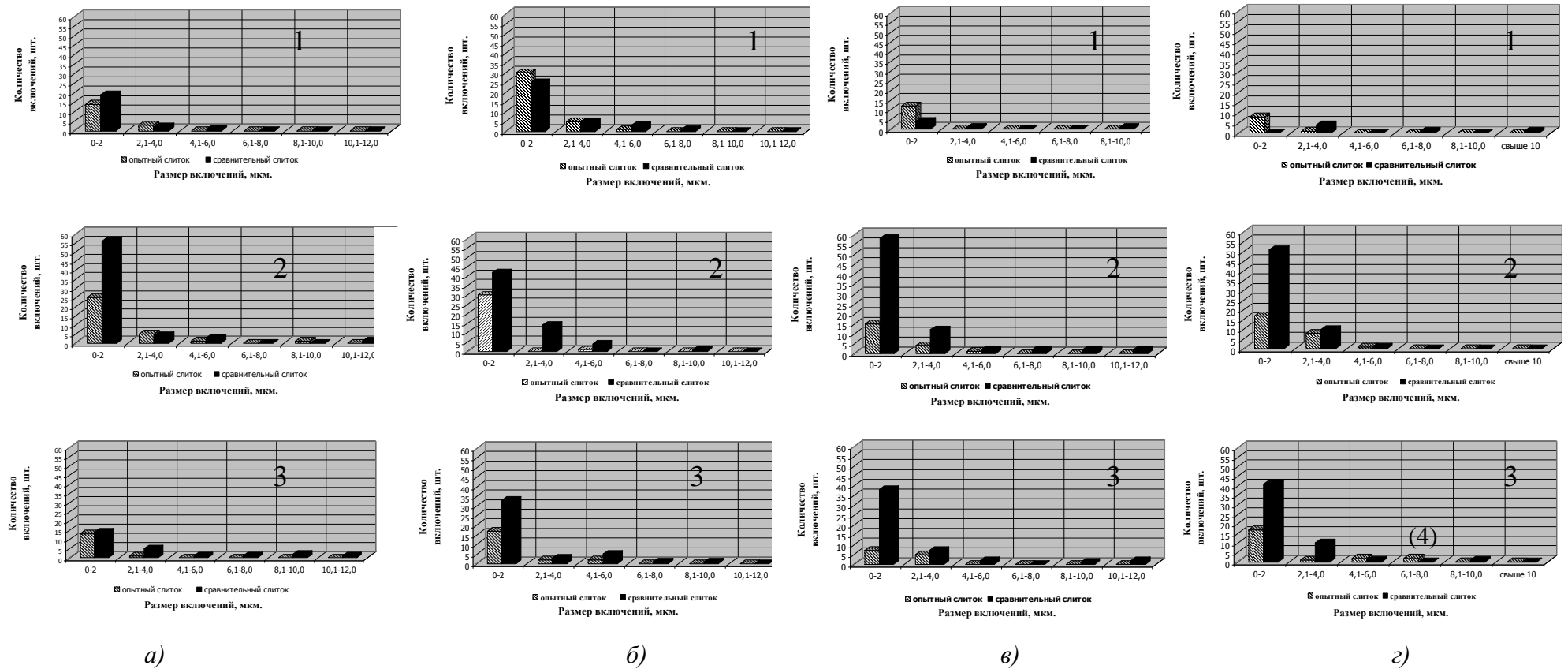
**Рис. 1.** Группа оксидных включений в светлом поле зрения,  $\times 300$



**Рис. 2.** Сульфидные включения в светлом поле зрения,  $\times 300$

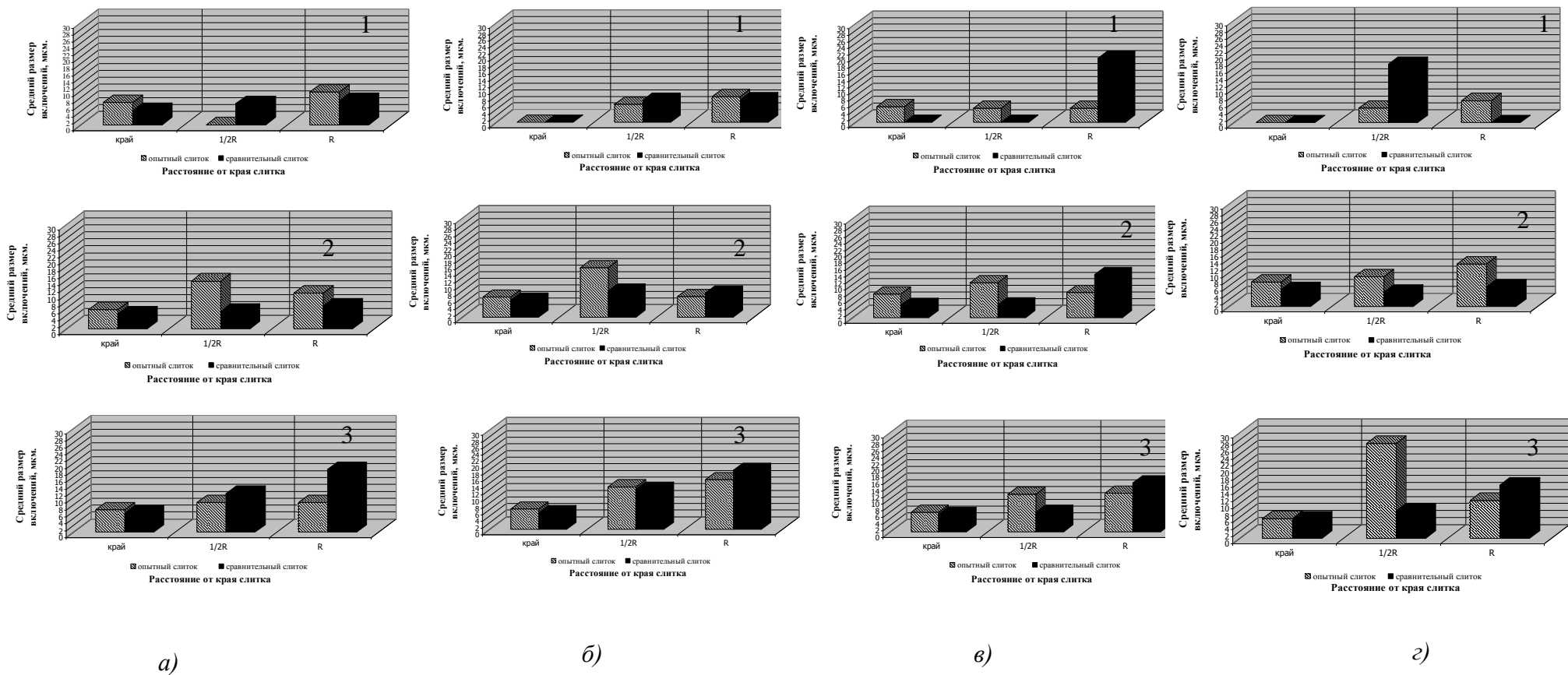


**Рис. 3.** Включения оксисульфидов в светлом поле зрения,  $\times 300$



**Рис. 4. Количественное распределение неметаллических включений по сечению слитка:**

*а* – высота 700 мм от низа слитка; *б* – высота 1100 мм от низа слитка; *в* – высота 1800 мм от низа слитка; *г* – высота 2200 мм от низа слитка;  
 1 – оксиды; 2 – сульфиды; 3 – оксисульфиды



**Рис. 5. Изменение среднего размера неметаллических включений по сечению слитка:**

*a* – высота 700 мм от низа слитка; *б* – высота 1100 мм от низа слитка; *в* – высота 1800 мм от низа слитка; *г* – высота 2200 мм от низа слитка; 1 – оксиды; 2 – сульфиды; 3 – оксисульфиды

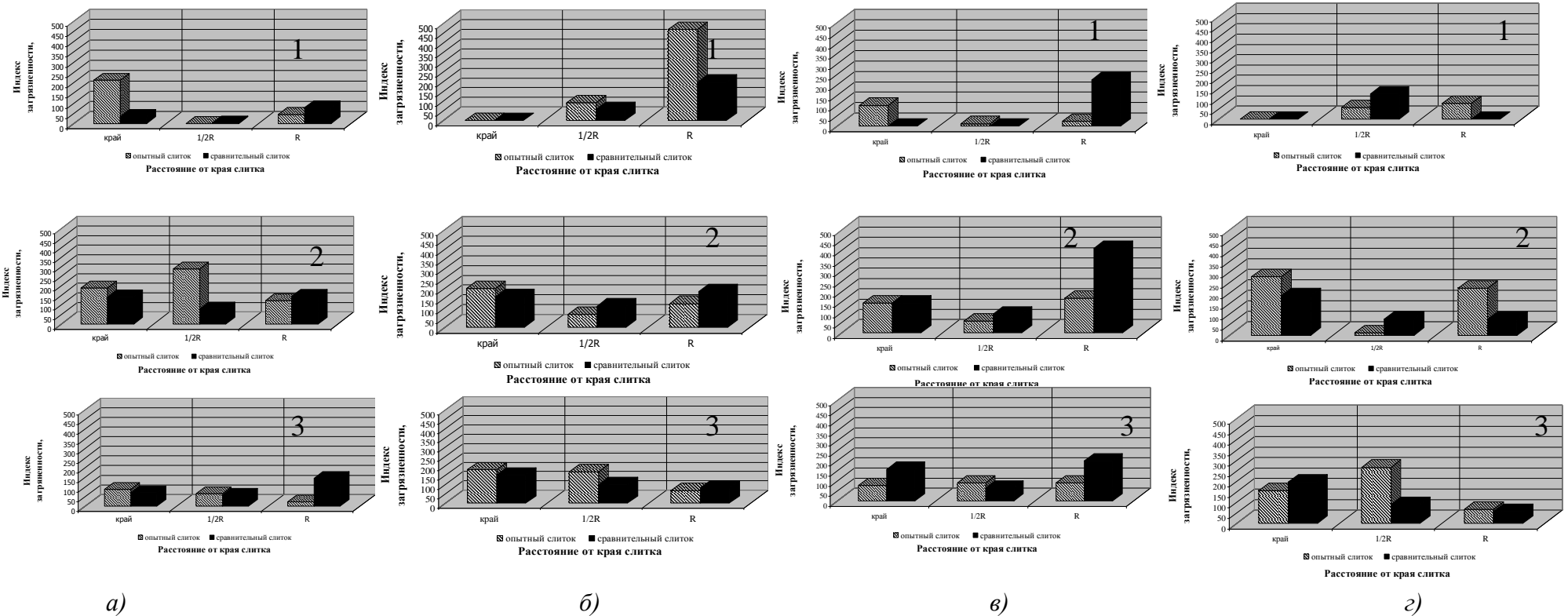


Рис. 6. Индекс загрязненности неметаллическими включениями по сечению:

а – высота 700 мм от низа слитка; б – высота 1100 мм от низа слитка; в – высота 1800 мм от низа слитка; г – высота 2200 мм от низа слитка; слитка; 1 – оксиды; 2 – сульфиды; 3 – оксисульфиды

Анализ литературных данных показал, что существенное влияние на свойства стали, в том числе и технологические, оказывает помимо других параметров, размер неметаллических включений. Различные виды разрушения обусловлены наличием включений разного размера. При хрупком разрушении неметаллические включения опасны лишь как первичный очаг, когда их размер.

Неметаллические включения увеличивают анизотропию механических свойств деформированной стали, особенно показатели пластичности – относительное удлинение и сужение. Неметаллические включения, выходящие на поверхность или залегающие вблизи нее, могут стать очагом усталостной трещины.

В связи с этим в работе проводился сравнительный анализ размеров всех видов неметаллических включений.

Количественное распределение основных видов неметаллических включений представлено на гистограммах (рис. 4).

Как видно из гистограмм, представленных на рис. 4, на всех горизонтах двух слитков преобладают оксидные, сульфидные и оксисульфидные включения размером до 4 мкм. Для опытного слитка характерны включения, максимальный размер которых достигает 4 мкм, тогда как в сравнительном преобладают включения и других размеров. Следует отметить, что в сравнительном слитке количество оксидных включений больше в 3 раза, а оксисульфидных в 2,5–3 раза, чем в опытном.

Распределение среднего размера оксидов, сульфидов и оксисульфидов на различных горизонтах слитка представлено на гистограммах рис. 5.

Средний размер оксидных, сульфидных и оксисульфидных включений в опытном слитке у его поверхности в 1,1–1,3 раза больше, чем в сравнительном. На расстоянии  $1/2R$  слитка размер оксидных включений в сравнительном слитке в 1,2 раза больше, чем в опытном. А сульфидных в 2,5–3 раза меньше, чем в опытном. Размер оксисульфидных включений на  $1/2R$  слитка в 1,3 раза больше, чем в сравнительном.

В центре слитка в сравнительном слитке оксисульфидные включения больше в 1,5–2 раза. Размер включений в обоих слитках с приближением к центру слитка стремится к увеличению.

Результаты оценки загрязненности неметаллическими включениями представлены в виде графических зависимостей, представленных на рис. 6.

В опытном слитке индекс загрязненности оксидами у поверхности слитка в 7 раз больше, на  $1/2R$  в 1,5 раза, чем в сравнительном. Загрязненность опытного слитка сульфидными включениями у его поверхности больше в 1,4 раза, а на расстоянии  $1/2R$  слитка в 1,5 раза меньше, чем в сравнительном. В осевой зоне сравнительного слитка индекс загрязненности сульфидами увеличивается в 1,4 раза. Индекс загрязненности оксисульфидными включениями в сравнительном слитке к центру увеличивается. В обоих слитках наблюдается большая загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями, чем оксидными.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На исследуемых горизонтах опытного и сравнительного слитков преобладают оксидные, сульфидные и оксисульфидные включения размером до 4 мкм.
2. Для опытного слитка характерны включения, максимальный размер которых достигает 4 мкм, тогда как в сравнительном преобладают включения и других размеров.
3. Количество оксидных и оксисульфидных включений в сравнительном слитке в 3 раза больше, чем в опытном.
4. В осевой зоне сравнительного слитка средний размер оксисульфидных включений в 2 раза больше, чем опытном. Размер включений в обоих слитках с приближением к центру слитка стремится к увеличению. Это свидетельствует о том, что диаметр включений больше там, где затвердевание металла идет наиболее медленно.



5. В опытном слитке у его поверхности индекс загрязненности оксидами и сульфидами больше в 7 и 1,4 раз соответственно, чем в сравнительном.

6. Индекс загрязненности сульфидными и оксисульфидными включениями в осевой зоне сравнительного слитка больше в 1,4 раза, чем в опытном.

7. В обоих слитках наблюдается большая загрязненность сульфидными и оксисульфидными включениями, чем оксидными.

Применение слитка новой геометрии не ухудшает качества металла, является технологичным, и в связи с увеличением выхода годного может быть рекомендовано к широкому промышленному внедрению.

#### Библиографический список

1. **Червяков, А.Н.** Металлографическое определение включений в стали / А.Н. Червяков, С.А. Киселев. – М.: Металлургиздат, 1962. – 201 с.
2. **Виноград, М.И.** Включения в стали и ее свойства / М.И. Виноград. – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.01.2012*

**D.V. Rutsky, S.B. Gamanyuk, N. Zyuba, V. Schmal, A. Puzikov**

#### INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN INGOTS OF DIFFERENT GEOMETRY

Volgograd State Technical University

In this article, the authors study the distribution of nonmetallic inclusions at various depths in horizontal ingots with different geometry: the geometry of conventional ingot of the weighing 24.2 tons of steel and 38HN3MFA with altered geometry of the bottom part (convex plate which allows the high yield in forging) a mass of 22.5 tons of steel 38HN3MFA. It is found out that the usage of an ingot of a new geometry does not affect the quality of the metal, it is technological, and due to the increased output of suitable may be recommended for wide spread commercialization.

*Key words:* ingot, non-metallic inclusions, oxides, sulfides, oxysulfides.

УДК 621.74: 669.13

Н.Н. Сафронов, Л.Р. Харисов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА  
СВС-ФЕРРОСИЛИДА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ШИХТЫ**

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Предложен алгоритм оптимизации состава шихты для процесса переработки металлосодержащих дисперсных отходов металлургических и литейных производств. Метод переработки основан на использовании явления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза ферросплавов из композиции дисперсных отходов без использования внешних источников тепла за счет внутренней энергии системы.

*Ключевые слова:* легированный чугун, кремний, коррозия, СВС, шихта, стружка, отходы, оптимизация, коэффициент качества.

Одним из наиболее коррозионно-стойких металлических сплавов в настоящее время является высококремнистый чугун (ферросилид). Он обладает высокой коррозионной стойкостью при повышенных температурах к воздействию концентрированных и разбавленных кислот, растворов щелочей и солей. Ферросилид получил широкое распространение в химическом машиностроении при изготовлении деталей трубопроводной арматуры, центробежных и поршневых насосов. Химическая стойкость ферросилида объясняется образованием на его поверхности пассивной пленки окиси кремния. Традиционные методы электродуговой плавки высококремнистых чугунов предусматривают использование в шихте предварительно прокалённых ферросилиция, чушкового чугуна, стального лома и возврата, что обуславливает достаточно высокую стоимость получаемого сплава. В основе предлагаемого способа получения СВС-ферросилида марки ЧС13 положен самораспространяющийся высокотемпературный синтез [1], который осуществляется с использованием дисперсных отходов заводов ОАО «КАМАЗ».

В данной работе используется следующий качественный состав шихты процесса СВС: кузнечная окалина, силуминовая стружка АК18, графитовая стружка, строительная порошкообразная известь и аммиачная селитра. Количественный состав шихты формируется по отношению к кузнечной окалине и характеризуется следующими параметрами:

$x_1$  – количество смеси алюминиевой стружки и аммиачной селитры в относительном массовом соотношении между собой 1:3,5;

$x_2$  – количество графитовой стружки;

$x_3$  – количество порошкообразной извести;

$x_4$  – количество гранулированного алюминия марки АВ97.

Указанные параметры являются входными контролируемыми факторами, характеризующими состав шихты процесса СВС. Во всех вариантах варьирования контролируемых факторов неизменным оставалось количество силуминовой стружки АК18 на уровне 40% (масс.).

Исследование влияния состава шихты на величину выходного параметра осуществлялось с использованием метода планируемого эксперимента [2]. В результате проведенного исследования с использованием дробного факторного плана была получена линейная аппроксимация функций отклика в заданной области изменения контролируемых факторов, кодированные и именованные значения которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Кодированные\* и именованные значения входных контролируемых факторов

Смесь алюминиевой стружки и аммиачной селитры ( $x_1$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	50%	75%	100%
Графитовая стружка ( $x_2$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	0,5%	0,8%	1,1%
Порошкообразная известь ( $x_3$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	35%	50%	65%
Гранулированный алюминий марки АВ97 ( $x_4$ )	кодированное	-1	0	+1
	именованное	0%	2,5%	5%

\*Кодирование входных контролируемых факторов производилось с помощью формулы преобразования:

$$x_i = \frac{x_{ui} - x_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;

$x_{ui}$  – значение фактора в именованных (натуральных) единицах;

$x_{0i}$  – значение нулевого уровня в именованных единицах;

$\varepsilon_i$  – интервал варьирования в именованных единицах.

Функциями отклика, характеризующими качество СВС-ферросилида, являются коррозионная стойкость ( $y_1$ , г/(м<sup>2</sup>·час), предел прочности при растяжении ( $y_2$ , МПа) и твердость ( $y_3$ , НВ). Соответствующие уравнения, удовлетворяющие критерию адекватности, имеют вид:

кодированные входные контролируемые факторы:

$$y_1 = 9,42 - 2,36x_1 + 1,79x_2; \quad (2)$$

$$y_2 = 364 + 6,38x_1 + 20,13x_2 + 67,63x_4; \quad (3)$$

$$y_3 = 361 + 43,88x_1 - 5,38x_2 + 26,63x_4; \quad (4)$$

именованные входные контролируемые факторы:

$$y_1 = 11,73 - 0,09x_1 + 5,97x_2; \quad (5)$$

$$y_2 = 224 + 0,26x_1 + 67,08x_2 + 27,05x_4; \quad (6)$$

$$y_3 = 217,08 + 1,76x_1 - 17,93x_2 + 10,65x_4. \quad (7)$$

Полученные функции отклика неоднозначно как в количественном, так и в качественном отношении определяются составом шихты процесса СВС. В этой связи для оптимизации качества СВС-ферросилида предлагается использовать его интегральный коэффициент [3]:

$$K_x = \sum_{i=1}^n P_i \cdot X_i, \quad (8)$$

где  $P_i$  – значение показателя качества СВС-ферросилида;

$X_i$  – коэффициент весомости показателя качества СВС-ферросилида;

$n$  – число показателей.

Расчет значения показателя качества СВС-ферросилида производится по следующим формулам:

$$P_i = \frac{y_i - y_{i\min}}{y_{i\max} - y_{i\min}}, \quad (9)$$

$$P_i = \frac{y_{i\max} - y_i}{y_{i\max} - y_{i\min}}, \quad (10)$$

где  $y_i$  – величина  $i$ -го качества СВС-ферросилида;

$y_{i\max}$  – максимальная величина  $i$ -го качества СВС-ферросилида (2-7);

$y_{i\min}$  – минимальная величина  $i$ -го качества СВС-ферросилида (2-7).

Формула (9) применяется для прямых показателей, а формула (10) – для обратных. Прямыми являются показатели, с ростом значений которых конечный результат улучшается, а обратными – показатели, рост которых ухудшает конечный результат. Предел прочности при растяжении и твёрдость СВС-ферросилида являются прямыми показателями, а коррозионная стойкость – обратный показатель качества.

Отдельные показатели неравномерно влияют на уровень качества СВС-ферросилида. Для установления приоритетов показателей качества ( $X_i$ ) в соответствии с методом анализа иерархий формируется матрица попарных сравнений (табл. 2). Порядок матрицы определяется числом показателей.

Таблица 2

**Общий вид матрицы попарных сравнений для расчёта коэффициентов весов**

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	Оценки компонент собственного вектора по строке	Нормализация результата
$P_1$	1	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{w_1}{w_3}$	$e_1 = \sqrt[3]{\frac{w_1 \cdot w_1 \cdot w_1}{w_1 \cdot w_2 \cdot w_3}}$	$X_1 = \frac{e_1}{\sum_{i=1}^3 e_i}$
$P_2$	$\frac{w_2}{w_1}$	1	$\frac{w_2}{w_3}$	$e_2 = \sqrt[3]{\frac{w_2 \cdot w_2 \cdot w_2}{w_1 \cdot w_2 \cdot w_3}}$	$X_2 = \frac{e_2}{\sum_{i=1}^3 e_i}$
$P_3$	$\frac{w_3}{w_1}$	$\frac{w_3}{w_2}$	1	$e_3 = \sqrt[3]{\frac{w_3 \cdot w_3 \cdot w_3}{w_1 \cdot w_2 \cdot w_3}}$	$X_3 = \frac{e_3}{\sum_{i=1}^3 e_i}$

Для перевода качественной информации в числа в методе анализа иерархий используется вербально-числовая шкала отношений [3], которая позволяет ставить в соответствие степеням предпочтения одного показателя над другим определённые числа.

Сравнивая два показателя по степени их влияния на уровень качества, эксперт в соответствии с вербально-числовой шкалой отношений присваивает им целые числа от 1 до 9 или обратные значения этих чисел. Если элемент в табл. 2 слева важнее, чем элемент сверху, то в ячейку заносится отношение, например,  $\frac{3}{1}$ ; в противном случае – обратное число  $\frac{1}{3}$ . Из анализа литературных данных [4], очевидно, что качество ферросилида определяется его коррозионной стойкостью.

Отливки из ферросилидов работают в условиях концентрированных и разбавленных кислот, растворов солей, щелочей до температуры 473 К. Отливки представляют собой простые по конфигурации детали центробежных насосов, компрессоров, трубопроводов, арматуры и другие детали химической аппаратуры к которым не предъявляются повышенные требования по прочностным показателям. Поэтому коррозионная стойкость сплава явно важнее прочности сплава и по своей значительности абсолютно превосходит твердость ферросилида.

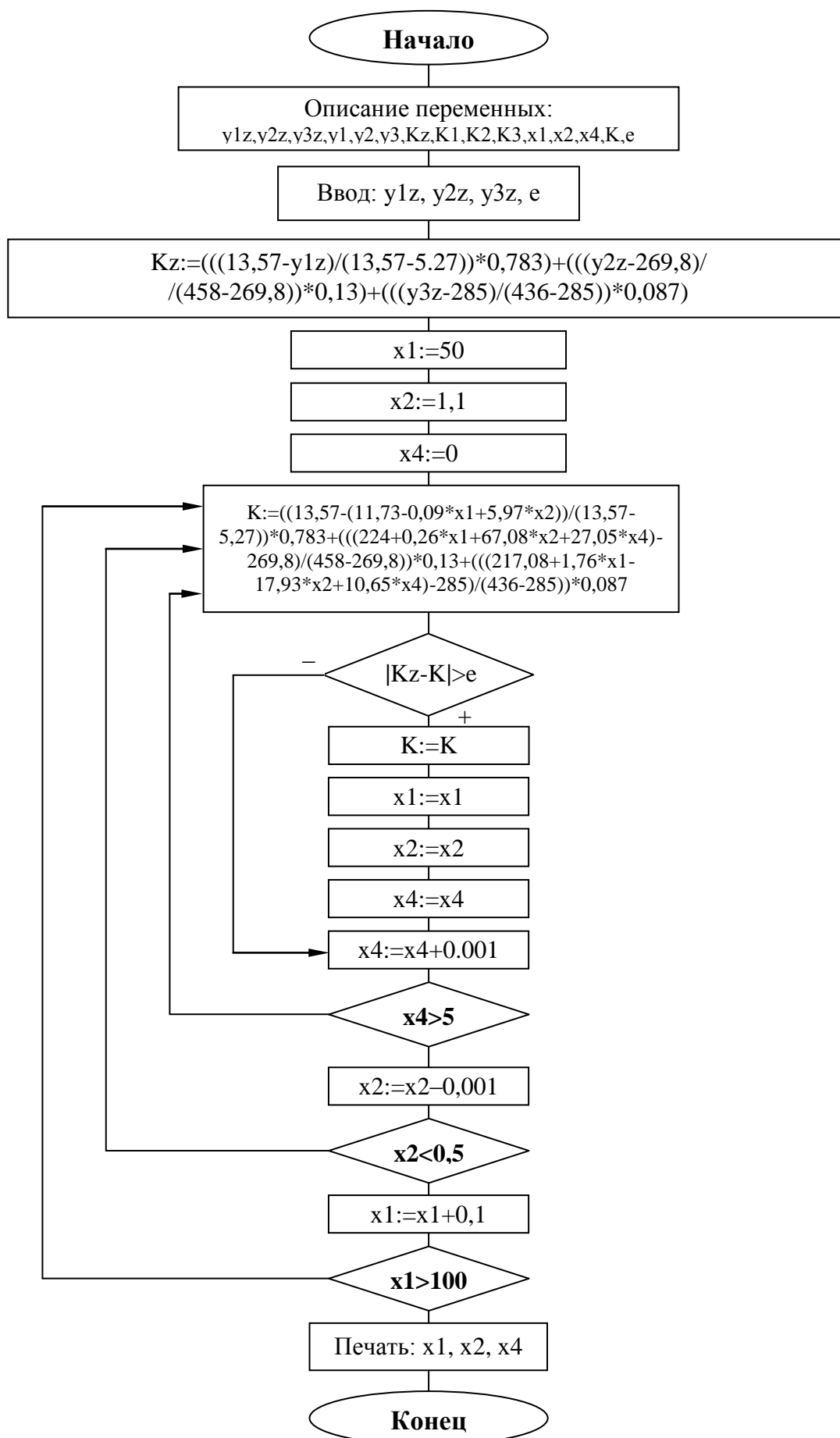


Рис. 1. Блок-схема программы минимизации целевой функции

При сравнении элемента с самим собой имеем равную значительность, так что на пересечении строки  $P_1$  со столбцом  $P_1$  заносим 1. Главная диагональ матрицы должна состоять также из единиц. На пересечение строки  $P_1$  и столбца  $P_2$  заносим 6, на пересечение строки  $P_2$  и столбца  $P_3$  заносим 9. Числа 6, 9 и их обратные величины используются для облегчения компромиссов между слегка отличающимися от основных чисел суждениями. Рациональные числа используются также для получения отношений, когда желательно увеличить согласованность всей матрицы при небольшом числе суждений. В общем случае, под согласованностью подразумевается то, что при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них. Для проведения парных сравнений  $n$  объектов или действий при условии, что каждый объект или действие представлены в данных по крайней мере один раз, требуется  $(n-1)$  суждений о парных сравнениях. Из них можно просто вывести все остальные суждения, используя следующее отношение: если объект  $P_1$  в 6 раз превосходит объект  $P_2$  и в 9 раз превосходит  $P_3$ , то  $P_1=6P_2$  и  $P_1=9P_3$ . Следовательно,  $6P_2=9P_3$ , или  $P_2=\frac{3}{2}P_3$  и  $P_3=\frac{2}{3}P_2$ . Поэтому на пересечение строки  $P_2$  и столбца  $P_3$  заносим  $\frac{3}{2}$ . Для того чтобы матрица была согласованной, численное значение суждения в позиции  $(P_2, P_3)$  не должно отличаться от  $\frac{2}{3}$ . В результате матрица попарных сравнений для расчёта коэффициентов весов примет вид табл. 3.

Таблица 3

Матрица попарных сравнений для расчёта коэффициентов весов

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	Оценки компонент собственного вектора по строке	Нормализация результата
$P_1$	1	6	9	$e_1 = \sqrt[3]{1 \cdot 6 \cdot 9} = 3,78$	$X_1 = \frac{3,78}{3,78 + 0,63 + 0,42} = 0,783$
$P_2$	$\frac{1}{6}$	1	$\frac{3}{2}$	$e_2 = \sqrt[3]{\frac{1}{6} \cdot 1 \cdot \frac{3}{2}} = 0,63$	$X_2 = \frac{0,63}{3,78 + 0,63 + 0,42} = 0,13$
$P_3$	$\frac{1}{9}$	$\frac{2}{3}$	1	$e_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{9} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1} = 0,42$	$X_3 = \frac{0,42}{3,78 + 0,63 + 0,42} = 0,087$

Интегральный коэффициент качества ферросилида определяется по формуле:

$$K = \frac{13,57 - y_1}{13,57 - 5,27} \times 0,783 + \frac{y_2 - 269,8}{458 - 269,8} \times 0,13 + \frac{y_3 - 285}{436 - 285} \times 0,087. \quad (11)$$

Оптимизация качества СВС-ферросилида производится в следующем порядке. Заказчик выставляет желаемые требования по конкретным значениям коррозионной стойкости, предела прочности при растяжении и твёрдости. По эти данным вычисляется интегральный коэффициент качества.  $K_{\text{зад}}$ . Далее формируется целевая функция:

$$y = |K_{\text{зад}} - K_{\text{к}}|, \quad (12)$$

которая подвергается минимизации итерационным методом покоординатного спуска, или методом Гаусса-Зейделя [5]. Блок-схема программы минимизации целевой функции представлена на рис. 1.

В результате получаем количественный состав шихты процесса СВС, который обес-

печивает достижение желаемого уровня качества ферросилида с заданной точностью. Предложенный подход к построению интегрального показателя качества продукта на основе количественных и качественных частных показателей качества позволяет быстро и в доступной форме проводить анализ и оптимизацию количества исходных компонентов для проведения СВС-процесса утилизации дисперсных железосодержащих отходов машиностроения с получением коррозионно-стойкого высоколегированного чугуна для нужд химической промышленности.

#### Библиографический список

1. **Бикулов, Р.А.** СВС-ферросилиды из дисперсных отходов машиностроения / Р.А. Бикулов, Г.Н. Сафронов, Л.Р. Харисов // Литейщик России. 2010. № 8. С. 15–17.
2. **Новик, Ф.С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.
3. **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.
4. **Бобро, Ю.Г.** Легированные чугуны / Ю.Г. Бобро. – М.: Metallurgy, 1976. – 288 с.
5. **Сафронов, Н.Н.** Оптимизация инженерных задач планированием эксперимента: учеб. пособие / Н.Н. Сафронов, Л.Р. Харисов. – Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2002. – 75 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.01.2012*

**N.N. Safronov, L.R. Kharisov**

#### **USE OF INTEGRAL PERFORMANCE CRITERION OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS FERROSILIDA FOR OPTIMIZATION OF THE CHARGE COMPOSITION**

Kama State Engineering and Economic Academy

An algorithm of optimization of the charge for metal-containing waste processing of metallurgical and foundry industries. The processing method is based on the phenomenon of self-propagating high-temperature synthesis of ferro-alloys of the composition of dispersed waste without the use of external sources of heat due to internal energy.

*Key words:* alloy cast iron, silicon, corrosion, self-propagating high-temperature synthesis, charge, waste, optimization, integral performance criterion.

УДК 621.9.025.7

**В.Н. Гуцин, В.А. Васильев, Е.А. Чернышов, И.Д. Романов,  
Е.А. Романова, А.Д. Романов**

## **УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПИРОЛИЗА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью работы является создание комплекса по утилизации отходов переработки древесины, пластика и медицинских отходов в жидком теплоносителе методом высокотемпературного пиролиза

*Ключевые слова:* отходы, утилизация, высокотемпературный пиролиз, жидкий металл.

Утилизация отходов деятельности человека является актуальной в нашей жизни. По оценкам специалистов, человек “вырабатывает” в год до 250 кг бытовых отходов. В среднестатистическом мусорном баке около 25% занимают пищевые отходы, 5-10% – бумага, 50% – полимеры, остальное приходится на металл, текстиль, резину, стекло и др. Классический путь удаления отходов (контейнер – мусоровоз – свалка – рекультивация) сегодня неэффективен и, кроме того, потенциально опасен, поскольку даже тщательно обработанная и засыпанная почвой свалка является источником “свалочного газа”, стимулирующего парниковый эффект. Один из самых “трудноперерабатываемых” видов отходов – пластиковая упаковка, прежде всего, отходы производства и потребления полиэтилена, полипропилена, полиэтилентерефталата (PET), полистирола и поливинилхлорида (PVC).

Одними из наиболее опасных отходов являются отходы здравоохранения, которые по степени эпидемиологической, токсикологической и радиационной опасности делятся на пять классов: отходы класса А (неопасные отходы) вывозятся на полигоны ТБО без ограничений, классов Б (опасные отходы: материалы, инструменты, патологические отходы) и В (чрезвычайно опасные: материалы, контактирующие с больными особо опасными инфекциями, отходы фтизиатрических и микологических больниц) уничтожаются на специальных установках по обезвреживанию отходов, обращение с отходами классов Г и Д регулируется нормативами для токсичных и радиоактивных отходов.

Разработка экологически безопасной технологии, а также простой в обслуживании и компактной установки позволит занять значительную долю рынка утилизации отходов, в том числе в перспективе и на международном уровне.

Целью работы является создание комплекса по утилизации отходов переработки древесины, пластиковых и медицинских отходов в жидкометаллическом теплоносителе методом высокотемпературного пиролиза.

### **Эксперимент**

Для реализации экспериментов по высокотемпературному пиролизу был разработан и создан экспериментальный стенд, состоящий из реактора с алюминиевым теплоносителем, блока управления нагревом, системы подачи исходного сырья, отвода полученных продуктов пиролиза, бескислородного разложения сырья, с возможностью пробоотбора газообразной и жидкой фракции.

Исследуемое сырье загружается индивидуально, либо по трубопроводу в установку пиролиза. Всплывая в расплаве теплоносителя происходит полный (для частиц малого размера) либо частичный (для частиц крупного размера) пиролиз отходов. Так, среднее время пиролиза материала размерами 50x50x30 мм составляет 1,5–2 мин. При ручной загрузке не измельченных твердых материалов пиролиз в процессе всплытия происходит только частично, а окончательно завершается на поверхности теплоносителя. При этом теплотворная способность отходов определяется элементарным



составом и применительно к древесным отходам практически не зависит от породы, так как содержание углерода С колеблется от 48,8 до 50,7% (масс), а водорода H<sub>2</sub> – от 6,00 до 6,25% (масс). Соответственно высшая теплотворная способность органической массы находится в пределах 18,64 ... 19,86 МДж/ кг. Большее влияние оказывает влажность на момент подачи сырья. До температуры 600 ... 700 °С реакция экзотермична, а выше 700 °С – эндотермична. По литературным данным исследований пиролиза древесных отходов в интервале температур 700 ... 1000 °С и скорости нагрева 250 ... 300 градусов в секунду установлено, что при 800 ... 900 °С получается в основном топливный газ, обогащенный углеводородами, а при 900 ... 1000 °С – преимущественно синтез-газ. К настоящему времени подробно изучено влияние сырьевых и режимных факторов: размера частиц древесины, породы древесины, влаги и температуры на выходе и качество получаемых продуктов газификации в установках с неподвижным и кипящим слоем [1, 2].

Принципиальными положительными особенностями безкислородных пиролизных технологий уничтожения органических материалов, позволяющих обеспечить экологическую безопасность выбросов, в том числе и хлорсодержащих, являются:

- возможность управляемого сжигания при высокой температуре концентрированной неразбавленной парогазовой смеси (теплота сгорания 6680–10450 кДж/м<sup>3</sup>), что позволяет обеспечить высокую (1200–1300 °С) температуру всего объема продуктов сгорания;
- выделяющийся при пиролизе хлорсодержащих материалов активный хлор уже в камере термического разложения немедленно реагирует с обязательным продуктом пиролиза любой органики – водородом, образуя стойкое соединение HCl, которое далее легко нейтрализуется на стадии доочистки. Тем самым предотвращается образование диоксинов и фуранов.

На рис. 1–4 показаны отдельные этапы осуществления пиролиза по предложенной схеме.



**Рис. 1.** Пиролиз частиц идет полностью, на поверхности расплава горит образующийся газ. (Система улавливания газа снята)



**Рис. 2.** Интенсивное газообразование «вспученная» поверхность теплоносителя. Пузырь достигает поверхности расплава, но газ еще скрыт слоем металла. (Система улавливания газа снята)



**Рис. 3. Пузырь лопнул, газ имеющий температуры 700 – 1200 °С, воспламенился при контакте с кислородом воздуха. (Система улавливания газа снята)**



**Рис. 4. Реактор закрыт системой улавливания газов. Горение газа в сбросном окне, видны капли металла, выброшенного из реактора при скачке давления**

### **Методика расчета прогрева частиц при всплытии в жидком теплоносителе**

С точки зрения практической применимости данной технологии одной из основных задач является прогрев исходного сырья до заданных температур и обеспечение полноты прохождения реакции. Для чего была разработана математическая модель пиролиза и выполнены расчеты.

Коэффициенты теплоотдачи от потока расплава к твердым частицам определялись в зависимости от режима движения и скорости потока расплава.

При значениях критерия Рейнольдса  $Re \geq 0,92 \cdot 10^4$  режим течения расплава является турбулентным, устойчивый ламинарный поток наступает при  $Re \leq 10^3$ .

Коэффициенты теплоотдачи от потока расплава к твердой частицы имеют вид:

- при турбулентном режиме  $\alpha_{ж} = \lambda_{ж} \left[ 2,5 + 3,6(\omega l / a_{ж})^{2/3} \right] / l$ ; (1)

- при ламинарном режиме  $\alpha_{ж} = 0,75 \lambda_{ж} \left[ (1 + \omega l / a_{ж})^{1/3} \omega l / a_{ж} \right]^{1/2} / l$ , (2)

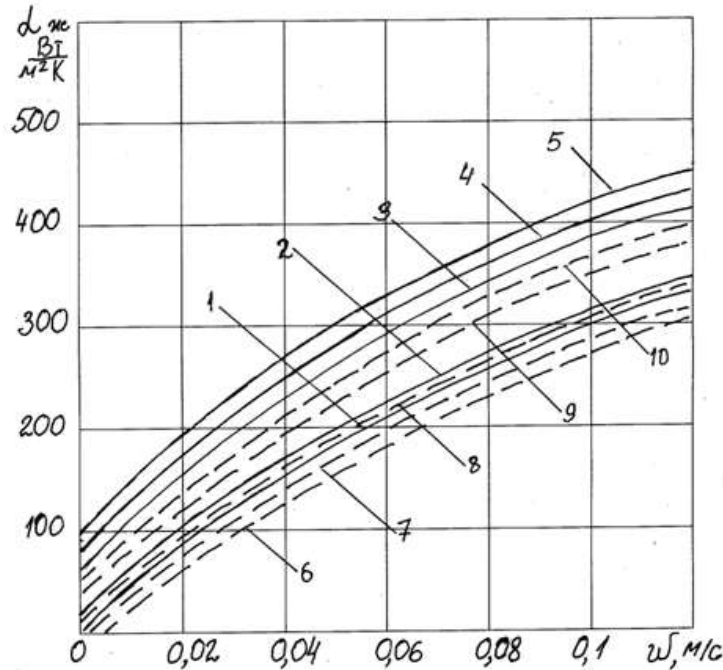
где  $a_{ж}$  – температуропроводность расплава;  $l$  – характерный размер;  $\nu_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\omega$  – скорость потока.

На рис. 5 приведены зависимости изменения коэффициента теплоотдачи от потоков расплава в зависимости от его скорости при различных значениях перегрева с учетом размеров и теплофизических параметров частиц [3–4]. Из иллюстрации следует, что при скоростях, близких к нулю (в застойных зонах),  $\alpha_{ж}$  достигает в расплаве алюминия 100 кВт / (м<sup>2</sup> · К). При повышении скорости потока значение  $\alpha_{ж}$  возрастает и достигает при  $\omega = 0,1$  м/с в расплаве алюминия 420 кВт / (м<sup>2</sup> · К).

Для решения задачи прогрева твердых частиц можно использовать уравнения теплового баланса [5–9]:

$$q F_{\text{эф}} d\tau = M c dT, \quad (3)$$

где  $q$  – плотность теплового потока на поверхность твердой частицы, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{\text{эф}}$  – эффективная тепловоспринимающая поверхность, м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $\tau$  – время, с;  $T$  – температура, К;  $M$  – масса частицы, кг.



**Рис. 5.** Зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{ж}}$  от расплава алюминия к твердым частицам (перегрев расплава  $\Delta t_{\text{пер}} = 100^\circ\text{C}$ )

в зависимости от скорости потока  $\omega$ :

- 1, 2, 3, 4, 5 – древесные отходы с диаметром частиц 2, 5, 10, 15, 20 мм;
- 6, 7, 8, 9, 10 – измельченные пластиковые отходы с диаметром частиц 2, 5, 10, 15, 20 мм, соответственно

Выражая плотность теплового потока через эффективный коэффициент теплоотдачи от расплава к всплывающей частице  $\alpha_{\text{ж}}$ , интегрируя уравнение (3) и решая относительно  $T_{\text{п.к}}$ , получим:

$$T_{\text{п.к}} = (T_{\text{р}} - T_{\text{п.н}}) [1 - \exp(-\alpha_{\text{ж}} F_{\text{эф}} \tau / M c)] + T_{\text{п.н}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{р}}$ ,  $T_{\text{п.н}}$  и  $T_{\text{п.к}}$  – температура расплава, начальная и конечная температуры частиц.

Решая это уравнение относительно времени, будем иметь:

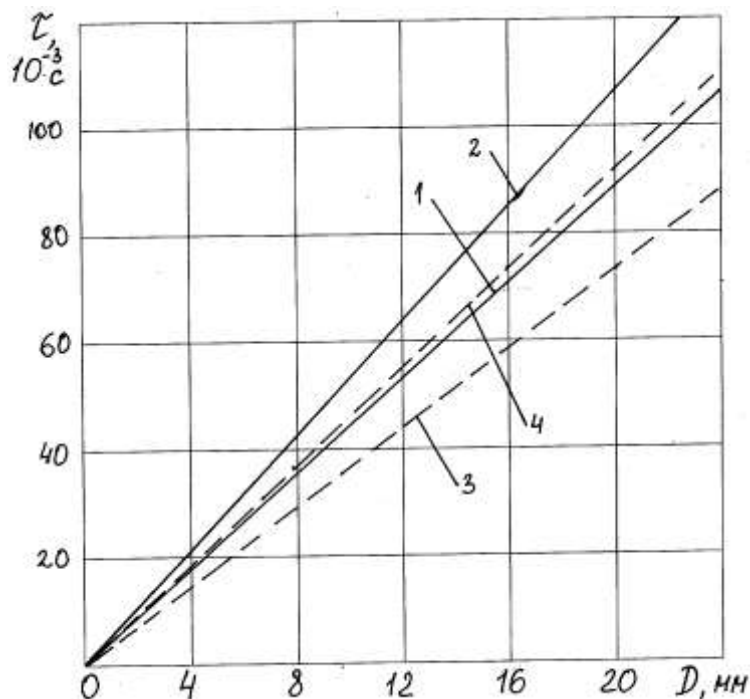
$$\tau = (M c / \alpha_{\text{ж}} F_{\text{эф}}) \ln[(T_{\text{р}} - T_{\text{п.н}}) / (T_{\text{р}} - T_{\text{п.к}})].$$

Если обозначить массу нагреваемого частицы  $M = V\rho$  ( $V$  – объем частицы;  $\rho$  – плотность), то получим:

$$\tau = (V\rho c / \alpha_{\text{ж}} F_{\text{эф}}) \ln[(T_{\text{р}} - T_{\text{п.н}}) / (T_{\text{р}} - T_{\text{п.к}})]. \quad (5)$$

Это уравнение показывает, что продолжительность нагрева пропорциональна размеру частиц ( $V/F_{\text{эф}}$ ), объемной теплоемкости  $\rho c$ , логарифму отношения начальной и конечной разности температур расплава и частицы и обратно пропорционально коэффициенту теплоотдачи на её поверхности.

На рис. 6 приведены результаты расчета времени прогрева твердых частиц в расплавах с различным перегревом.



**Рис. 6. Изменение времени прогрева твердых частиц в расплаве алюминия в зависимости от их диаметра:**

- 1, 2 – древесных отходов при перегреве расплава  $\Delta t_{пер} = 50, 100^\circ\text{C}$ ;  
3, 4 – измельченных пластиковых отходов при перегреве расплава  $\Delta t_{пер} = 50, 100^\circ\text{C}$

Результаты анализа рис. 6 показывают, что прогрев измельченных отходов диаметром до 10 мм происходит за время до  $5 \times 10^{-2}$  с, что достижимо при незначительной (до 0,5 м) глубине теплоносителя.

### Выводы

Высокотемпературный пиролиз отходов позволяет значительно изменить кинетику протекания процессов карбонизации углеродсодержащего сырья, ускорить массообменные и термодинамические характеристики процесса, увеличить конверсию и селективность процесса, создавать технологию контролируемого и управляемого процесса. Разрабатываемая технология позволяет безопасно утилизировать отходы деревообработки, пластиковые медицинские отходы с получением синтез газа. Преимуществом является возможность создания компактной, экологически безопасной установки, высокой производительности, по сравнению с существующими технологиями.

Термическая переработка твердых отходов предусматривает предварительное разложение органической составляющей отходов в бескислородной атмосфере (пиролиз), после чего образовавшаяся концентрированная парогазовая смесь направляется в камеру дожигания, где в режиме управляемого дожига газообразных продуктов происходит перевод токсичных веществ в менее или полностью безопасные.

Во время проведения научно-исследовательской работы по утилизации отходов в установке высокотемпературного пиролиза были достигнуты следующие результаты:

- создана и прошла экспериментальные испытания установка пиролиза отходов в жидком теплоносителе

- выполнены тепловые и гидравлические расчеты установки;
- выполнены эксперименты по гидродинамическому моделированию;
- проведены экспериментальные пуски установки, по пиролизу отходов в установке с жидким теплоносителем в диапазоне температур 700–1150°C для различных режимов пиролиза;
- поданы две заявки на патенты РФ;

#### Библиографический список

1. **Corte, P.** High-temperature gasification of carbonaceous materials by flash pyrolysis / P. Corte, V. Herault, S. Castillo, J.P. Traverse // Fuel. 1987. Vol. 66, N 8. P. 2107–2114.
2. **Лямин, В.А.** Газификация древесины / В.А. Лямин. – М.: Лесн. промышленность, 1967. – 260 с.
3. **Кожевников, И.Г.** Теплофизические свойства материалов: справочник / И.Г. Кожевников, Л.А. Новицкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 437 с.
4. **Уоллис, Г.** Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис – М.: Мир, 1972. – 440 с.
5. **Гущин, В.Н.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассобменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок: учеб. пособие / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 141 с.
6. **Гущин, В.Н.** Особенности физического и математического моделирования многофазных потоков / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. №7. С. 45–47.
7. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при оптимальных условиях / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 284 с.
8. **Налимов, В.В.** Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 202 с.
9. **Кутателадзе, С.С.** Гидравлика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стыркевич. – М.: Энергия, 1976. – 232 с.
10. **Баниев, Р.Ф.** Динамика частиц при воздействии вибрации / Р.Ф. Баниев, Л.Е. Украинский. – Киев: Наукова думка, 1975. – 127 с.
11. **Гущин, В.Н.** Способы интенсификации рафинирования и дегазации расплава // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. научн. трудов международной конференции; ЛГТУ. – Липецк. 2006. Ч. 5. С. 13–18.
12. **Ульянов, В.А.** Нагрев и нагревательные устройства / В.А. Ульянов, В.Н. Гущин, Е.А. Чернышов. – М.: Академия, 2010. – 255 с.

*Дата поступления  
в редакцию 10.01.2012*

**V.N Guschin, V.A Vasilev, E.A. Chernyshov,  
I.D. Romano, E.A. Romanova, A.D. Romanov**

#### **RECYCLING OF A WASTE BY A METHOD OF HIGH-TEMPERATURE PYROLYSIS IN THE LIQUID HEAT-CARRIER**

The work purpose is complex creation on recycling of a waste of processing of wood, a plastic and medical waste in the liquid heat-carrier a method of high-temperature pyrolysis.

*Key words:* Waste, recycling, high-temperature pyrolysis, liquid metal.

## ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 661.25:661.242.8:66.092.41:661.248

А.А. Перетрутов, М.Н. Чубенко, П.П. Ким

### КАТАЛИТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ОТРАБОТАННОЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ОРГАНИЧЕСКИЕ ПРИМЕСИ, НА ПИРИТНОМ ОГАРКЕ

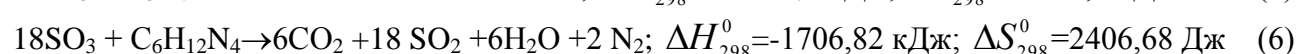
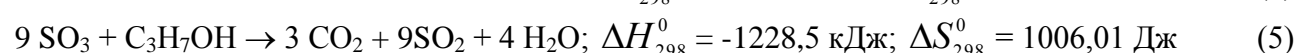
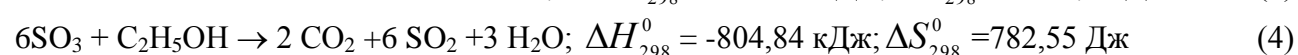
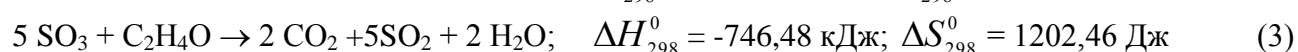
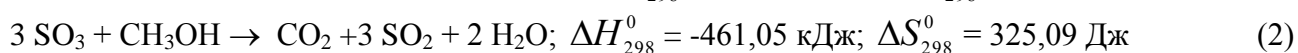
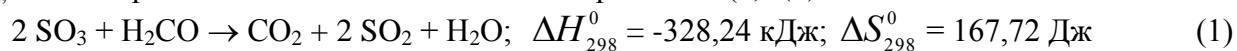
Дзержинский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Исследованы закономерности получения концентрированного сернистого ангидрида термоллизом отработанной серной кислоты, содержащей органические примеси, на катализаторе – пиритном огарке, проведены термодинамические расчеты изобарно-изотермического потенциала и констант равновесия реакций в зависимости от температуры. Получены и сопоставлены результаты восстановления серного ангидрида до сернистого водородом, оксидом углерода (II), метаном, аммиаком – продуктами дегидрирования, декарбонилирования, дезаминирования органических примесей.

*Ключевые слова:* кислота серная отработанная, ангидрид серный, восстановление, ангидрид сернистый, огарок пиритный, катализ гетерогенный, примеси органические, энтальпии, энтропии, энергии Гиббса, константы равновесия, дегидрирование, степень разложения, концентрация реакционного газа.

В ряде производств высокоэнергетических веществ [1] имеются растворы серной кислоты, содержащие органические примеси: формалин, уротропин, альдегидную фракцию. В производстве пероксида водорода отходом является серная кислота, содержащая изопропиловый спирт [2].

Физико-химические и восстановительные свойства перечисленных органических соединений в отработанной серной кислоте (ОСК) изучены для процесса денитрации ОСК [3, 4, 5]. В настоящей работе исследовано термическое расщепление серного ангидрида из ОСК с указанными восстановителями до сернистого. В качестве катализатора использовали пиритный огарок [6, 7]. Предварительно были проведены термодинамические расчеты энтальпии, энтропии реакций при стандартных условиях и изобарно-изотермического потенциала  $\Delta G_{p,T}$  далее приведенных восстановительных процессов (1)–(6):



Расчеты выполняли с учетом изменения теплового эффекта реакции от температуры [8]:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - \int_{298}^T (\Delta C_p/T) dT, \quad (7)$$

где  $\Delta G_T^0$  и  $\Delta H_{298}^0$  – изменение энергии Гиббса и энтальпии реакции при стандартном давлении.

лении и температуре опыта  $T$ , кДж/моль;  $\Delta S_{298}^0$  и  $\Delta C_p$  – изменение энтропии и теплоемкости реакции, Дж/моль·град.

Известно [8], что условием принципиальной осуществимости процесса, то есть возможности протекания реакции в прямом направлении без затраты работы, является неравенство  $\Delta G_{p,T} < 0$ . Чем более отдалена совокупность данных веществ от состояния равновесия (для химически обратимых процессов), тем сильнее стремление к протеканию процесса, тем больше будет убыль  $\Delta G_{p,T}$ , которая по существу при данных температуре и парциальных давлениях является мерой химического сродства и движущей силой процесса.

Стандартные термодинамические функции: энтальпия образования, энтропия и теплоемкость для веществ, участвующих в реакциях, взяты из справочников [9] (табл. 1).

Таблица 1

Термодинамические функции веществ, участвующих в процессе восстановительного термоллиза

Вещество	$\Delta H_{298}^0$ , кДж/моль	$S_{298}^0$ , Дж/моль·град	$C_{p298}^0$ , Дж/моль·град
$H_2O_{(r)}$	-242,17	188,99	33,638
$CO_{2(r)}$	-394,08	213,98	36,946
$CO_{(r)}$	-110,68	198,19	29,158
$SO_{2(r)}$	-297,32	248,43	39,740
$SO_{3(r)}$	-369,29	257,01	37,680
$C_3H_7OH_{(r)}$	-274,69	314,67	168,438
$C_2H_5OH_{(r)}$	-278,01	160,90	112,124
$C_2H_4O_{(r)}$	-166,22	263,97	55,300
$CH_3OH_{(r)}$	-201,46	241,13	44,120
$CH_2O_{(r)}$	-110,07	218,09	35,450
$N_4C_6H_{12(r)}$	125,7	163,6	38,270
$CH_{4(r)}$	-74,955	186,46	36,734
$NH_3$	-46,26	192,91	35,196

Найденные значения  $\Delta G_T^0$  в зависимости от температуры при применении различных восстановителей представлены на рис. 1.

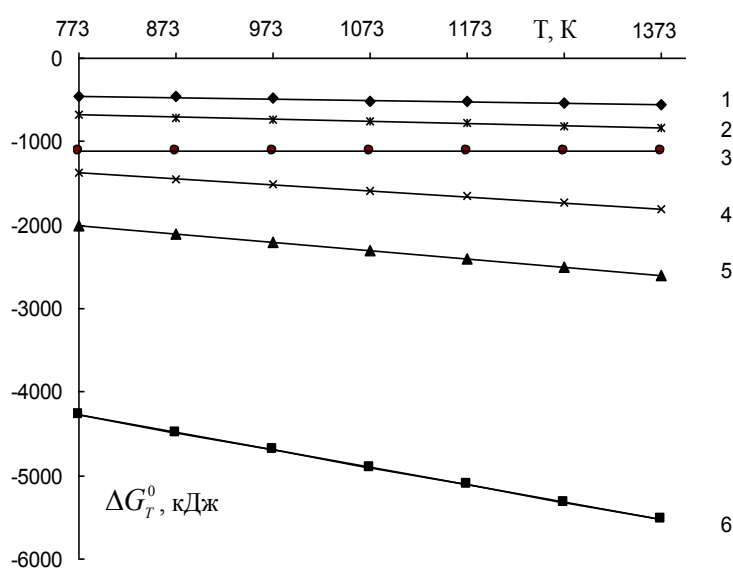


Рис. 1. Энергия Гиббса восстановления серного ангидрида органическими соединениями:

- 1 - формальдегид; 2 - метилловый спирт; 3 - ацетальдегид;  
4 - этиловый спирт; 5 - изопропиловый спирт; 6 - уротропин

С увеличением температуры, как это видно из рис. 1, энергия Гиббса всех приведенных реакций возрастает, особенно для реакций 4, 5, 6, характеризующих взаимодействие с этиловым, изопропиловым спиртами и уротропином.

Энергии Гиббса, отнесенные к одному молю восстанавливаемого серного ангидрида  $\Delta G_{T,i}^0 = \Delta G_T^0 / n_{\text{SO}_2}$ , в зависимости от температуры представлены уравнениями (8)–(13) и расположены по убыванию потенциала в следующем порядке:

- для уротропина  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,1167 \cdot T - 147,09;$  (8)

- этилового спирта  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,1179 \cdot T - 137,86;$  (9)

- изопропилового спирта  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,1118 \cdot T - 136,49;$  (10)

- формалина  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,0845 \cdot T - 163,3;$  (11)

- метилового спирта  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,0863 \cdot T - 160,26;$  (12)

- ацетальдегида  $\Delta G_{T,i}^0 = -0,0019 \cdot T - 220,36.$  (13)

Мольные величины энергии Гиббса и энтальпии реакций (1)–(6), также отнесенные к молю серного ангидрида  $\Delta H_{298,i}^0 = \frac{\Delta H_{298}^0}{n_{\text{SO}_2}}$ , были использованы для расчета приведенной энергии Гиббса:

$$\Delta \Phi_{T,i} = -\frac{\Delta G_{T,i}^0 - \Delta H_{298,i}^0}{T}. \quad (14)$$

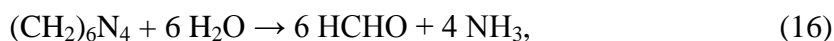
Например, расчетные величины  $\Delta \Phi_{T,i}$  для 773 К составляют: 0,1843; 0,1228; 0,1118; 0,0838; 0,0948; 0,0939 кДж/моль·К в порядке приведенных уравнений (8)–(13). Сравнение по классам использованных соединений приводит к выводу, что наибольшая приведенная энергия Гиббса у аминов, далее идут спирты в порядке увеличения  $\Delta \Phi_{T,i}$ : метиловый, изопропиловый, этиловый; альдегиды: формалин и ацетальдегид.

Константы равновесия реакций (1)–(6), определенные по уравнению:

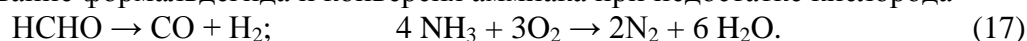
$$\ln K_p = -\frac{\Delta G_{T,i}^0}{RT} = 35,315 - 24,42, \quad (15)$$

свидетельствуют о возможности полного смещения равновесия реакций восстановления оксида серы (VI) до оксида серы (IV).

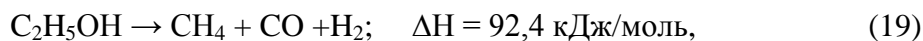
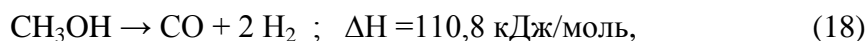
Восстановлению серного ангидрида предшествует глубокое расщепление органических соединений на катализаторе до водорода, метана, оксида углерода. В механизме гетерогенно-каталитических реакций сорбция кислородсодержащих соединений и аминов на оксидных катализаторах выше, чем на металлах [2], поэтому объяснима высокая каталитическая активность пиритного огарка [7]. Склонность спиртов к дегидрированию выше, чем у аминов, так как у аминов (например, для уротропина) предварительной стадией является гидратация с дезаминированием по уравнению



а затем дегидрирование формальдегида и конверсия аммиака при недостатке кислорода

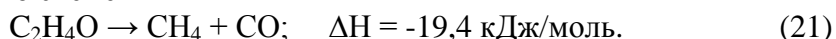


Метиловый и другие спирты дегидрируются на катализаторе по эндотермическим реакциям





Ацетальдегид, содержащийся в легкой фракции перегонки спирта-сырца, подвергается реакции декарбонирования по схеме



Таким образом, газовая смесь в слое катализатора состоит из продуктов разложения серной кислоты:  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и восстановителей:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NH}_3$ .

Были проведены термодинамические расчеты процесса восстановления серного ангидрида метаном, водородом, оксидом углерода (II) и аммиаком до сернистого ангидрида и более глубокого восстановления до элементарной серы. Результаты расчетов энергии Гиббса реакций (22)–(33) в зависимости от температуры занесены в табл. 2.

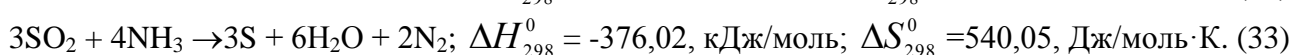
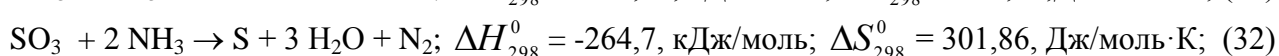
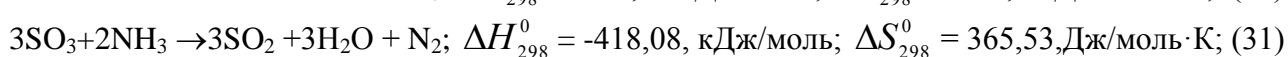
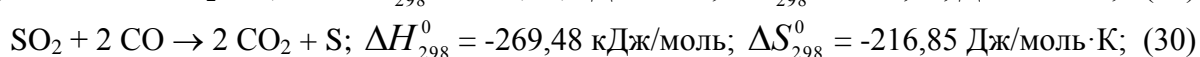
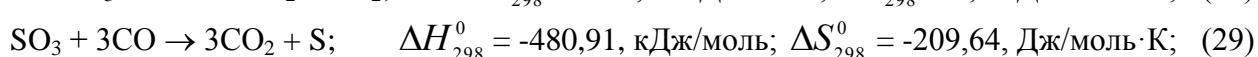
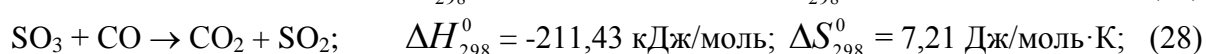
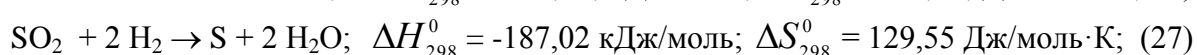
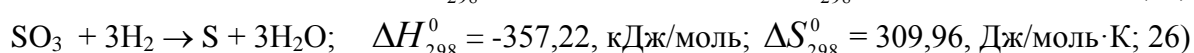
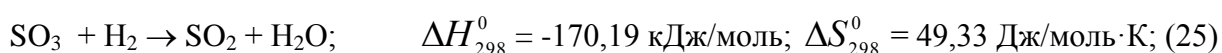
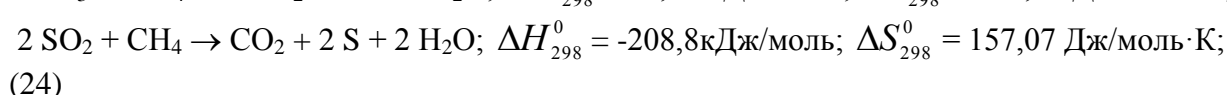
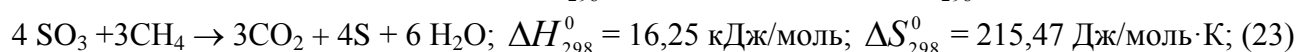
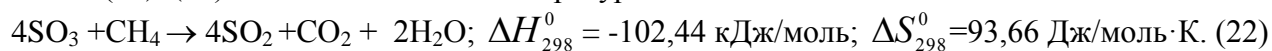


Таблица 2

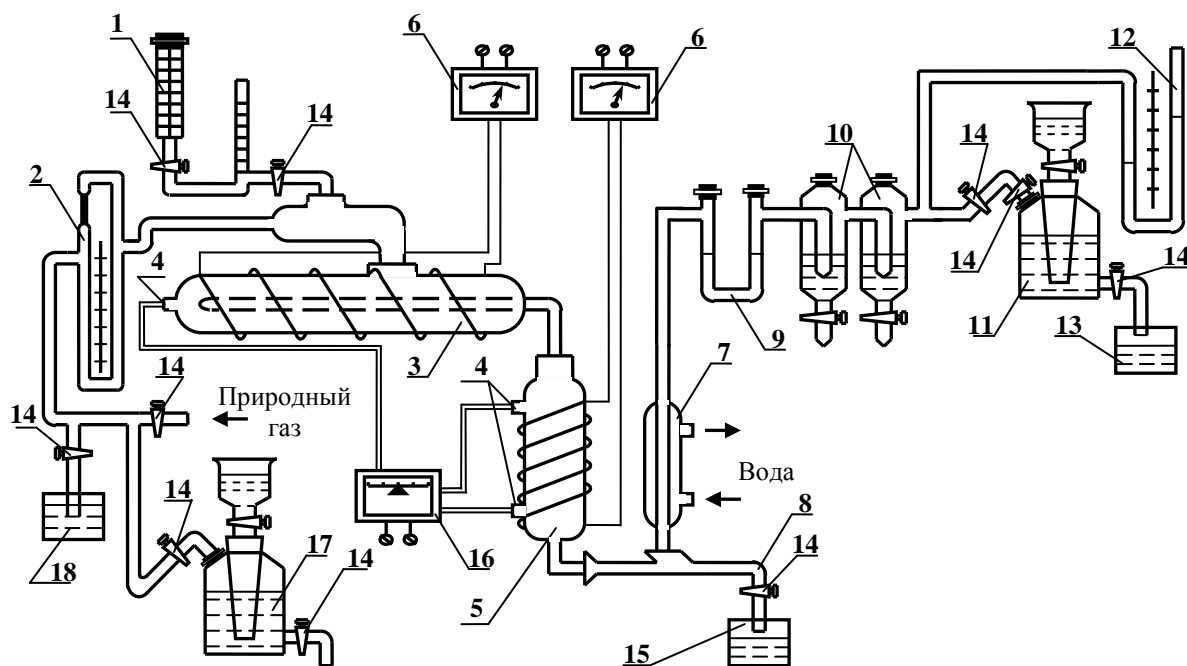
Изменение энергии Гиббса реакций (22)–(36) в зависимости от температуры

Уравнения реакций	$\Delta G_{973}^0$ , кДж	$\Delta G_{1073}^0$ , кДж	$\Delta G_{1173}^0$ , кДж
$4 \text{SO}_3 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{SO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (22)	-774,3	-811,76	-849,23
$4 \text{SO}_3 + 3\text{CH}_4 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4 \text{S} + 6\text{H}_2\text{O}$ (23)	-773,59	-859,78	-945,97
$2 \text{SO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (24)	-119,9	-110,8	-101,65
$\text{SO}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (25)	-218,18	-223,12	-228,05
$\text{SO}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$ (26)	-616,20	-640,88	-665,56
$\text{SO}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (27)	-313,07	-326,03	-338,98
$\text{SO}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{SO}_2$ (28)	-218,45	-219,16	-219,89
$\text{SO}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 3\text{CO}_2 + \text{S}$ (29)	-286,58	-267,04	-247,51
$\text{SO}_2 + 2 \text{CO} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + \text{S}$ (30)	-58,48	-36,80	-15,11
$3\text{SO}_3 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 3 \text{SO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ (31)	-729,36	-759,33	-789,31
$\text{SO}_3 + 2\text{NH}_3 \rightarrow \text{S} + 3 \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ (32)	-527,60	-553,22	-578,84
$3 \text{SO}_2 + 4 \text{NH}_3 \rightarrow 3\text{S} + 6\text{H}_2\text{O} + 2 \text{N}_2$ (33)	-853,44	-900,32	-947,21
$2 \text{SO}_3 + 3\text{H}_2\text{CO} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 2\text{S} + 3 \text{H}_2\text{O}$ (34)	-879,23	-882,89	-887,29
$6\text{SO}_3 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{S} + 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2$ (35)	-2420,39	-2491,6	-2562,8
$3\text{SO}_3 + \text{C}_3\text{H}_7\text{OH} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 3\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$ (36)	-1070,2	-1101,2	-1132,2

Приведенные термодинамические расчеты показывают, что энергии Гиббса в реакциях восстановления серного ангидрида метаном, водородом, оксидом углерода, аммиаком меньше нуля, поэтому протекание процесса возможно в направлении образования сернисто-

го ангидрида. Кроме того, можно сказать о возможности восстановления  $\text{SO}_3$  и  $\text{SO}_2$  до элементарной серы в присутствии всех перечисленных восстановителей. Из приведенной таблицы следует, что наибольшей величиной изобарно-изотермического потенциала на моль  $\text{SO}_3$  обладают реакции восстановления до элементарной серы (34)–(36) с формалином, уротропином и изопропиловым спиртом (-439,6, -403,4 и 356,7 кДж/моль, а до сернистого ангидрида -237,3, -260,6 и -245,3 кДж/моль при 973 К).

Процесс термического разложения серной кислоты в среде восстановителей метана и водорода изучали на установке (рис. 2), в которой основными аппаратами служили испаритель 3, представляющий собой кварцевую запаянную трубку диаметром 30 мм и длиной 300 мм, заполненную кварцевой насадкой в виде колец Рашига размером 4x6 мм. Испаритель снабжен карманом для термопары 4 со стороны, противоположной выходу реакционных газов.



**Рис. 2. Схема установки термического разложения серной кислоты в среде восстановителей:**

- 1 – емкость; 2 – жидкостной реометр; 3 – испаритель; 4 – карманы для термопар; 5 – реактор; 6 – регуляторы напряжения; 7 – конденсатор; 8 – отвод конденсата; 9, 10 – поглотители; 11 – аспиратор; 12 – манометр; 13 – сборник воды; 14 – краны; 15 – сборник конденсата; 16 – многоточечный автоматический лагометр

Испарившаяся на нагретой насадке кислота проходила по центральной трубке диаметром 6 мм вдоль испарителя и по отводу со шлифами поступала в реактор 5, представляющий собой вертикально установленную обогреваемую кварцевую трубку диаметром 30 мм и высотой 300 мм. В нижнюю часть реактора помещена насадка из кварца для удержания катализатора. В качестве катализатора использовали стационарный слой пиритного огарка. Контроль температуры в реакторе осуществляли с помощью двух термопар, помещенных в карманы 4, и многоточечного автоматического лагометра 16. Обогрев испарителя и реактора проводили с помощью электроспиралей с регулируемым напряжением 6. Подача природного газа в испаритель регулировалась по жидкостному реометру 2. В качестве манометрической жидкости в реометре использовалась вода. Калибровка реометра позволяла регулировать расход природного газа от 60 до 200 мл/мин.

Подачу кислоты в испаритель регулировали с помощью микробюретки, соединенной с емкостью для кислоты 1 по принципу сообщающихся сосудов, поддерживая постоянный

заданный расход кислоты. Анализы газовой фазы из реактора и жидкой после конденсатора 7 проводили по методикам, описанным [7].

На данной установке были проведены предварительные исследования конверсии метана в среде испаренной воды на пиритном огарке, определена зависимость степени конверсии метана от температуры и соотношения вода : метан. Опыты проводили при температурах 873, 973, 1073 и 1173 К и соотношении вода: метан = 1,22:1; 1,5:1; 2:1; 3:1. На основании полученных данных можно сделать вывод, что степень конверсии метана, определенная как отношение прореагировавшего метана к исходному, возрастает с увеличением температуры и соотношения  $H_2O: CH_4$ , но не превышает 57%. В результате конверсии образуются монооксид углерода, водород и остаются водяной пар и метан. Подобная реакционная газовая смесь обладает восстановительными свойствами по отношению к серному ангидриду, но образование монооксида углерода и водорода в присутствии продуктов термического разложения серной кислоты затруднено вследствие малого количества водяного пара, образующегося при разложении. Поэтому условно считали, что восстановление  $SO_3$  до  $SO_2$  происходит при взаимодействии с метаном без конверсии.

Для ускорения термического разложения использовали фракции огарка, полученные рассевом на стандартных ситах с размером 2,5 и 1,5 мм. Механическая прочность огарка после его пропитки 12 %-ным раствором  $Al(NO_3)_3$ , сушки и прокаливания возрастает многократно (с 2,755 до 14,973 кг/см<sup>2</sup> для гранул 2,5 мм и с 7,353 до 38,887 кг/см<sup>2</sup> для гранул 1,5 мм), а время пропитки более 15 минут не оказывает существенного влияния на механическую прочность пропитанных гранул, структурные характеристики [7] практически не меняются.

Процесс термического разложения начали с 92,5%-ной серной кислоты, вели его в непрерывном режиме с постоянным отбором газов в аспиратор через поглотители с прокаленным хлоридом натрия и 4%-ным раствором перекиси водорода. Без восстановителя, при температурах 873–1173 К степень разложения серного ангидрида составила от 52,87 до 67,27 %, содержание  $SO_2$  в газе от 44,3 до 46,2 %, остаточное содержание  $SO_3$  в газе от 0,064 до 0,056 %, массовая доля кислоты в конденсате от 75,89 до 68,31 %. Таким образом, можно сделать вывод, что лабораторная установка позволяла получать достоверные результаты, сопоставимые с результатами разложения в предыдущих экспериментах [7].

В следующей серии опытов было проведено разложение серной кислоты различной концентрации и восстановление серного ангидрида на пиритном огарке в присутствии природного газа.

Использование природного газа как источника тепла и восстанавливающего агента в процессе термолиза серной кислоты, содержащей органические примеси, изучено в работе [10]. Результаты лабораторных исследований проверены на опытно-промышленной установке Воскресенского филиала НИУИФ при подаче ОСК в количестве 600 л/ч с концентрацией 67 % в форсуночную печь для сжигания серы. Подача природного газа в печь составляла 190–195 м<sup>3</sup>/ч, воздуха на горение – 600 м<sup>3</sup>/ч, воздуха на распыление кислоты – 200 м<sup>3</sup>/ч, кислорода – 90 м<sup>3</sup>/ч. Указанные условия обеспечили температуру 1183 К и степень разложения 99,8 % при остаточной концентрации кислорода 5 % и концентрации  $SO_2$  11%. Приведенные данные показывают, что практически полное разложение  $SO_3$  до  $SO_2$  при сжигании природного газа в среде распыленной и термически расщепленной серной кислоты достигается при достаточно высокой температуре.

В публикуемой работе была поставлена задача определения возможности получения концентрированного сернистого ангидрида и снижения температуры разложения при использовании природного газа в качестве восстанавливающего агента на пиритном огарке.

Результаты исследования термического разложения серной кислоты различной концентрации на пиритном огарке при подаче природного газа в количестве 300 % от стехиометрии на восстановление серы (VI) до серы (IV) представлены на рис. 3 и в табл. 3.

Результаты исследований, представленные графически, свидетельствуют о существенном влиянии и температуры разложения и концентрации разлагаемой кислоты при вос-

становлении серного ангидрида в сернистый в присутствии восстановителя - природного газа в большом избытке от стехиометрии. Повышение концентрации кислоты вызывает уменьшение концентрации водяного пара в продуктах реакции, если считать водяной пар инертным газом в равновесном процессе, то можно предположить, что в этом случае происходит меньшее разбавление сернистого ангидрида и смещение равновесия в сторону исходных веществ. Одновременно меньшее количество водяного пара уменьшает степень конверсии метана до CO и H<sub>2</sub>.

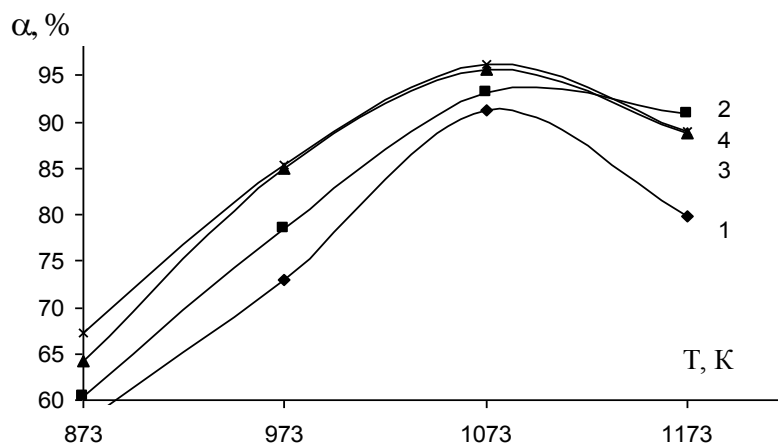


Рис. 3. Степень разложения серной кислоты на пиритном огарке при подаче природного газа 300 % от стехиометрии от температуры. Концентрация серной кислоты: 1 – 40 %; 2 – 50 %; 3 – 69 %; 4 – 92,5

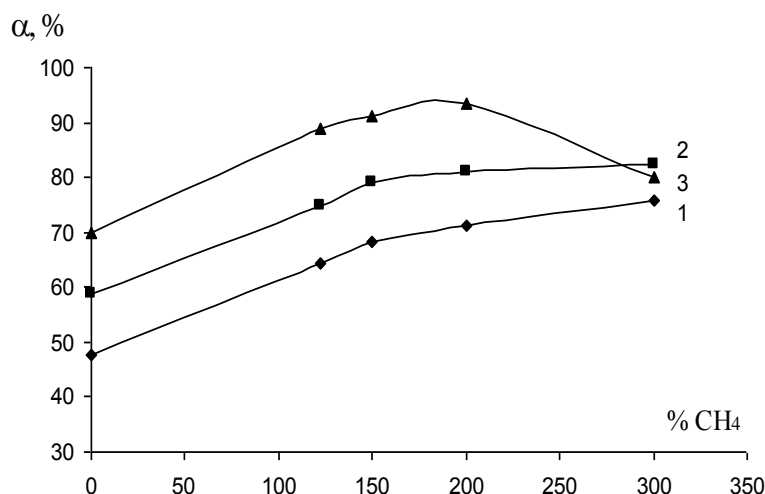
Таблица 3

Термическое восстановление серного ангидрида на пиритном огарке при подаче природного газа 300 % от стехиометрии

T, K	Конц. кислоты, %	Содержание в газе, %		Приход серы	Выход серы	Степень разложения, %
		SO <sub>3</sub> ,	SO <sub>2</sub> ,			
873	40	0,005	45,3	0,1933	0,1018	57,6
973	40	0,005	44,9	0,1933	0,1127	73,0
1073	40	0,002	50,4	0,1933	0,1233	91,3
1173	40	0,0002	47,68	0,1933	0,1469	79,9
873	50	0,003	48,1	0,2743	0,2256	60,3
973	50	0,002	49,2	0,2743	0,2363	78,4
1073	50	0,0025	50,6	0,2743	0,2493	93,2
1173	50	0,004	44,1	0,2743	0,2613	90,9
873	69	0,0035	47,8	0,5249	0,3370	64,2
973	69	0,003	48,4	0,5249	0,0999	84,9
1073	69	0,023	49,4	0,5249	0,4849	95,7
1173	69	0,001	41,8	0,5249	0,3213	88,7
873	92,5	0,002	48,3	0,6097	0,4257	67,3
973	92,5	0,003	49,5	0,6097	0,4951	85,1
1073	92,5	0,0025	50,7	0,6097	0,5817	96,8
1173	92,5	0,0015	45,1	0,6097	0,5133	88,7

Таким образом, следовало ожидать значительного уменьшения степени разложения серного ангидрида до сернистого. Однако в процессе изучения влияния концентрации кислоты установлено, что значительный избыток восстановителя предопределяет даже некоторое повышение степени разложения с увеличением концентрации кислоты. В связи с ростом

температуры восстановительный процесс в присутствии метана имеет экстремальный характер,  $da/dT = 0$  при  $T = 1073\text{K}$ . Дальнейшее увеличение температуры вызывает уменьшение количества образующегося  $\text{SO}_2$ , следовательно, и степени разложения  $\text{SO}_3$  до  $\text{SO}_2$  ввиду образования серы.



**Рис. 4. Зависимость степени разложения серной кислоты при подаче природного газа на пиритном огарке от подачи газа. При температуре, К:**  
1 - 973; 2 - 1073; 3 - 1173

На рис. 4 кривая 1 соответствует 973 К и характеризует зависимость степени разложения от подачи природного газа в количестве 122, 150, 200 и 300 % от стехиометрии.

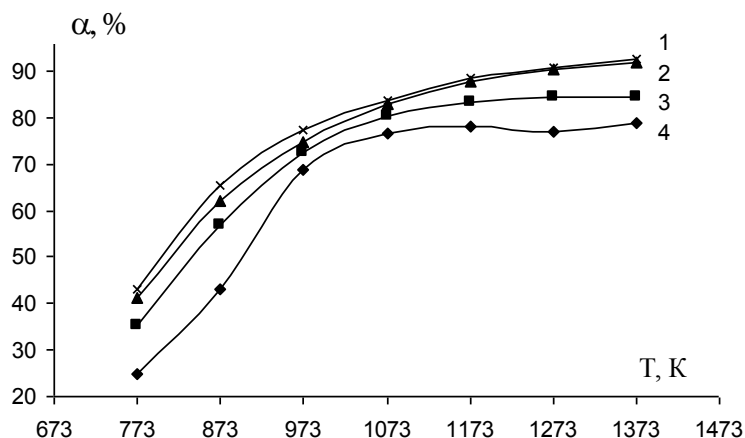
Кривые 2 и 3 – аналогичные зависимости для температур 1073 и 1173 К. У кривой 3 имеется максимум в области подачи природного газа в количестве 200 % от стехиометрии. При дальнейшем увеличении подачи газа происходит снижение степени разложения до  $\text{SO}_2$  ввиду образования серы. Таким образом, в процессе работы с природным газом целесообразно поддерживать температуру 1073–1173К и подавать избыток метана не более 200% (табл. 4).

**Таблица 4**

**Экспериментальные данные процесса термического разложения серной кислоты на пиритном огарке при подаче природного газа**

Т, К	Подача газа от стехиометрии, %	Концентрация газа, %		Концентрация конденсата, %	Приход серы	Выход серы	Степень разложения, %
		$\text{SO}_3$	$\text{SO}_2$				
973	0	0,005	2,8	12,3	0,1823	0,1127	47,7
973	122	0,002	9,5	8,5	0,1823	0,0860	64,5
973	150	0,0004	10,4	7,3	0,1823	0,0063	68,3
973	200	0,004	20,5	4,2	0,1823	0,0433	71,2
973	300	0,002	29,1	3,8	0,1823	0,1233	75,9
1073	0	0,002	3,1	13,4	0,1823	0,1423	58,7
1073	122	0,26	9,7	8,3	0,1823	0,0733	74,8
1073	150	0,002	11,3	6,9	0,1823	0,1433	79,1
1073	200	0,004	22,4	3,8	0,1823	0,0073	81,0
1073	300	0,0025	30,2	3,1	0,1823	0,1241	82,3
1173	0	0,002	4,7	15,5	0,1823	0,0999	70,0
1173	122	0,0002	10,3	10,4	0,1823	0,2049	88,8
1173	150	0,004	13,6	9,1	0,1823	0,3149	91,2

1173	200	0,023	24,8	5,2	0,1823	0,1849	93,4
1173	300	0,003	32,2	4,8	0,1823	0,3213	79,9



**Рис. 5. Степень разложения серной кислоты с добавкой изопропилового спирта в зависимости от температуры. Количество изопропилового спирта: 1 – 9%; 2 – 7,5 %; 3 – 6 %; 4 – 3 %**

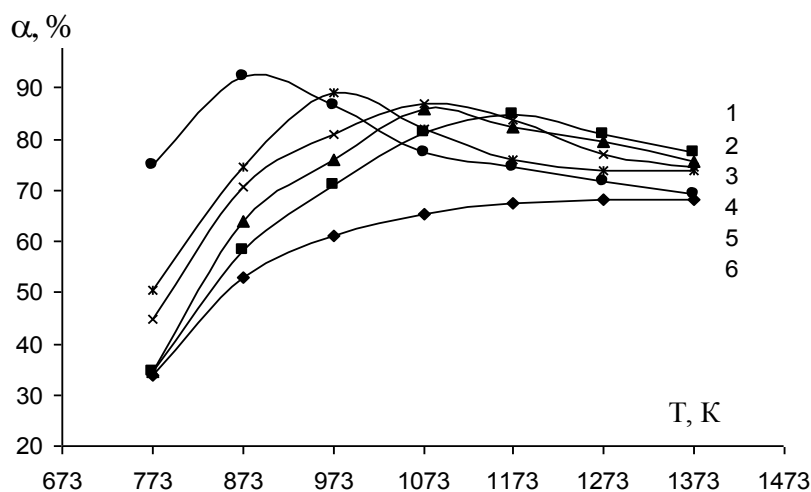
В дальнейшем процесс разложения серной кислоты на катализаторе исследовали на растворах, содержащих от 3 до 9 % изопропилового спирта, от 1 до 8,86 % уротропина, от 1 до 10 % формалина в серной кислоте. Была определена зависимость степени разложения серной кислоты с добавками изопропилового спирта на катализаторе в зависимости от концентрации и температуры. Результаты исследований представлены на рис. 5, из которых следует, что увеличение содержания изопропилового спирта в исходной серной кислоте и увеличение температуры приводит к увеличению степени разложения. Наивысшая степень разложения достигается при концентрации 9 %, температуре 1373К и равна 92,7%, а при содержании изопропилового спирта 3 % и той же температуре – 78,5 %. Это свидетельствует о том, что изопропиловый спирт является эффективным восстановителем, смещающим равновесие в реакции разложения  $\text{SO}_3$  в сторону образования  $\text{SO}_2$ . Участвуя в процессе, изопропиловый спирт взаимодействует с выделяющимся кислородом, что так же, как и дегидрирование спирта с образованием водорода и оксида углерода (II), способствует смещению равновесия (5).

В ходе опытов визуально было отмечено образование сажи при температурах ниже 1173 К, что можно объяснить разложением изопропилового спирта на углерод, водород и воду при недостатке кислорода в реакционной смеси. При температурах выше 1173 К образование сажи не происходит, ввиду сгорания углерода в реакционном кислороде.

Теоретическое количество изопропилового спирта, необходимое для полного разложения 92%-ной серной кислоты, составляет 6,4% от массы кислоты со спиртом. Как видно из приведенных исходных данных для разложения использовали растворы, близкие к стехиометрическому соотношению (6%) и выше (9%). Однако ни в том, ни в другом случае в области низких температур восстановление не было полным. Помимо сажеобразования существенным в данном процессе, вероятно, является взаимодействие серной кислоты с изопропанолом с образованием изопропанолсульфата  $\text{C}_3\text{H}_8\text{SO}_4$ . Свидетельством образования сложного эфира служило появление у реакционной смеси буроватого оттенка. Расщепление под действием температуры указанного соединения требует дополнительных затрат энергии, при этом теряется активность восстановителя.

Механизм каталитического расщепления  $\text{SO}_3$  до  $\text{SO}_2$  с использованием органических восстановителей помимо внешней и внутренней диффузии, активированной адсорбции  $\text{SO}_3$ , образования активированного комплекса, отщепления  $\text{SO}_2$  содержит стадию взаимодействия промежуточного соединения Кат-О- с углеводородным радикалом или с водородом и монооксидом углерода в случае формальдегида с образованием углекислого газа и воды, а в случае применения уротропина с образованием азота и конечных продуктов термоллиза.

Результаты исследований разложения серной кислоты с добавками уротропина на катализаторе в зависимости от концентрации и температуры представлены на рис. 6.



**Рис. 6. Степень разложения серной кислоты с добавкой уротропина в зависимости от температуры. Количество уротропина:**  
1 - 1%; 2 - 2%; 3 - 4%; 4 - 6%; 5 - 8,86%; 6 - 0%

Указанный график показывает, что увеличение содержания уротропина до 4 и более процентов при минимальной температуре 773 К приводит к увеличению степени разложения серной кислоты до сернистого ангидрида. При концентрации уротропина 8,86 % достигается степень разложения равная 74,78 %, без восстановителя степень разложения составляет всего 33,74 %. Максимальная степень разложения, равная 94,5 %, определена при температуре 873 К при той же концентрации уротропина. Отмечено, что зависимость степени разложения серной кислоты в присутствии восстановителя от температуры имеет экстремальный характер, причем максимум степени разложения с увеличением концентрации уротропина смещается в сторону понижения температуры. При превышении экстремальной температуры происходит более глубокое восстановление  $\text{SO}_3$  - до элементарной серы. Серовыделение наблюдали в отводной трубке и конденсаторе.

Из полученных данных следует, что уротропин является эффективным восстановителем, смещающим равновесие реакции в сторону образования  $\text{SO}_2$  в интервале температур 773–1173 К. Смещение равновесия реакции происходит вследствие связывания реакционного кислорода с уротропином (5) и продуктами гидратации с дезаминированием (17.1,2). Теоретическая концентрация уротропина, достаточная для полного превращения серного ангидрида в сернистый, составляет 6,8%. Избыток уротропина в 1,3 раза не обеспечивает полного превращения  $\text{SO}_3$  в  $\text{SO}_2$  вследствие параллельно протекающей реакции восстановления до элементарной серы.

Имеющиеся в производстве растворы серной кислоты, содержащие 1–2 % уротропина, могут быть термически разложены до сернистого ангидрида на пиритном огарке при температуре 973–1173 К со значительным выходом сернистого ангидрида высокой концентрации. Степень разложения  $\text{SO}_3$  при этом равна 80–85 % и превышает степень разложения чистой серной кислоты почти на 20 %, а концентрация реакционного газа превышает 56 %  $\text{SO}_2$ . Остальное количество  $\text{SO}_3$  разлагается в обычной вертикальной или горизонтальной печи при подаче природного газа и воздуха.

Экспериментальные результаты разложения серной кислоты с добавками уротропина в зависимости от температуры с достаточной сходимостью (коэффициент корреляции в пределах 0,978–0,995) описываются уравнением вида  $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ , где  $y$  – степень разложения до  $\text{SO}_2$ , %;  $x$  - температура, °С;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - коэффициенты уравнения приведены в табл. 5.

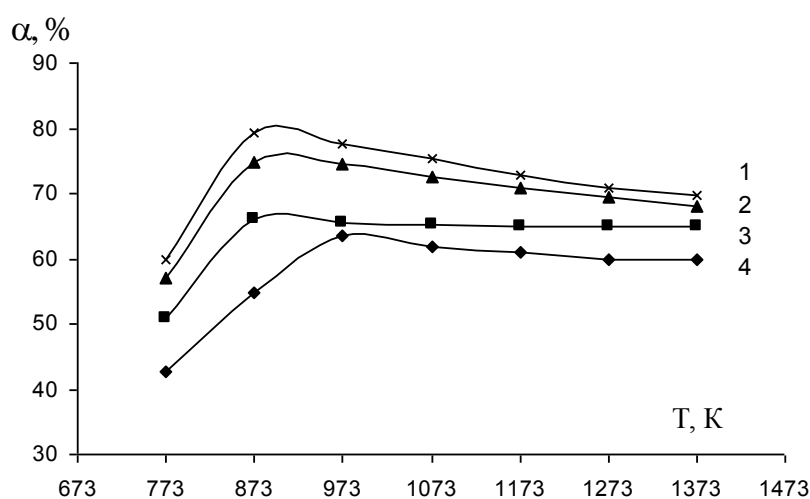


Таблица 5

**Коэффициенты регрессионного уравнения термического разложения серной кислоты  
в присутствии уротропина**

Массовая доля уротропина, %	1	2	4	6	8,86
lna	-30,9457	-34,3407	- 26,4047	-15,3916	-0,6028
b	6,0981	6,7095	5,3686	3,4253	0,8972
c	-0,00676	-0,007598	-0,99629	-0,00393	-0,00132

В последующих опытах была изучена зависимость степени разложения серной кислоты с добавками формалина на катализаторе от концентрации и температуры. Термическому расщеплению подвергали растворы, содержащие от 1 до 10 % формалина в исходной кислоте. Результаты представлены на рис. 7, которые показывают, что увеличение содержания формалина в кислоте приводит к увеличению степени разложения во всем интервале изученных температур. Все кривые имеют явно выраженный максимум, положение которого смещается в сторону уменьшения температуры при увеличении массовой доли формалина в кислоте. При концентрации формалина 10 % максимум степени разложения составляет 79,28 % и приходится на 873 К, что выше на 36%, чем степень разложения серного ангидрида на катализаторе без восстановителя, а при содержании формалина 1 % максимум степени разложения 63,56 % для температуры 973К, что выше на 2,5%. Приведенные результаты подтверждают то, что формальдегид является эффективным восстановителем, смещающим равновесие реакции разложения  $\text{SO}_3$  в сторону образования  $\text{SO}_2$  в результате связывания кислорода и формальдегидом (1) и продуктами дегидрирования его на катализаторе (17.1).



**Рис. 7. Степень разложения серной кислоты с добавкой формалина в зависимости от температуры. Количество формалина:**  
1 - 10%; 2 - 8 %; 3 - 5 %; 4 - 1 %

Оптимальной температурой процесса восстановления  $\text{SO}_3$  в присутствии формалина является 873 К. Увеличение температуры опыта выше указанной приводит к снижению степени разложения серной кислоты до  $\text{SO}_2$ . Это объясняется сгоранием формалина при повышенной температуре в ходе реакции образования элементарной серы.

На полное разложение серной кислоты до  $\text{SO}_2$  теоретически требуется 12,34% формальдегида. Введение такого количества восстановителя в виде 40 % раствора формалина повлекло бы за собой разбавление кислоты до 68,04 %, увеличило объем кислого конденсата после разложения, увеличило затраты на проведение процесса.

Таким образом, имеющуюся ОСК, содержащую от 1 до 5% органических примесей,

целесообразнее разлагать постадийно: на первой стадии в условиях восстановительного термолитического расщепления серного ангидрида на 75–80 % с использованием катализатора - пиритного огарка в трубчатой печи при температуре 773–873К. Оставшееся количество серного ангидрида доразлагать на второй стадии в печи с традиционным использованием природного газа и воздуха на сжигание. Каталитическое расщепление обеспечивает ускорение процесса в 5,5–4,8 раза [7] в области температур 773–873К, а присутствие восстановителей повышает глубину расщепления серного ангидрида на 10–25% с образованием сернистого ангидрида с концентрацией 50–56%.

#### Библиографический список

1. Орлова, Е.Ю. Технология бризантных взрывчатых веществ: учебник для вузов / Е.Ю. Орлова. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1981. – 312 с.
2. Лебедев, Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза / Н.Н. Лебедев. – 3-е изд., перераб. – М.: Химия, 1981. – 608 с.
3. Ким, П.П. Плотность, вязкость и поверхностное натяжение сернокислотных растворов формальдегида / П.П. Ким [и др.] // Журнал прикладной химии. 1987. №4. С. 1404–1406.
4. Ким, П.П. Денитрация отработанной серной кислоты сернокислотным раствором уротропина и некоторые его физико-химические свойства / П.П. Ким [и др.] // Журнал прикладной химии. 1989. №1. С. 97–100.
5. Ким, П.П. Денитрация отработанной серной кислоты отходом переработки спирта-сырца и некоторые его физико-химические свойства / П.П. Ким, А.А. Перетрутов, Г.В. Пастухова // Химическая промышленность. 1998. №12. С. 34–36.
6. А. с. №1142161. Катализатор для термолитического расщепления серной кислоты / А.А. Перетрутов, П.П. Ким, Е.Н.Корнишина. Оpubл. Б.И. №8, 28.02.85.
7. Перетрутов, А.А. Использование пиритного огарка в качестве катализатора получения сернистого ангидрида из отработанной серной кислоты / А.А. Перетрутов, М.Н. Чубенко, П.П. Ким // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 2 (87). С. 214–221.
8. Стромберг, А.Г. Физическая химия / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко; под ред А.Г. Стромберга. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1988. – 496 с.
9. Карапетьянц, М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. – М.: Химия, 1968. – 472 с.
10. Когтев, С.Е. Исследование термического разложения серной кислоты, содержащей органические примеси / С.Е. Когтев [и др.] // Прикладная химии. 1986. Т. 59. № 4. С. 727–730.

Дата поступления  
в редакцию 23.01.2012

**A.A. Peretrutov, M.N. Chubenko, P.P. Kim**

### CATALYTIC DECOMPOSITION OF WASTE SULFURIC ACID CONTAINING ORGANIC IMPURITIES, ON CINDER PYRITE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The laws of reception of concentrated sulphurous anhydride by a thermolysis of waste sulfuric acid containing organic impurities, on the catalyst - roasted pyrite are investigated, the thermodynamic accounts of Gibbs function and equilibrium constants of reactions are lead depending on temperature. Are received and the results of reduction of sulphuric anhydride up to sulphurous hydrogen, white damp (II), methane, ammonia - products of dehydrogenation, removal of carbonyl group, deamination of organic impurities are compared.

*Key words:* waste sulphuric acid, anhydride sulfuric, reduction, anhydride sulphurous, cinder pyritic, catalysis heterogeneous, impurity organic, enthalpy, entropy, energy of the Gibbs, equilibrium constant, dehydrogenation, degree of decomposition, concentration of reactionary gas.

УДК 620.193.8

М.В. Челнокова, А.А. Калинина, Т.А. Аникина, Т.Н. Соколова, В.Р. Карташов

## РОЛЬ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА ПРИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ ЦИНКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Установлена коррозионная активность бактерий *Echerichia coli* 321-5, *Proteus vulgaris* 1212, *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>, *Staphylococcus aureus* 956, *Staphylococcus epidermidis* 1061 по отношению к цинку. Получены экспериментальные подтверждения схемы инициирования биокоррозии цинка с участием  $O_2^-$  и  $H_2O_2$  количественным определением  $H_2O_2$  в экссудате спектрофотометрически.

*Ключевые слова:* бактериальная коррозия, цинк, супероксидный анион-радикал.

Большинство металлов и промышленные изделия на их основе в средах, содержащих микроорганизмы, подвергаются глубокой деструкции. Среди сообщества микроорганизмов особое место занимают бактерии. Бактериальная коррозия вносит основной вклад в разрушение промышленных объектов, подверженных микробиологическим разрушениям.

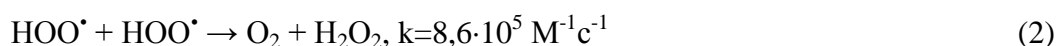
Биокоррозия начинается с образования на поверхности объекта биохимических структур, известных как биопленки. Клеточные метаболиты, в том числе коррозионно-активные, входящие в состав биопленки, могут играть решающую роль в инициировании биокоррозии на начальном этапе, когда наблюдается изменение рН культуральной среды и морфологии поверхности [1].

В настоящее время к числу наиболее активных деструкторов относят широкий круг веществ химической и биохимической природы, таких как органические и неорганические кислоты очень разнообразной номенклатуры, аммиак, ионы металлов, сорбированные биопленкой, полисахариды, аминопалисахариды, липиды и фосфолипиды, нуклеиновые кислоты, ряд ферментов и некоторые другие соединения.

К числу внеклеточных веществ, продуцируемых микроорганизмами, способных вызывать деструкцию металлов, относится супероксидный анион  $O_2^-$  – продукт одноэлектронного восстановления кислорода. Пути образования  $O_2^-$  *in vivo*, его роль в жизнедеятельности организмов и физико-химические свойства изучены достаточно детально и рассматриваются в ряде монографий и обзорных статьях [2–3].

Ранее в наших работах [4–5] было показано, что  $O_2^-$ , образующийся при жизнедеятельности микроскопических грибов, может переходить в околклеточную среду и выполнять роль инициатора физико-химических процессов, ведущих к глубокой деструкции металлов.

Известно, что  $O_2^-$  в водном растворе существует в виде равновесной смеси основания и сопряженной кислоты – гидропероксидного радикала. При  $pH > 7$  равновесие сдвинуто в сторону  $O_2^-$ , радикалы равновесной смеси в водных растворах быстро превращаются в устойчивые продукты в результате протекания двух параллельных реакций [2]:



В связи с этим важной прикладной задачей является установление механизма биокоррозии под действием бактерий и инициирующего агента для дальнейшего ингибирования процесса коррозии.

В качестве тест-организмов использовали музейные штаммы бактерий из числа

наиболее распространенных в естественной среде: *Echerichia coli* 321-5, *Proteus vulgaris* 1212, *Pseudomonas aeruginosa* 969, *Staphylococcus aureus* 956, *Staphylococcus epidermidis* 1061, которые были предоставлены Всероссийской коллекцией микроорганизмов (г. Пущино Московской обл.).

Объектом исследования выбран цинк, который широко используется в создании защитных покрытий на поверхности стали.

Образцы металлов предварительно шлифовали до получения гладкой поверхности и полировали до зеркального блеска. После этого их промывали водой, обезжировали поверхность тетрахлорметаном, затем этиловым спиртом, вторично промывали водой и высушивали. Стерилизацию образцов до и после экспозиции проводили фламбированием.

Выращивание бактериальных культур на плотной питательной среде (мясопептонный агар) осуществляли в суховоздушном термостате в чашках Петри при температуре  $37\pm 2^\circ\text{C}$  и влажности воздуха 90%. Засев на плотную питательную среду производили водной суспензией суточных культур бактерий, выращенных в пробирках на скошенном агаре. После чего на поверхность питательной среды помещали подготовленные металлические образцы, которые инкубировались в термостате при  $37\pm 2^\circ\text{C}$  до 90 суток. Контрольный эксперимент проводили в аналогичных условиях на плотной питательной среде, не зараженной микроорганизмами.

Характерные проявления микробиологической коррозии цинка наблюдаются спустя 24–48 часов с начала экспозиции в виде образования жидкой фазы (экссудата), имеющего основные свойства.

Из рис. 1 видно, что образование жидкой фазы наблюдалось лишь на отдельных участках поверхности и, в первую очередь, на торцах образцов. На остальной части в начальный период поверхности происходило лишь потускнение.



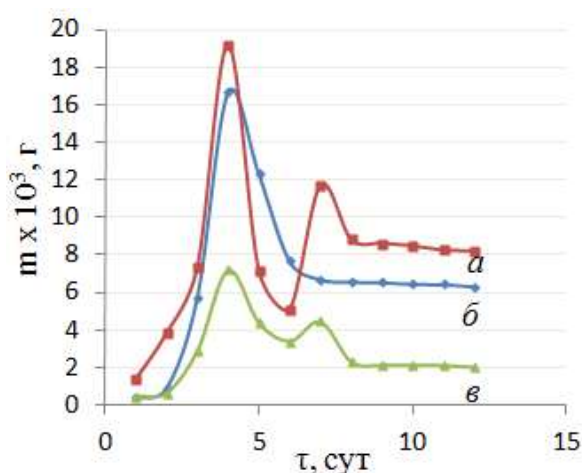
**Рис. 1. Внешний вид образцов цинка через трое суток под воздействием бактерий:**  
а - *Echerichia coli* 321-5; б - *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>

Динамика накопления экссудата и рост рН показаны на рис. 2, 3.

Значение рН возрастало в процессе биокоррозии, достигая значения 10,3 спустя 3–4 суток с начала экспозиции, количество экссудата также возрастало, достигая максимального значения примерно через 4 суток.

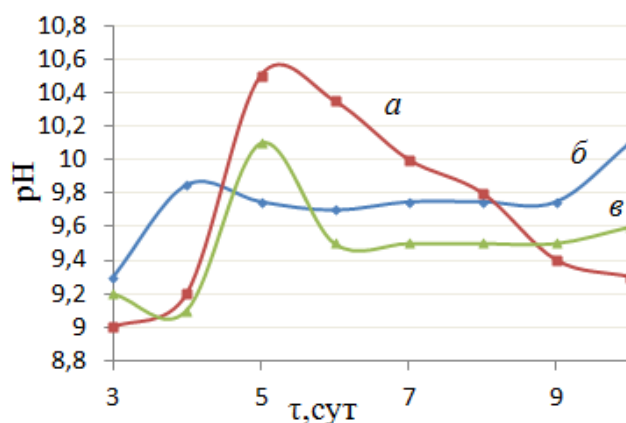
Разрушение металлической поверхности начинается с заселения бактериальными клетками участков, имеющих дефекты и структурные несовершенства. Начальный этап заселения завершается формированием биопленки, основу которой составляют внеклеточные полимерные вещества, образующие своего рода матрицу для жизнедеятельности микроорганизмов.

В экссудате после трех суток экспозиции методами качественного анализа с помощью реактива Несслера [6–9] был идентифицирован аммиак в виде свободного основания и иона аммония.



**Рис. 2. Зависимость накопления экссудата на поверхности цинка под воздействием бактерий:**

*а* - *Echerichia coli* 321-5; *б* - *Staphylococcus aureus* 956; *в* - *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>



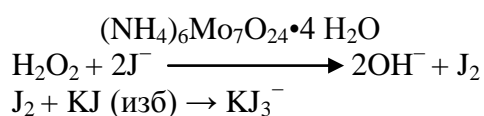
**Рис. 3. Зависимость pH экссудата на поверхности цинка от времени экспозиции при воздействии бактерий:**

*а* - *Echerichia coli* 321-5; *б* - *Staphylococcus aureus* 956; *в* - *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>

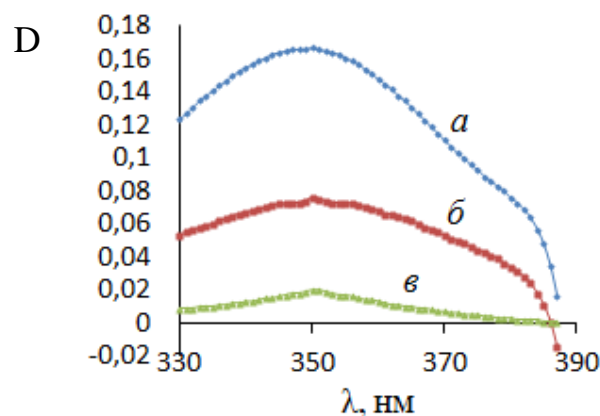
Качественный анализ химического состава экссудата, с использованием стандартных реакций на ионы калия и натрия [7–9], показал наличие в нем катионов Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>. В то же время в экссудате не обнаруживаются ионы цинка при использовании в качестве реагентов дитизона и гексацианоферрата (II) калия [7].

Важным компонентом экссудата является пероксид водорода. Его присутствие доказано качественными реакциями с титановой кислотой и берлинской лазурью [10-11], а также спектроскопическим методом по полосе поглощения J<sub>3</sub><sup>-</sup> (λ = 350 нм).

Количество пероксида водорода (мкмоль/л) определяли спектрофотометрически в экссудате, объем которого составлял 0,1 мл и который был собран с поверхности нескольких образцов цинка. Метод основан на восстановлении пероксида водорода большим избытком иодида калия в щелочной среде при катализе гетерополикислотой (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>•4 H<sub>2</sub>O [12]:

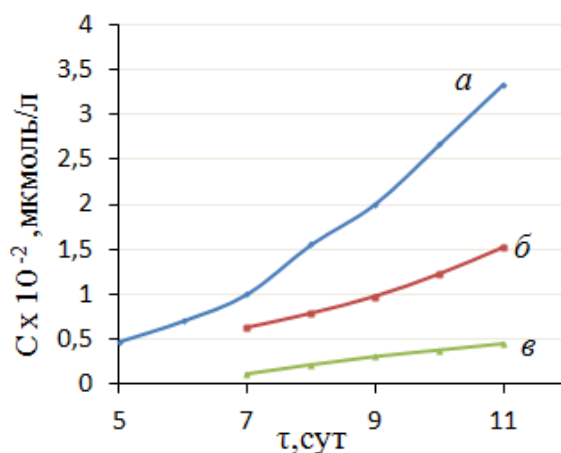


УФ-спектр поглощения J<sub>3</sub><sup>-</sup> имеет характерную полосу поглощения с максимумом при 350 нм (рис. 4).



**Рис. 4. УФ – спектры поглощения  $J_3^-$ , образующемся при восстановлении КЖ:**  
*a - Pseudomonas aeruginosa 9691; б - Echerichia coli 321-5; в - Staphylococcus aureus 956*

На рис. 5 представлено изменение концентраций  $H_2O_2$  в экссудате в зависимости от рода бактерии и времени экспозиции.



**Рис. 5. Изменение концентрации  $H_2O_2$  в жидком экссудате на поверхности цинка под воздействием бактерий:**  
*a - Pseudomonas aeruginosa 9691; б - Echerichia coli 321-5; в - Staphylococcus aureus 956*

Как видно из графических данных, представленных на рис. 5, количество  $H_2O_2$ , образующегося в экссудате, очень сильно зависит от вида бактерий. Кроме того, в отличие от кинетики накопления количества гидроксильных ионов с экстремальной зависимостью (рис. 3) рост концентрации пероксида водорода описывается монотонно возрастающей функцией.

Следует отметить, что зависимость накопления  $H_2O_2$  от природы микроорганизма иная чем при накоплении гидроксильных ионов. Если по способности образовывать гидроксильные ионы в экссудате бактерии располагаются в ряд *Echerichia coli 321-5* > *Staphylococcus aureus 956* > *Pseudomonas aeruginosa 9691*, то по способности генерировать  $H_2O_2$  *Echerichia coli 321-5* и *Pseudomonas aeruginosa 9691* меняются местами.

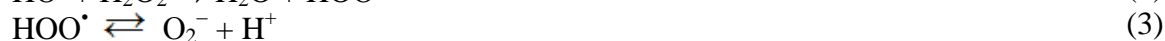
Накопление уже на ранних стадиях экспозиции коррозионно-активного  $H_2O_2$  может приводить к существенным деструктивным изменениям поверхности.

Коррозионный эффект  $H_2O_2$ , по-видимому, связан с процессом разложения  $H_2O_2$  при акцептировании электрона из объема металла по схеме аналогичной реакции Фентона:

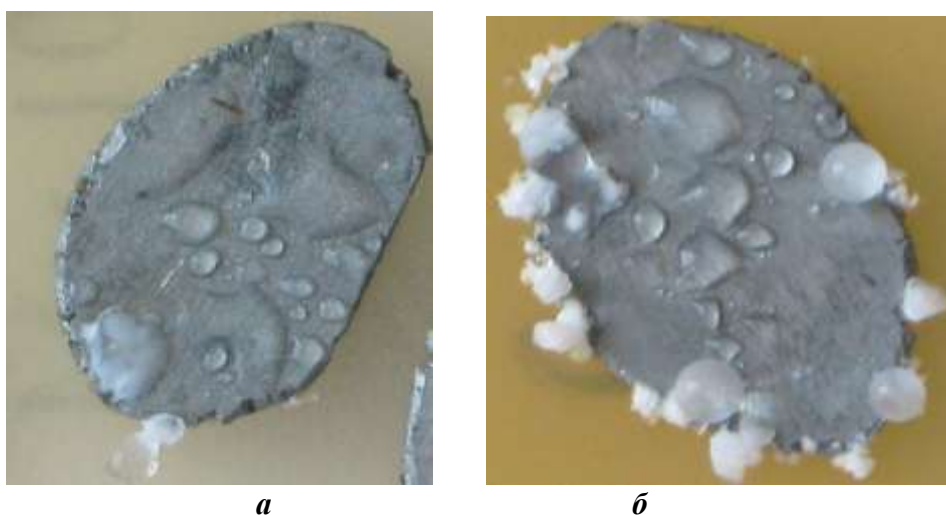


В подтверждении этой схемы можно привести следующие данные. В 1984 г. Фентоном [13] было установлено, что  $H_2O_2$  в присутствии каталитических количеств солей железа

является очень мощным окислителем органических соединений. В настоящее время окислительная система  $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{Fe}^{2+}$  называется *реактивом Фентона*. Позднее Габер и Вейсс (1934 г.) обосновали, что высокая окислительная способность реактива Фентона обусловлена супероксидным анионом  $\text{O}_2^-$  и радикалом  $\text{HO}^\bullet$ , которые образуются в следующем каталитическом цикле [2, 14]:



При увеличении времени экспозиции происходит снижение pH, которое сопровождается частичным переходом экссудата в гелеобразное состояние (рис. 6), а при длительной экспозиции (20 и более суток) в консистенцию полутвердого продукта (рис. 7).



**Рис. 6. Внешний вид образцов цинка (стадия гелеобразования):**

*a* – стадия гелеобразования под воздействием бактерии

*Staphylococcus aureus* 956 спустя 10 суток; *б* – стадия кристаллизации продуктов коррозии спустя 30 суток под воздействием *Staphylococcus aureus* 956;

После двухмесячной экспозиции, цинк, на поверхности которого наблюдали особенно интенсивное накопление экссудата, покрывался продуктами коррозии в виде рыхлого объемного осадка, состоящего из оксидных и гидроксидных соединений, идентифицированных по стандартным методикам, и органической фракции (80%) [15].

### Выводы

1. Установлена коррозионная активность бактерий *Echerichia coli* 321-5, *Proteus vulgaris* 1212, *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>, *Staphylococcus aureus* 956, *Staphylococcus epidermidis* 1061 по отношению к цинку.

2. Показано, что коррозионный процесс начинается с формирования на отдельных участках поверхности металла жидкого экссудата с основными свойствами. В ряду микроорганизмов выявлена корреляция между коррозионной активностью и способностью к образованию и накоплению на поверхности цинка жидкого экссудата: *Echerichia coli* 321-5 > *Staphylococcus aureus* 956 > *Pseudomonas aeruginosa* 969<sub>1</sub>.

3. Спектрофотометрически определено количественное содержание пероксида водорода в экссудате.

## Библиографический список

1. **Davey, M. E.** Microbial Biofilms: from Ecology to Molecular Genetics / M.E. Davey, G.A. O'Toole // *Microbiology and Molecular Biology Reviews* Dec. 2000. V. 64. No. 4. P. 847–867.
2. **Bielski, B.H.J.** Reactivity of HO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub><sup>-</sup> Radicals in Aqueous Solution / B.H.J. Bielski, D.E. Cabelli, R.L. Arudi, A.B. Ross // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1985. V. 14. № 4. P. 1041–1100.
3. **Rich, P.R.** The sites of superoxide anion generation in higher plant mitochondria / P.R. Rich, W.D. Bonner // *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 1978. V. 188. № 1. P. 206–213.
4. **Белов Д.В.** Коррозия алюминия и его сплавов под воздействием микроскопических грибов / Д.В.Белов [и др.] // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. № 9. С. 36–41.
5. **Смирнов, В.Ф.** Микробиологическая коррозия материалов на основе алюминия / В.Ф. Смирнов, Д.В. Белов, Т.Н. Соколова // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2008. Т. 44. № 2. С. 213–218.
6. **Борисова, О. М.** Химические, физико-химические и физические методы анализа / О.М. Борисова, В.Д. Сальников. – М.: Металлургия, 1991. – 296 с.
7. **Столяров, К. П.** Руководство по микрохимическим методам анализа: учеб. пособие / К.П. Столяров. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 248 с.
8. **Алексеев, В. Н.** Курс качественного химического полумикроанализа / В. Н. Алексеев; под ред. П. К. Агасяна. – М.: Химия, 1973. – 584 с.
9. **Кунце, У.** Основы качественного и количественного анализа / У. Кунце, Г. Шведт. – М.: Мир, 1997. – 625 с.
10. **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.
11. **Reichert, J.S., McNeight, S.A., Rudel, H.W.** // *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 1939. V. 11. P. 194–197.
12. **Allen, A.O.** Decomposition of water and aqueous solutions under mixed fast neutron and gamma radiation / A.O. Allen [et al.] // *J. Phys. Chem.* 1952. V.56(5). P. 575
13. **Fenton, H.J.** Oxidation of tartaric acid in the presence of iron // *J. Chem. Soc. London*. 1984. V.65. P. 899–910.
14. **Sawyer, D.T.** The chemistry of superoxide ion / D.T. Sawyer, M.J. Gibian // *Tetrahedron*. 1979. V. 35. P. 1471–1481.
15. **Кирхнер, Ю.** Тонкослойная хроматография: в 2 т.: [пер. с англ. Д.Н. Соколова] / Ю. Кирхнер; под ред. В.Г. Березкина. – М.: Мир, 1981. Т. 1. – 616 с., Т. 2. – 523 с.

Дата поступления  
в редакцию 02.02.2012

M.V. Chelnokova, A.A. Kalinina, T.A. Anikina, T.N. Sokolova, V.R. Kartashov

## THE ROLE OF HYDROGEN PEROXIDE IN BACTERIAL CORROSION OF ZINC

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** Identification of physical and chemical phenomena on metal surfaces in contact with bacteria and their relation to corrosion processes in the initial stages. Quantitative determination of hydrogen peroxide in the exudate, which is formed on the metal surface with biocorrosion under the action of bacteria.

**Design/methodology/approach:** The concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the exudates collected from the surface of 10 samples of zinc was determined spectrophotometrically at the absorption band of J3-(λ = 350 nm) formed in the recovery of hydrogen peroxide in alkaline solution of potassium iodide.

**Research:** limitations/implications It is possible, for example, for the development of physical-chemical bases of biocorrosion and the establishment of the scheme of its initiation.

**Originality/value:** It is established that the main character of the exudate is determined by chemical transformations of superoxide ion, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, produced by the bacteria into the extracellular medium. The ability of bacteria to allocate from the cells O<sub>2</sub> confirmed by quantification of exudates by UV spectroscopy of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as a product of chemical reactions of O<sub>2</sub><sup>-</sup> in the aquatic environment.



УДК 621.355.8.035

М.В. Аксютёнок, Ю.Л. Гунько, О.Л. Козина, М.Г. Михаленко

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ГИДРОКСИДА ЛИТИЯ НА ПРОЦЕСС ОКИСЛЕНИЯ КАДМИЯ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЁМЕ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА**

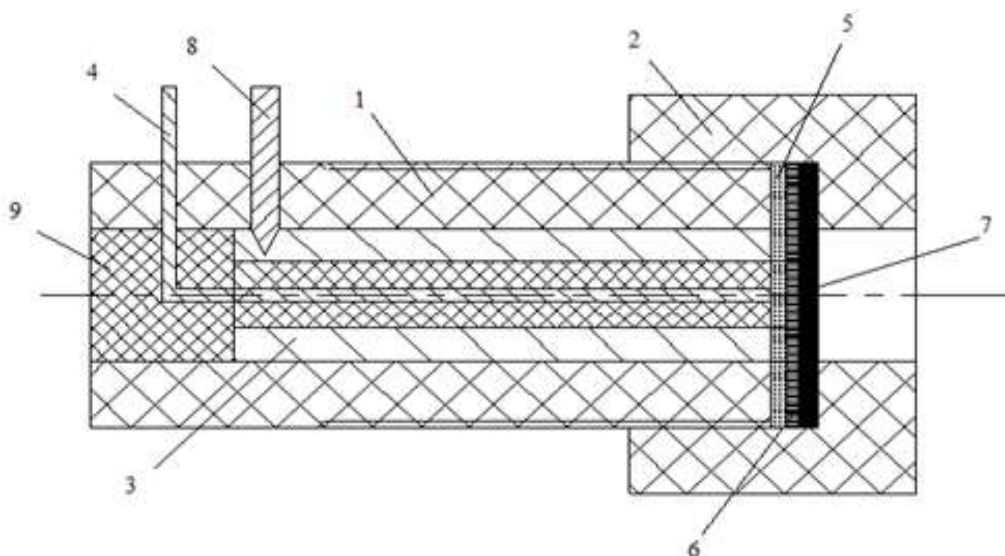
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведен анализ хронопотенциометрических зависимостей окисления кадмия в щелочном электролите без добавки и с добавкой гидроксида лития, снятых на экспериментальной тонкослойной ячейке. Определены коэффициенты диффузии и концентрации кадмат-ионов. С применением метода фарадеевского импеданса изучены свойства образующихся на кадмии твёрдофазных слоёв.

*Ключевые слова:* кадмиевый электрод, гидроксид лития, тонкослойная ячейка, хронопотенциометрия, импедансные измерения.

Одной из наиболее часто рекомендуемых к введению добавок в электролит никель – кадмиевых аккумуляторов является гидроксид лития. Введение гидроксида лития в электролит щелочного аккумулятора увеличивает ёмкость и срок службы аккумулятора при обычных температурах и удлиняет рабочий интервал в сторону высоких температур [1, 2]. Данная добавка может оказать влияние на процесс окисления кадмия в щелочном электролите.

Для выяснения параметров процесса окисления кадмия и влияния на него добавки гидроксида лития, в условиях ограниченного объема электролита, характерных для разряда пористого кадмиевого электрода никель-кадмиевого аккумулятора, были проведены хронопотенциометрические исследования с использованием тонкослойной ячейки (рис. 1). Ограниченный объем электролита у поверхности кадмиевого электрода создавался с помощью высокопористого капронового сепаратора, а диффузионные затруднения из внеэлектродного пространства обеспечиваются за счет нескольких слоёв гидратцеллюлозной сепарации.

**Рис. 1. Тонкослойная ячейка:**

1 – тефлоновый цилиндр; 2 – тефлоновая гайка; 3 – рабочий кадмиевый электрод; 4 – кадмиевый электрод сравнения; 5 – высокопористый сепаратор; 6 – гидратцеллюлозная сепарация; 7 – металлокерамический фильтр; 8 – латунный токоподвод; 9 – изолятор

На полученных анодных хронопотенциограммах можно выделить четыре области (рис. 2).

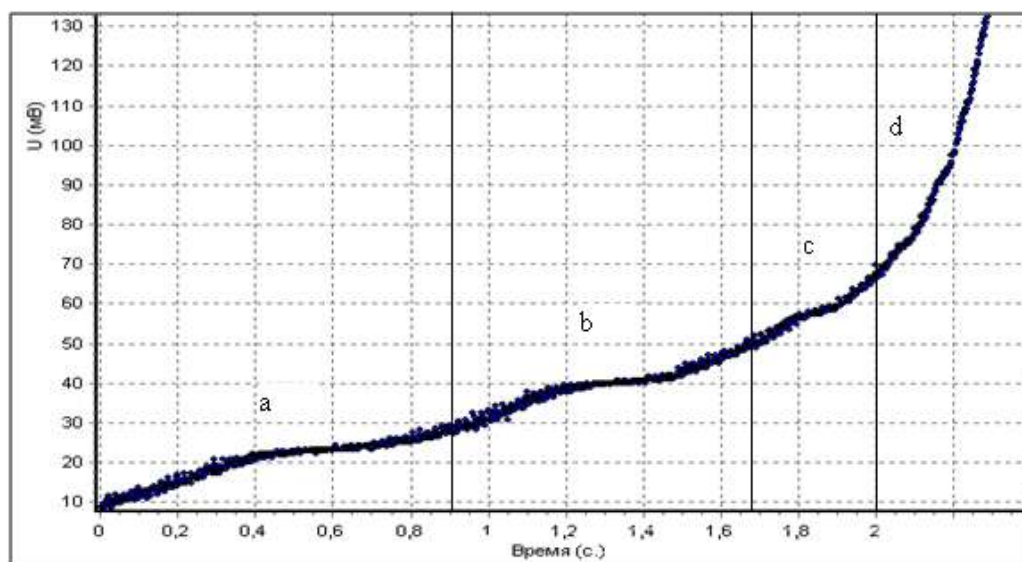
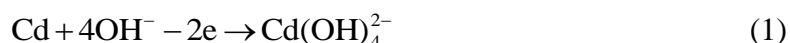


Рис. 2. Зависимость поляризации кадмиевого электрода от времени при постоянной плотности тока. Электролит 6,25 М NaOH

На первом участке *a* вероятнее всего протекает реакция окисления кадмия с образованием растворимых гидросокомплексов:



При достижении определенной степени пересыщенности раствора по кадмат-ионам (участок *b*) начинает протекать реакция разложения пересыщенного кадматного раствора с образованием  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ :



Появление третьей *c* задержки потенциала может быть связано, согласно [3, 4], с протеканием окисления кадмия по твердофазному механизму.

Четвёртый участок *d* отвечает переходу в область пассивного состояния.

Переходное время для катодных процессов в ограниченной области диффузии описывается зависимостью [5]:

$$\tau_{\text{пер}} = \frac{nFAIC_{\text{ox}}}{i} - \frac{l^2}{3D_{\text{ox}}} \quad (3)$$

где  $n$  – количество электронов участвующих в суммарной реакции;

$C_{\text{ox}}$  – концентрация окисленной формы вещества, моль/см<sup>3</sup>;

$A$  – площадь исследуемого электрода, см<sup>2</sup>;

$i$  – ток, А;

$F$  – число Фарадея;

$l$  – толщина слоя электролита у поверхности электрода (в нашем случае она принималась равной толщине капронового сепаратора), см;

$D$  – коэффициент диффузии окисленной формы вещества, см<sup>2</sup>/с.

В случае анодного окисления кадмия, а также с учётом характеристик щелочестойкого капрона, используемого для создания ограниченной области диффузии, выражение для переходного времени окисления кадмия будет иметь вид:

$$\tau_{\text{пер}} = \frac{nFl(\Delta C)}{2j} + \frac{l^2}{1.5D_{\text{ox}}}, \quad (4)$$

где  $j$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>;

$\Delta C$  – разность пересыщенной и равновесной концентрации кадмат-ионов.

Для того чтобы определить, в какой области переходных времён применимы уравнения для тонкослойной ячейки, была предварительно оценена величина  $\tau_{\text{пер}}$  из уравнения распространения диффузионной волны по уравнению (5) [6]:

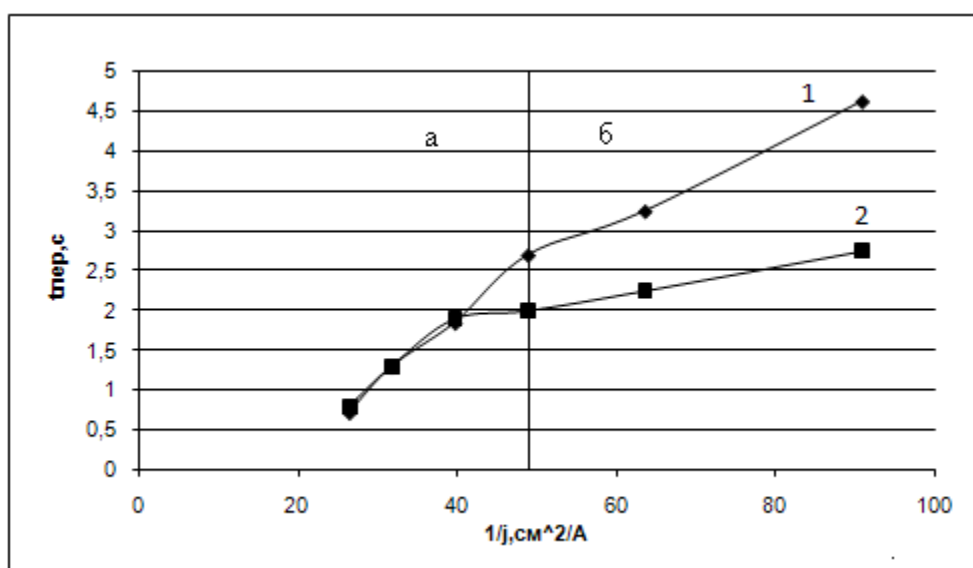
$$\tau_{\text{пер}} = \frac{\delta^2}{2 \cdot D}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина диффузионного слоя, в нашем случае равного толщине капронового сепаратора;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

Полученное значение  $\tau_{\text{пер}}$  составляет 2–5 с при использовании значений коэффициентов диффузии, приведенных в [7].

На зависимостях, построенных в координатах  $\tau_{\text{пер}}$  от  $1/j$ , можно выделить два участка (рис. 3).



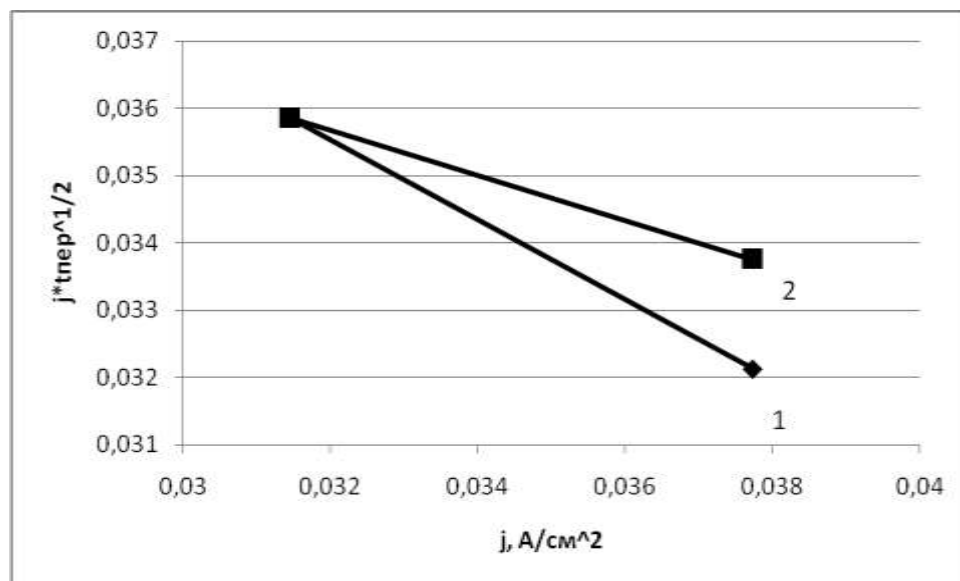
**Рис. 3. Зависимость  $\tau_{\text{пер}}$  окисления кадмия от  $1/j$ . Электролит:**  
1 – NaOH 6,25 М; 2 – NaOH 6,25 М с добавкой 10 г/л LiOH·H<sub>2</sub>O

В области высоких плотностей тока и соответственно малых переходных времен *a* скорость процесса вероятнее всего подчиняется законам полубесконечной диффузии, второй участок *б* соответствует области ограниченной диффузии. Дальнейшие исследования окисления кадмия в условиях минимального объёма электролита проводились в области плотностей тока, соответствующей области ограниченной диффузии.

Рассчитанные по уравнению (4) концентрации кадмат-ионов в приэлектродном слое составили: в электролите 6,25 М NaOH –  $3,17 \cdot 10^{-2}$  моль/л, а в электролите с добавкой LiOH·H<sub>2</sub>O –  $1,23 \cdot 10^{-2}$  моль/л. Коэффициент диффузии кадмат-ионов в электролите без добавки составил  $40 \cdot 10^{-5}$   $\text{см}^2/\text{с}$ , а в присутствии добавки гидроксида лития  $13 \cdot 10^{-5}$   $\text{см}^2/\text{с}$ .

Полученные коэффициенты диффузии кадмат-ионов аномально высоки по сравнению с приводимыми в литературе [7]. Это может указывать на протекание химической реакции разложения образующегося пересыщенного кадматного раствора, в результате чего и происходит быстрая убыль концентрации кадмат-ионов в зоне реакции.

Возможность протекания такой химической реакции подтверждается наклоном хронопотенциометрической зависимости, построенный в координатах  $j - j\sqrt{\tau}$  в области полубесконечной диффузии (рис. 4).

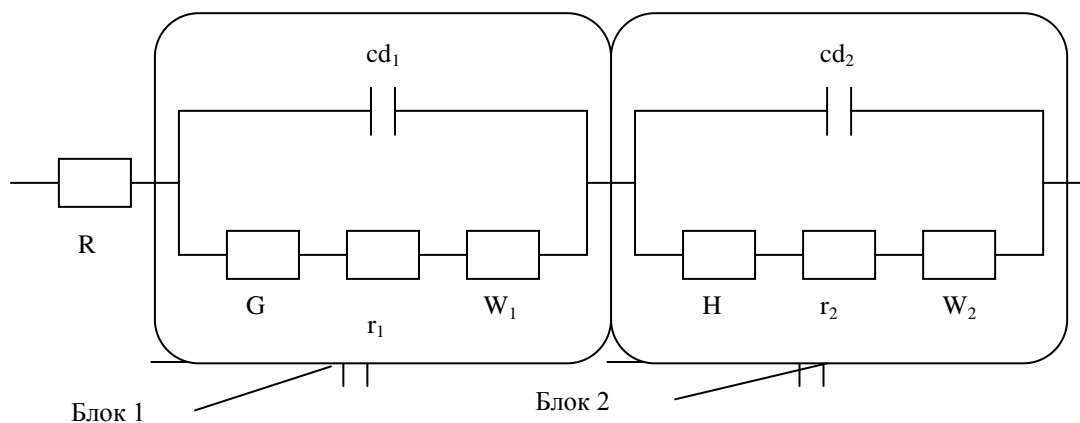


**Рис. 4. Зависимость  $j\sqrt{\tau}$  от  $j$  в области полубесконечной диффузии:**

1 – электролит 6,25 М NaOH; 2 – электролит 6,25 М NaOH с добавкой LiOH · H<sub>2</sub>O

В результате разложения пересыщенного раствора на поверхности кадмиевого электрода происходит образование твердофазных слоёв. Свойства образующихся на кадмии твердофазных слоёв исследовались методом фарадеевского импеданса.

Для импедансных измерений применялся импедансметр модели Z-500P. Обработка результатов проводилась в программе IMPEDANS по методике, приводимой в [8]. Наиболее точно полученные экспериментальные данные моделируются эквивалентной схемой (рис. 5).



**Рис. 5. Эквивалентная схема, границы электрод-раствор:**

$R_{p-ра}$  – сопротивление электролита между рабочим и вспомогательным электродами;  
 $cd_1$  и  $cd_2$  – емкости двойных электрических слоёв на границах металл/плотная плёнка и плотная плёнка/электролит;  $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления слоёв продуктов окисления кадмиевого рабочего электрода;  $W_1$  и  $W_2$  – импеданс Варбурга (сопротивление диффузионного процесса);  
 $G$  – импеданс Гершера (сопротивление гомогенной химической реакции);  
 $H$  – импеданс Хайкина (сопротивление гетерогенной химической реакции)

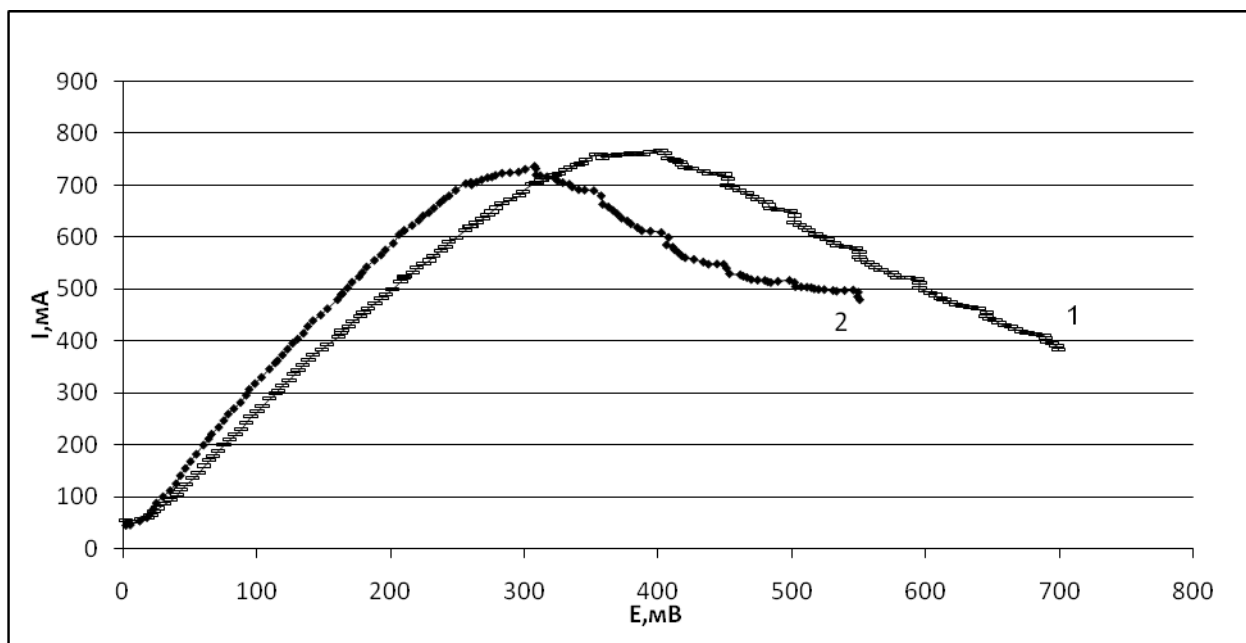
Эквивалентная схема состоит из двух последовательно соединённых блоков. Блок 1, по нашему мнению, отвечает рыхлой внешней плёнке Cd(OH)<sub>2</sub>, а блок 2 отвечает плотной внутренней плёнке CdO.

Как видно из схемы, после прохождения стадии ионизации кадмия, образующиеся ионы диффундируют к границе плотная плёнка/электролит ( $W_2$ ) с последующей химической

реакции образования кадмат-ионов (H). Образовавшиеся кадмат-ионы диффундируют в порах рыхлой плёнки к границе раздела рыхлая плёнка/электролит ( $W_2$ ) с последующем протеканием химической реакции их разложения (G).

Полученные сопротивления пассивирующих твёрдофазных плёнок, образующихся на кадмии в 6,25 М растворе NaOH, составили  $2 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ , а с добавкой гидроксида лития  $5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ .

Большее сопротивление поверхностных плёнок в присутствии добавки гидроксида лития приводит к уменьшению анодной активности кадмия (рис. 6).



**Рис. 6. Хроновольтамперометрическая зависимость окисления кадмия при скорости развёртки потенциала 2500 мВ/с:**  
1 – 6,25 М NaOH; 2 – 6,25 М NaOH с добавкой LiOH·H<sub>2</sub>O

На это указывает некоторое снижение токов анодного окисления кадмия и уменьшение площади, ограничиваемой хроновольтамперометрической кривой. В результате наработка кадмат-ионов идёт с меньшей скоростью, что подтверждается данными по концентрациям, полученным из хронопотенциометрических исследований. Снижение концентрации образующихся кадмат-ионов вызывает уменьшение скорости распада комплексов и приводит к уменьшению эффективного коэффициента диффузии кадмат-ионов в растворах, содержащих добавку гидроксида лития.

Таким образом, процесс анодного окисления кадмия сопровождается образованием пересыщенных кадматных растворов и зависит от свойств образующихся твёрдофазных слоёв.

#### Библиографический список

1. Дасоян, М.А. Производство электрических аккумуляторов / М.А. Дасоян, В.В. Новодерёжкин, Ф.Ф. Томашевский. – М.: Высш. шк., 1977. – 381 с.
2. Прикладная электрохимия / под ред. А.П. Томилова. – М.: Химия, 1984. – 520 с.
3. Farr J.P., Hampson N.A. Electrochem. Technol. 1968. V. 6. № 1–2. P. 10.
4. Groft J.T., Tuomi D. J. Electrochem. Soc. 1961. V. 108. №10. P. 915–922.
5. Галюс, З. Теоретические основы электрохимического анализа / З. Галюс. – М.: Мир, 1974. – 552 с.
6. Феттер, К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М.: Химия, 1967. – 856 с.

7. **Объедков, Ю.И.** Дисс. ... канд. хим. наук. Саратов, 1976. – 166 с.
8. **Москвичев, А.Н.** / Москвичев А.Н., Бенсон В.В., Москвичев В.Н. // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 1994. № 3. С. 119–125.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**M.V. Aksyutenok, Yu.L. Gunko, O.L. Kozina, M.G. Mikhalenko**

**EFFECT OF ADDITIVE LITHIUM HYDROXIDE ON OXIDATION PROCESS  
OF CADMIUM IN ALKALINE SOLUTION LIMITED VALUE**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a R.Y. Alekseev

**Purpose** The study of the reasons of influence lithium hydroxide entered into alkaline batteries solution on working capacity of cadmium electrode.

**Methodology** Conductivity research using to thin-layer cell by the methods of chronopotentiometry, hronovoltamperometriya and the Faraday impedance.

**Findings** The concentrations and diffusion coefficients of cadmium ions in the process of cadmium anodic oxidation are defined.

**Conclusions** It was demonstrated that the lithium hydroxide introduction affects on the conductivity of the surface layers of cadmium oxidation products.

*Key words:* cadmium electrode, lithium hydroxide, thin-layer cell, chronopotentiometry, impedance methods.

УДК: 541.12; 541.075

В.И. Наумов

**ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
В ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛАХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Атомы переходных металлов содержат димеры М-М, в которых металлы связаны между собой ковалентными связями. Наибольшей прочностью и температурами плавления обладают металлы, димеры которых связаны пятерной (Nb, Tc, Ta, Re) и шестерной (W и Mo) связями. Химические связи не являются стационарными и в металле непрерывно происходят переключения связей между соседними атомами, что приводит к возникновению колебательной системы, природа которой принципиально отличается от тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Рассмотрена возможная причина образования димеров и проведена оценка частот переключений химических связей и энергии активации процесса образования-разрушения связей. Показана роль димеров в обеспечении прочностных и диффузионных характеристик металлов, увеличения пластичности металлов при высоких и хрупкости - при низких температурах и влияния примесей на хладоломкость металлов.

*Ключевые слова:* металлы, димеры, переключения связей, колебательные системы, энергии активации.

Экспериментальные исследования кинетики разрушения твердых тел показали, что ключевым является процесс, приводящий нагруженное тело к разрыву, который состоит из последовательных элементарных актов разрыва межатомных связей локальными тепловыми флуктуациями энергии [1, 2]. Кинетическая теория прочности [2], разработанная для условий внешних механических воздействий, оставила нерешенными ряд вопросов: какова природа, кратность и направленность межатомных связей в металлах, а также возможность и частота переключения их между соседними атомами кристаллической решетки.

Согласно Фриделю [3, с. 373–443], в переходных металлах *s*- и *d*-зоны перекрываются, а сама *d*-зона расщепляется на две - связывающую и расщепляющую, которые на кривой плотности состояний  $N(E)$  разделены глубоким минимумом. Само расщепление никак не связано с кристаллическим полем, т.е. с конкретной кристаллической структурой. На этой основе, в [4] были определены порядки связи (ПС) в молекулах М-М для *d* – металлов IV-VI периодов, а также было установлено, что атомы переходных металлов в кристаллических решетках связаны между собой ковалентными связями и большой вклад 50-60 % в энергию решеток вносят парные взаимодействия М-М. Из [4] следует, что вклады энергий связей М-М в энергию сублимации растут при переходе от *d* - металлов IV периода  $(E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{сред}} = 0,43$  к V (0,48) и *d* - металлам VI периода  $(E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{сред}} = 0,59$ . Было установлено, что теплоты сублимации и температуры плавления *d* - металлов определяются порядками химической связи в молекулах  $M_2$  и наибольшей прочностью обладают металлы, димеры которых связаны пятерной (Nb, Tc, Ta, Re) и шестерной (W и Mo) связями [4] (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что зависимости энергий связи М-М ( $E_{\text{св}}$ ) и температур плавления при движении по периоду для *d* - металлов IV и VI периодов существенно отличаются. В VI периоде все зависимости имеют куполообразный вид с максимумом, соответствующим W. В IV периоде обсуждаемые зависимости, в том числе и порядки связи М-М [4], характеризуются двумя максимумами, приходящимися на V и Ni, которые разделены минимумом рассматриваемых характеристик, соответствующих Mn.

Из рис. 1 следует, что между энергиями связи ( $E_{\text{св}}$ ) двухатомных молекул и температурами плавления наблюдается достаточно хорошее соответствие, что в совокупности с данными [4] свидетельствует о том, что димеры играют существенную роль в обеспечении прочностных и термических свойств металлов [6].

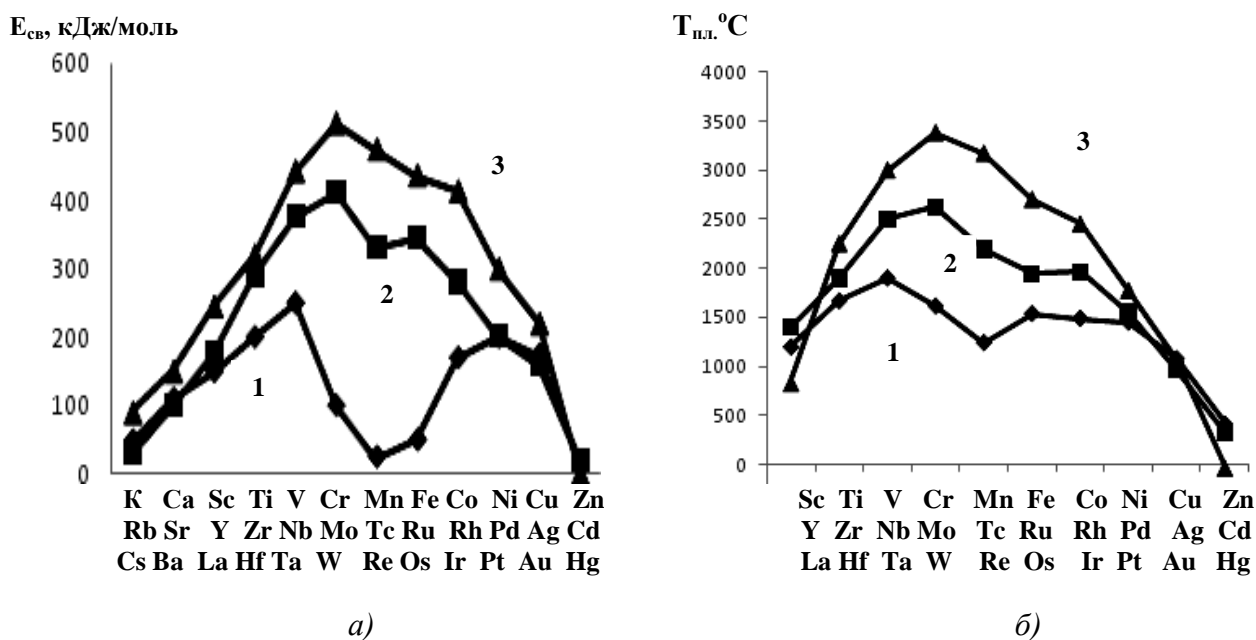


Рис. 1. Зависимости  $E_{св}$  Ме-Ме (А) и  $T_{пл}$  °С (Б)  $d$ -металлов IV (1), V (2) и VI (3) периодов

В этом плане интересно сравнить данные по порядкам связи (ПС), полученные расчетным путем для систем  $M_2$  в чистых  $d$ -металлах VI периода (рис. 2, а) [4] и экспериментальными данными по адсорбции  $5d$ -металлов на поверхности вольфрама (рис. 2, б) [7]. Из рис. 2, а следует, что порядки связи, определенные в [4] для  $d$ -металлов VI периода, характеризуются максимумом, приходящимся на вольфрам (ПС=6).

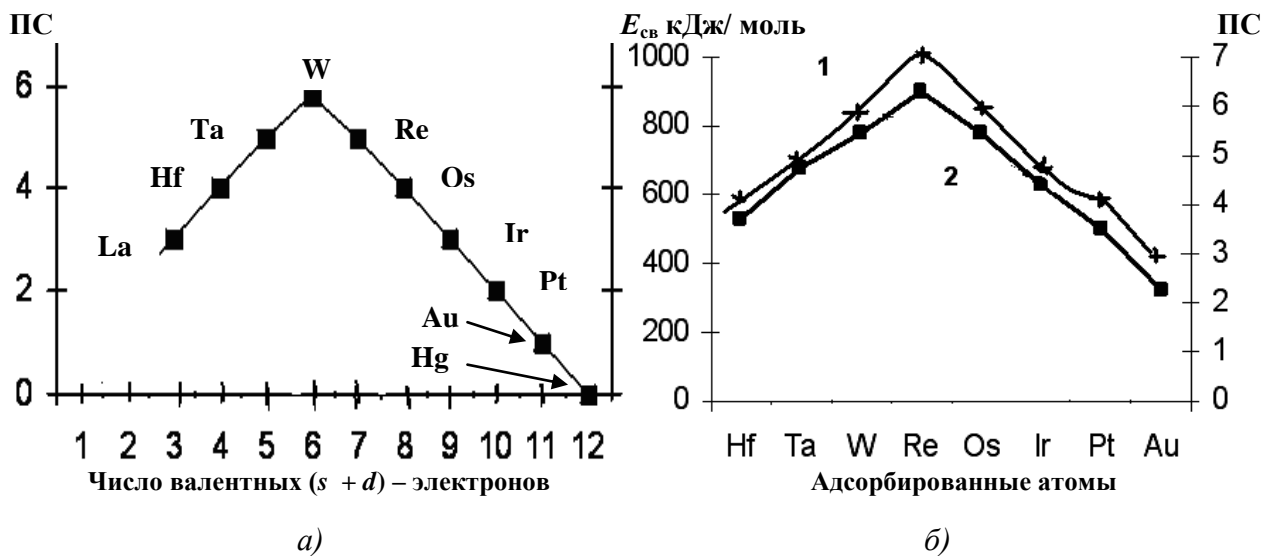


Рис. 2. Зависимость ПС от числа валентных электронов для металлов VI периода (а); Порядки (1) и энергии (2) связи адсорбированных атомов  $5d$ -металлов на W (б)

Из рис. 2, б следует, что экспериментальная зависимость энергии связи систем адсорбированный атом  $M_i$  – W (кр.2) также проходит через максимум, соответствующий системе адсорбированный атом рения – вольфрам (подложка) и которому отвечает самый высокий порядок связи, равный семи [7].

Представленные на рис. 2, б данные ценны тем, что один из взаимодействующих атомов при взаимодействии всегда остается постоянным (W) и прочность связи определяется только числом валентных электронов адсорбированного атома. Это связано с тем, что взаи-

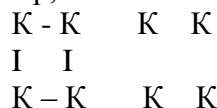


модействие адсорбированной частицы с металлом-подложкой носит в значительной мере «коллективный» характер в том смысле, что адсорбированная частица взаимодействует со всей электронной системой металла, а не с отдельным атомом поверхности [8]. Поэтому и следует ожидать увеличения энергии связи при адсорбции вдоль периодической таблицы от гафния с конфигурацией  $5d^26s^2$  и четырьмя связывающими электронами, к рению ( $5d^56s^2$ ) с семью связывающими электронами. При дальнейшем смещении от рения к осмию, платине и золоту энергия связи убывает, так как дополнительные  $d$  – электроны являются разрыхляющими. Если сравнить данные рис. 2, а, б можно видеть, что порядки связи для систем W-W (молекула) и  $W_{\text{адс}} - W_{\text{подл}}$  одинаковы и в обоих случаях равны шести.

Таким образом, ясно, что в металлах димеры играют существенную роль в обеспечении многих, в том числе и прочностных характеристик.

При обсуждении взаимодействий между атомами (ионами) металла в решетке в литературе, например [9], в основном рассматриваются два механизма связи: с участием коллективизированных электронов и ионов и локализованных электронов, образующих ковалентные связи с соседними атомами кристаллической решетки. В последнем случае, число одинарных ковалентных связей зависит от типа кристаллической решетки и координационное число для металлов, как правило, равно 8 или 12. В литературе практически не затрагивались вопросы возможности образования димеров, как отдельных структурных единиц в объеме металла, и возможность переключения химических связей между соседними атомами в решетке.

Впервые о возможности образования димеров заговорил Полинг [10] при обсуждении резонансных связей в металлах. Его рассуждения сводились к тому, что, например в Ca, на каждый атом приходится два валентных электрона, и это позволяет каждому атому образовывать две связи с соседним атомом. Такие связи резонируют между соседними атомами, создавая общую связывающую силу в металле. Аналогичным образом у скандия с его тремя валентными электронами связь в три раза прочнее, и так до хрома, обладающего шестью валентными электронами и имеющими в шесть раз более прочные связи, чем в системе К-К. По Полингу [10], связи постоянно переключаются (резонируют) между соседними атомами, например, по схеме:



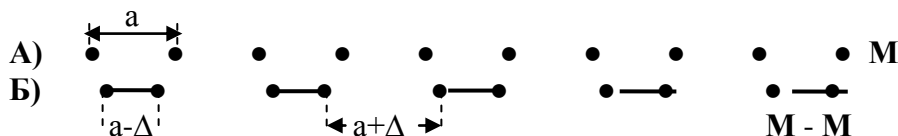
Резонанс между такими структурами обеспечивает более высокую стабильность металла по сравнению с кристаллом, состоящим из отдельных молекул  $\text{K}_2$  [10].

Наличие димеров  $\text{M}_2$  в  $d$  – металлах поставило следующие вопросы, требующие своего разрешения: 1) причины, приводящие к их возникновению димеров; 2) как и за счет чего держится кристаллическая решетка металла? 3) возможны ли переключения связей между соседними димерами или димерами и отдельными атомами в решетке? 4) как влияет температура на количество димеров и скорость переключения связей? 5) какова роль димеров в обеспечении прочностных и диффузионных характеристик металла?

Рассмотрим одну из возможных причин, которая может привести к образованию молекул М-М в твердом теле. Для этого рассмотрим наиболее простой случай одномерной цепочки, состоящей из одного сорта атомов. Цепь, состоящая из отдельных атомов, находящихся на расстоянии «а» друг от друга (ряд «А» на схеме ниже), и имеющих валентные электроны будет стремиться формировать молекулы  $\text{M}_2$ , чтобы понизить энергию системы (ряд «Б» схемы). При образовании химической связи атомы сближаются друг с другом на расстояние  $(a - \Delta)$ , за счет роста электронной плотности в пространстве между атомами, одновременно удаляясь от соседних атомов, вошедших в соседние молекулы, на точно такое же расстояние.

В физике этот процесс называется *искажением Пайерлса*, который сопровождается образованием двух зон, соответствующих связывающим и разрыхляющим состояниям. При

таким типе искажений создается энергетически более выгодная ситуация, когда короткие и длинные расстояния между атомами чередуются в цепочке, чем когда межатомные расстояния одинаковы [11]:



Из схемы следует, что при образовании молекул  $M_2$  создаются условия для создания зон малой плотности вещества, которые располагаются между двумя соседними молекулами. «Вытянутые» из зоны малой плотности вещества в область образования химической связи М-М электроны формируют ЭДС между зоной флуктуации, характеризующейся малой плотностью вещества и электрического потенциала, и областью димера, где соответственно величины плотности вещества, электронной плотности и электрического потенциала больше.

В этих условиях области малой плотности вещества испытывают напряжения сжатия, а области локализации молекул с плотностью вещества больше средней по металлу, наоборот, испытывают напряжения растяжения. Так возникает несколько сил противодействия, стремящихся вернуть систему в исходное состояние.

По Полингу [10] переключение связей между такими структурами обеспечивает более высокую стабильность металла по сравнению с кристаллом, состоящим из молекул  $M_2$ , каждый из которых имеет фиксированную ковалентную связь.

Очевидно, самопроизвольный процесс образования химической связи М-М приводит к созданию механической колебательной системы, в которой формируется и действует электрическая колебательная система. Эти системы взаимосвязаны и колеблются с взаимным превращением энергии, а сами колебания становятся незатухающими, так как в системе отсутствует перенос массы, сохраняется постоянство объема и энтальпии, а при удалении электрона от одного атома на определенное расстояние, он приближается к другому атому на то же самое расстояние. Это приводит к тому, что переключения связей во всех направлениях равновероятны и в системе реализуется безразличное равновесие.

Очевидно, мы имеем резонансную систему с переключаемыми химическими связями, сгенерированную колебаниями электронной плотности между атомами. Ясно, что в случае длинной одномерной цепочки молекул (без дефектов структуры) переключения связей не могут быть хаотичными во времени и в системе должен работать кооперативный механизм переключения:

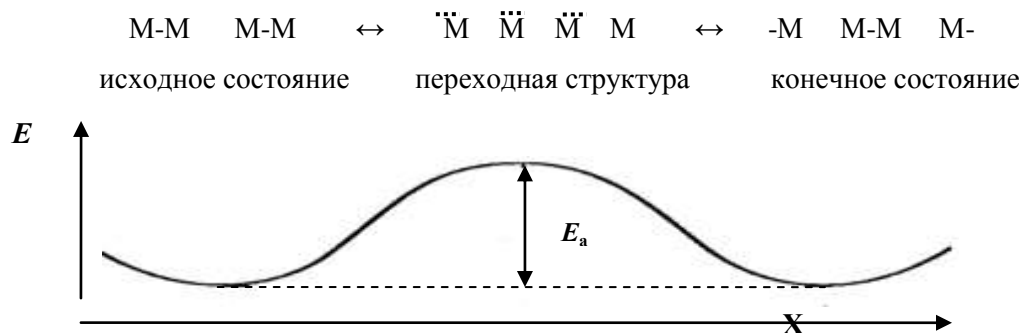
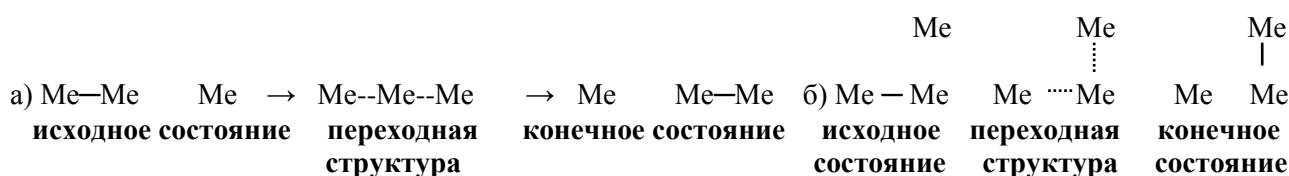


Рис. 3. Энергетическая диаграмма переключаемых связей в цепочке .. М-М М-М..

Разрыв и образование химических связей М-М является непрерывным процессом. В самом общем случае возможно несколько вариантов переключения связей между димерами (см. также схему с участием калия выше), а также между димерами и отдельными атомами, которые появляются в процессе диссоциации отдельных молекул за счет тепловых флуктуаций энергии:



Рост числа резонансных структур, участвующих в процессе, приводит к большей стабилизации системы, чем в случае небольшого количества резонирующих структур [10].

Переключения связей приводит к постоянному изменению расстояний между атомами и, наряду с тепловыми колебаниями, является еще одной из причин возникновения колебаний атомов относительно равновесного положения в кристаллической решетке.

Из представленных схем следует, что при переключении связей всегда должна образовываться переходная структура, соответствующая возбужденному состоянию, когда старые связи растянуты, но не разорваны, а новые связи еще не успели образоваться. Переходному или возбужденному состоянию, как и в любой химической реакции, должна соответствовать своя энергия активации  $E_a$  (рис. 3).

В большинстве теоретических исследований принят классический подход к описанию кинетики процесса распада связей. Считается, что вероятность возникновения возбужденного состояния с энергией  $E_a$  определяется больцмановской компонентой и при высоте энергетического барьера для разрыва связи  $E_a$ , получаем, что частота разрыва-образования связей равна

$$v = v_0 \exp(-E_a/kT), \text{ c}^{-1} \quad (1)$$

Достигнув вершины потенциального барьера, связь может разорваться, если только будет достаточно «места» для раздвижения атомов при разрыве молекул. Такие условия создаются в представленных ранее цепочках.

Согласно теории абсолютных скоростей реакций [12, 13], можно записать

$$v_0 \approx (kT/h) \exp(\Delta S/k), \quad (2)$$

где  $\Delta S$  – изменение энтропии в районе переходного состояния. В натянутой цепочке молекул набор различных конфигураций естественно, мал (много меньше, чем в изогнутом или скрученном состоянии цепочки), к тому же, как следует из [4] и данных рис. 2, для большинства исследуемых металлов порядки связи в молекулах М-М ПС  $\geq 2$ . Это исключает возможность вращения атомов относительно линии связи и все это, в совокупности, позволяет считать энтропийные изменения ( $\Delta S$ ) в районе переходного состояния крайне малыми, т.е.  $\Delta S \rightarrow 0$ . С учетом этого получаем для частот переключений связей М-М простое уравнение

$$v_{\text{пр}} = 10^{13} \exp(-E_a/kT), \quad (3)$$

поскольку при умеренных температурах  $kT/h \approx 10^{13} \text{ c}^{-1}$ . Эта величина соответствует среднему периоду тепловых колебаний атомов в конденсированных телах.

Величина предэкспоненциального множителя  $A_0$  в уравнении Аррениуса, равная  $10^{13} \text{ c}^{-1}$ , наблюдается для большого количества разнообразных по условиям протекания и природе химических реакций [13].

Эта же величина  $v_0 = 10^{13} \text{ c}^{-1}$  играет ключевую роль и в кинетической теории прочности твердых тел (металлы, сплавы, ионные кристаллы, пластмассы). Она практически не зависит от способа получения и условий подготовки и структуры металлов (отжиг, прокатка, легирование), а для пластмасс (неориентированные и ориентированные цепи, степень кристалличности, УФ облучение, пластифицирование и др.) [2].

Для расчетов частот переключения химических связей необходимо знать, чему равна энергия активации процесса переключения связей хотя бы в простейшей линейной цепочке,

состоящей целиком из димеров  $M_2$ . Используя косвенные данные, можно попытаться оценить частоту переключений связи, а по ним рассчитать величину  $E_a$ .

Известно, что при воздействии на металлы лазерного излучения малой длительности с плотностью потока излучения  $10^6$ – $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> металл в зоне облучения разрушается и на поверхности мишени возникает характерный кратер. В этом случае размер зоны воздействия луча должен зависеть от соотношения между длительностью лазерного импульса и периода переключений химических связей, если они являются основными переносчиками тепла. Известно [14,15], что при одной и той же плотности мощности лазера, превышающей порог испарения, при длительности импульсов  $\leq 1$  нс происходит полное испарение материала практически без образования жидкой фазы, которая наблюдается при более длинных импульсах, когда начинает проявлять себя теплопроводность. Используя эти данные, можно сделать вывод о том, что период переключений химических связей в металлах, при обычных условиях, имеет величину  $\sim 10^{-10}$  ÷  $10^{-9}$  с.

Оценить порядок частот переключений химических связей можно расчетным путем. Частота волн, распространяющихся по цепочке ( $M_2 M_2 M_2 M_2 \dots$ ), ограничена круговой частотой  $\omega_{\max} = \sqrt{4\gamma/M}$ , где  $\gamma$  – силовая константа, а  $M$  – масса молекулы М-М [16, с.80]. Чтобы рассчитать частоту, необходимо определить постоянную  $\gamma$ . Для этого нужно знать энергии и длины связей М-М. Например, для железа, меди, платины, ниобия и молибдена, энергии и длины связей равны 75, 176, 307, 510 и 406 кДж/моль и 2,48, 2,21, 2,78, 2,86 и 2,73 Å [5] соответственно. Отсюда характерная энергия, которую приобретает атом под действием силы  $F$  при смещении  $M$  на расстояние, равное длине связи « $a$ » равна  $\gamma = E_{cb}/a^2$ . Для Fe, Cu, Pt, Nb и Mo получаем значения величин  $\gamma$  в Дж/м<sup>2</sup>: 2,03 (Fe); 6,0 (Cu); 6,49 (Pt), 10,4 (Nb) и 9,05 (Mo). Отсюда получаем, что максимальные частоты колебаний равны:  $\omega_{\max Fe} = 1,47 \cdot 10^{11}$ ;  $\omega_{\max Cu} = 3,36 \cdot 10^{11}$ ,  $\omega_{\max Pt} = 3,2 \cdot 10^{11}$ ,  $\omega_{\max Nb} = 3,67 \cdot 10^{11}$  и  $\omega_{\max Mo} = 3,38 \cdot 10^{11}$  с<sup>-1</sup>. Используя соотношение:  $\nu = \omega_{\max}/2\pi$ , соответственно получаем следующие величины частот переключений связей:  $\nu_{Fe} = 2,3 \cdot 10^{10}$ ;  $\nu_{Cu} = 5,4 \cdot 10^{10}$ ,  $\nu_{Pt} = 1,85 \cdot 10^{10}$ ,  $\nu_{Nb} = 5,84 \cdot 10^{10}$  и  $\nu_{Mo} = 5,4 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>. Как видно, полученные результаты по порядку величин близки к частотам, которые следуют из данных по сверхкороткому лазерному воздействию на металлы.

Имея данные по частотам и используя уравнение (3), можно оценить порядок величин энергии активации  $E_a$  для процессов разрыва-образования связей М-М. Подставив в (3) частоты переключений, рассчитанные ранее, и принимая  $T = 300$  К, получаем интервал значений  $E_a \approx 13$  - 15 кДж/моль.

По величине энергии активации  $E_a = 13$  и 15 кДж/моль при условии, что значение  $E_a$  не зависит от температуры, попытаемся рассчитать частоты переключений при температуре плавления, например, железа  $\sim 1800$  К, используя (3) Расчет показывает, что для Fe  $\nu_{пр} = 3,7 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup> ( $E_a = 15$  кДж/моль) и  $4,16 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup> ( $E_a = 13$  кДж/моль). Для ниобия подобный расчет при  $E_a = 13$  и 15 кДж/моль и  $T_{пл} = 2700$  К дает величины  $\nu_{пр} = 5,6 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup> и  $\nu_{пр} = 5,1 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup> соответственно. Значения предельных значений частот  $\nu_{пр}$ , рассчитанные для температур плавления и для других металлов, лежат в интервале 3-6  $\cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup>, что близко к предельной величине долговечности  $10^{13}$  с<sup>-1</sup> нагруженных твердых тел [2]. Это естественно, так как при температурах плавления кристаллическая решетка твердого тела практически разрушена.

Проведем качественный анализ зависимостей частот переключений связей и времени жизни ( $\tau_{жиз}$ ) молекул М-М в широком интервале температур. При сверхнизких температурах  $T \rightarrow 0$  К скорости химических реакций образования-разрушения связей и частоты переключения  $\nu_{пр}$  близки к нулю, а  $\tau_{жиз} \rightarrow \infty$ . С ростом температуры, в соответствии с уравнением Аррениуса, частоты переключения химических связей растут, а времена жизни  $\tau_{жиз}$  начинают уменьшаться. По мере приближения температуры к  $T_{пл}$  частоты переключения связей, согласно расчетам, проведенным ранее, приближаются к значениям  $10^{12}$ – $10^{13}$  с<sup>-1</sup>, и такой же порядок величин имеет и время жизни димеров, так как эти две величины тесно между собой связаны.

Увеличение частоты переключения связей с ростом температуры сопровождается ростом числа тепловых флуктуаций энергии и увеличением длины связей М-М, вследствие ангармонизма межатомного взаимодействия. Все эти причины должны приводить к росту числа обособленных атомов в решетке и при  $T \approx T_{пл}$ , по-видимому, достигается критическая масса димеров ( $m_{кр}$ ), которая еще способна поддерживать устойчивость кристаллической решетки.

При  $m < m_{кр}$  твердое тело не может существовать и трансформируется в расплав, состоящий в основном из обособленных атомов, где число димеров с ростом температуры при  $T > T_{пл}$  резко уменьшается [17]. Следует отметить, что димеры обладают удивительной живучестью, так как обнаруживаются даже в паровой фазе при  $T > T_{кип}$ , где их доля составляет  $10^{-1} \div 10^{-7}$  от общего количества изолированных атомов [18].

В табл.1 приведены рассчитанные по данным [6] энтропии фазовых переходов твердое тело-расплав для  $d$  - металлов IV, V и VI периодов. Из таблицы следует, что изменения энтропии при плавлении при переходе от металла к металлу меняются мало, как малы и сами значения  $\Delta S_{пл}$  в пределах 7–10 Дж/моль.К, за исключением металлов, димеры которых связаны прочной шестерной связью ( $Mo_2$  и  $W_2$ ).

Таблица 1

Энтропии фазовых переходов твердое тело - расплав для  $d$  - металлов IV, V и VI периодов

M (IV)	$\Delta S_{пл}$ , Дж/моль К	M (V)	$\Delta S_{пл}$ , Дж/моль К	M (VI)	$\Delta S_{пл}$ , Дж/моль К
Sc	7,78	Y	6,33	La	5,19
Ti	7,73	Zr	6,86	Hf	8,43
V	10,6	Nb	10,2	Ta	10,6
Cr	9,7	Mo	12,5	W	16,7
Mn	7,9	Tc	9,70	Re	9,67
Fe	7,62	Ru	9,5	Os	9,64
Co	8,78	Rh	9,61	Ir	9,71
Ni	10,1	Pd	8,33	Pt	9,65
Cu	9,59	Ag	8,88	Au	9,39
$\Delta S_{средн} = 8,87$		$\Delta S_{средн} = 9,10$		$\Delta S_{средн} = 9,89$	

Низкие значения энтропий перехода для достаточно прочных  $d$  - металлов свидетельствует о том, что в количественном отношении переход «порядок-беспорядок» при плавлении для них примерно одинаков. Не исключено, что это связано с потерей критической массы димеров в кристалле. Кристаллическая решетка при этом быстро разрушается и происходит инверсия «раствора»: в твердом теле в качестве «растворителя» выступают димеры, а в качестве растворенного вещества – обособленные атомы. При температурах выше температуры плавления в качестве растворителя, наоборот, выступают обособленные атомы, а в качестве растворенного вещества – димеры.

О том, что свойства металлов при  $T \approx T_{пл}$  кардинально не меняются, свидетельствует тот известный факт, что при плавлении металлы сохраняют свои электрические, тепловые и оптические свойства и вблизи  $T_{пл}$  в жидких металлах наблюдается примерно такой же ближний порядок, как и в кристаллическом состоянии. Обоснование близости структур расплавов и металлов вблизи  $T_{пл}$  было дано Я. Френкелем [1]. По Френкелю, тепловое движение атомов или молекул (димеров) в жидкости сводится к нерегулярным колебаниям вокруг положений равновесия. Эти положения равновесия не являются фиксированными, как в кристалле, а непрерывно меняют свои координаты. В связи с большой плотностью и сильным взаимодействием частиц в расплаве частота колебаний группировок атомов вокруг временных положений равновесия близка к частоте колебаний атомов в твердом теле.

В кинетической теории прочности твердых тел, ключевым моментом является положение о том, что элементарными актами, ведущими к разрушению нагруженного твердого тела (металла, полимера, ионного кристалла), являются разрывы напряженных межатомных связей локальными флуктуациями энергии [2, 19]. Так, например, изучение флуктуационно-

теплового механизма разрушения твердых тел, проведенного в рамках кинетической теории прочности с помощью модельно-компьютерных расчетов [19], показало следующее: 1) продолжительность тепловых флуктуаций энергии лежит в пределах одного периода колебаний; 2) флуктуации энергии охватывают 1-2 (реже 3-4) соседних атома или связи; 3) флуктуации энергий перемещаются во времени и атома к атому по цепочкам, имеющим значительную длину; 4) миграции флуктуаций приводят к возможности их «столкновения» в зоне пересечения миграций на одном атоме или связи.

Описанные ранее процессы, связанные с образованием димеров в металлах и с переключениями химических связей, не противоречат основам кинетической теории прочности твердых тел, а по некоторым пунктам (1-3) даже дополняют их.

Таким образом, с ростом температуры прочность металла должна определяться двумя механизмами: 1) переключениями химических связей между соседними димерами М-М, имеющими групповой характер; 2) флуктуациями тепловой (кинетической) энергии колеблющихся атомов, приводящих к разрыву связей между соседними атомами [2, 19].

Модель структуры металлов с нестационарными химическими связями позволяет объяснить: 1) эффект «сваривания» очищенных гладких поверхностей, в том числе и разнородных металлов, прижатых друг к другу даже при комнатных температурах. За достаточный промежуток времени химические связи атомов металлов «диффундируют» друг в друга (переключаются друг на друга), образуя неразъемное соединение. Использование ультразвука (ультразвуковая сварка) приводит к снижению времени «схватывания» поверхностей (до  $\sim 0,05$  с). Этому способствует интенсивное разрушение микровыступов, увеличение температуры и поверхности контакта между соприкасающимися поверхностями; 2) образование областей малой плотности вещества между соседними молекулами и релаксации связей должно способствовать самодиффузии атома, которая для большинства металлов в зависимости от температуры хорошо описывается уравнением Аррениуса [20].

Считается, что энергия активации диффузии затрачивается на «разрыхление» решетки и отражает ее прочность. Следуя принципу минимума энергии, диффундирующий атом с большей вероятностью будет стремиться раздвинуть соседние димеры и «проскочить» через зону малой плотности вещества. В [21] с использованием метода молекулярной динамики было установлено, что для механизмов самодиффузии: 1) «протаскивание» диффундирующего атома через неподвижную линзу атомов; 2) то же, но в условиях релаксации атомов; 3) то же, что и в один, но в виде «прострела», требуемые для диффузии энергии, распределяются в отношениях 1,0 : 0,1 : 0,3 соответственно. В той же работе было установлено, что среднее время «скачка», связанного с изменением местоположения атома, составляет  $\sim 10^{-12}$  с при 900 К, а сами «скачки» атомов носят кооперативный характер. Все это подтверждает изложенный ранее вывод о том, что диффундирующему атому энергетически выгоднее пройти через разреженную зону между двумя димерами в условиях их релаксации, которая также носит кооперативный характер.

Рост температуры способствует диссоциации связей М-М, приводит к увеличению числа изолированных атомов в объеме, которые вследствие энтропийного фактора уходят из «узла» кристаллической решетки и диффундируют по разреженным зонам между димерами.

Недавно факт периодического ухода атомов из узла решетки нашел свое экспериментальное подтверждение [22], где с помощью нового метода корреляционной спектроскопии рентгеновских фотонов (X-ray photon correlation spectroscopy) установлено, что при температуре 270<sup>0</sup>С внутри сплава Cu<sub>90</sub>Au<sub>10</sub> каждый атом меняет своё местоположение в решётке в среднем раз в час. Увеличение температуры на 10<sup>0</sup>С приводит к удвоению частоты прыжков атомов, а уменьшение температуры на 10<sup>0</sup>С - к уменьшению частоты прыжков в два раза [22]. Формально это отвечает правилу Вант-Гоффа, справедливому для химических реакций: «скорость химической реакции повышается в среднем в 2-4 раза на каждые 10 градусов». Учитывая большое число атомов в 1 см<sup>3</sup> металла  $\approx 10^{22} \div 10^{23}$ , при 270<sup>0</sup>С в сплаве Cu<sub>90</sub>Au<sub>10</sub> ежесекундно покидают свои места в решетке  $\approx 10^{19}$  атомов/см<sup>3</sup>.

Таким образом, ясно, что атомы испытывают тепловые колебания и колебания, связанные с постоянными переключениями химических связей, а также менять своё местоположение в решётке, что превращает металл в высоко динамичную систему.

С этих позиций легко объяснить пластичность металлов при высоких температурах и хрупкость - при низких. Повышение температуры к уменьшению времени жизни димеров и росту тепловых флуктуаций энергии, что способствует увеличению числа обособленных атомов, не участвующих или слабо участвующих в связи, и которые начинают играть роль «смазки» или «шарикоподшипников» при сдвиговых и иных видах деформаций.

По своей сути, значительный рост числа обособленных атомов является предвестником появления расплавленного состояния. Накопленные в литературе данные, см. например [2], свидетельствуют о близкой природе физических процессов механического и теплового разрушения материала. На взаимную связь этих процессов указывает, в частности, то, что одновременное действие механической нагрузки и нагревания оказывает одинаковое совокупное действие, ускоряющее разрушение металлов. Это хорошо прослеживается на основе данных рис. 4 [23], из которых следует, что с ростом температуры предел прочности поликристаллического Мо снижается практически линейно и при  $T > 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. температурах еще далеко отстоящих от  $T_{пл} \approx 2600^{\circ}\text{C}$  прочность Мо стремится к нулю. Здесь  $\sigma_b$  – характеризует прочность материала, предшествующую его разрушению. На рис. 5 отложены данные по  $\sigma_b$  в зависимости от частоты переключения химических связей между димерами, рассчитанные для Мо при  $E_a = 13\text{ кДж/моль}$  и температурах, соответствующих рис. 4. Из рис. 5 следует, что в полулогарифмических координатах зависимость  $\sigma_b$  от частот переключения связей между димерами для Мо представляет собой прямую линию и при очень малых нагрузках, порядка  $1\text{ кг/мм}^2$  и меньше, время жизни димера равно  $\approx 10^{-13}\text{ с}$ , что соответствует предельным временам долговечности нагруженных твердых тел [2]. В то же время на оси ординат отсекается отрезок, равный  $98\text{ кг/мм}^2$ , что соответствует экспериментально определенной предельной нагрузке Мо при растяжении при  $T = 25^{\circ}\text{C}$  [24].

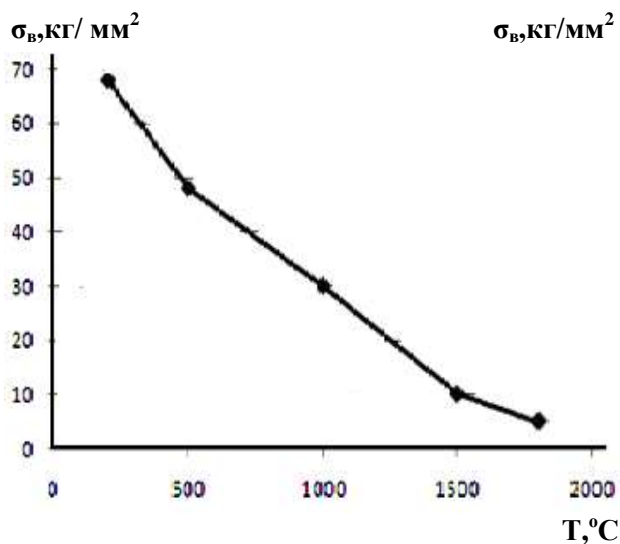


Рис. 4. Изменение предела прочности Мо в зависимости от температуры

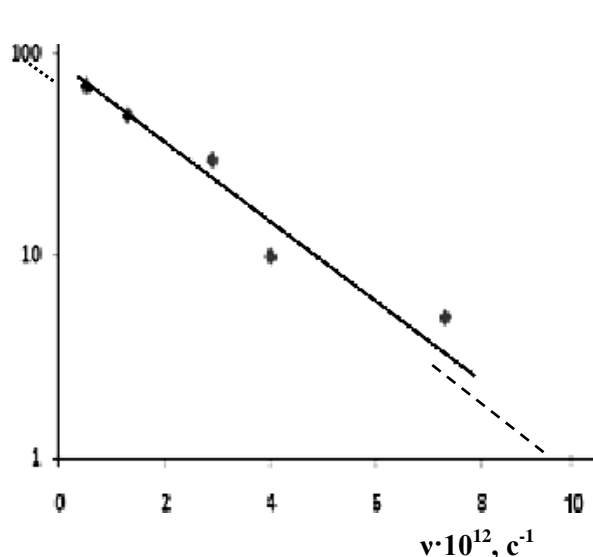


Рис. 5. Изменение предела прочности Мо в зависимости от частоты переключения связей

Представления о динамических связях позволяет выдвинуть альтернативное объяснение, почему появляется хладоломкость и почему примеси, в особенности, кислород, азот и сера, снижают температуру наступления хрупкого состояния. При понижении температуры скорость переключения связей уменьшается, что приводит к увеличению их прочности и соответственно к увеличению хладоломкости.

Перечисленные ранее примеси химически очень активны и будучи внедренными в решетку, в первую очередь, внедряются в зоны малой плотности вещества, располагающиеся

между соседними димерами. В этом случае цепочки переключающихся атомов в присутствии примесей обрываются, замыкаясь на них, или химически взаимодействуют с ними. В обоих случаях, при наличии сдвиговой деформации атом металла не может или «не успевает» образовать новую связь с ближайшим атомом, в результате чего ускоряется процесс хрупкого разрушения.

По этой причине, практически все тугоплавкие металлы V, Nb, Ta, Zr, Hf, Mo, Cr и W, являющиеся непластичными в обычных условиях, после очистки с помощью вакуумно-дуговой и электронно-лучевой плавок, становятся пластичными вплоть до температур жидкого азота.

Чистота является не единственным фактором, определяющим пластичность поликристаллических металлов. Большую роль играет наличие и характер межкристаллитных границ. Исследования поверхности разрушения, например сталей, указывают на то, что трещина хрупкого разрушения в металле чаще всего распространяется по границам зёрен, что, как считается, является следствием адсорбционного обогащения границ вредными примесями (O, P, S, Sb и другими), резко снижающими силы сцепления между зёрнами. Причины снижения сил сцепления связаны с тем, что адсорбированные поверхностно-активные примеси, с одной стороны, приводят к обрыву цепочек переключений химических связей и препятствуют «схватыванию» граничных поверхностей, а с другой, приводят к снижению работы образования поверхности зерна, делая границу раздела более пластичной. Если примеси образуют химические соединения на граничной поверхности, то причина, связанная с обрывом переключений связей, сохраняется и в этом случае, но к ней добавляется возможность скольжения контактирующих поверхностей по промежуточной прослойке вещества другой природы. Все это, в совокупности, и приводит к уменьшению сопротивления к сдвиговым и иным видам деформаций. Так, например, при прочих равных условиях монокристаллы, не содержащие границ зерен, всегда имеют намного более низкую, по сравнению с поликристаллическими металлами, температуру перехода к хрупкому состоянию.

### Выводы

1. Атомы переходных металлов в кристаллах связаны между собой ковалентными связями и большой вклад в энергию кристаллических решеток вносят парные взаимодействия М-М, генерирующие колебательную систему, по своей природе принципиально отличающуюся от тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Сделан вывод, что переходные металлы – это системы с большой стабилизирующей энергией резонанса, сгенерированной колебаниями электронной плотности и массы между атомами.

2. Образующиеся связи М-М не являются стационарными и в объеме металла непрерывно происходят переключения связей между соседними атомами, которые включаются в достаточно длинные цепочки.

3. Выявлены причины появления димеров и проведена оценка частот и энергии активации переключений химических связей между соседними молекулами в металле.

4. С позиций переключения химических связей высказаны предположения относительно наиболее вероятного механизма самодиффузии и причин увеличения пластичности металлов при высоких температурах и хрупкости – при низких, а также причины влияния примесей хладоломкость металлов.

### Библиографический список

1. Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель. – М.: Физматгиз, 1958. – 368 с.
2. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский // Успехи физических наук. 1972. Т. 106. №2. С. 193–228.
3. Физика металлов 1. Электроны / под. ред. Дж. Займана. – М.: Мир, 1972. – 464 с.
4. Наумов, В.И., Химическая связь в переходных металлах IV-VI периодов // Тр. Нижегород. гос. ун-та. 2011. №4(91). С. 252–262.
5. Волков, А.И. Метод молекулярных орбиталей / А.И. Волков. – М.: Новое знание, 2006. – 133 с.



6. Рабинович, В.А. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, В.Я. Хавин. – Л.: Химия, 1991. – 432 с.
7. Plummer, E.W. Atomic binding of transition metals on clean single crystal tungsten surfaces / E.W. Plummer T.N. Rhodin. J.Chem // Phys. V. 49. N8. P. 3479–3496.
8. Нефедов, В.И. Физические методы исследования поверхности твердых тел / В.И. Нефедов, В.Т.Черепин. – М.: Наука, 1983. – 296 с.
9. Гуденаф, Д. Магнетизм и химическая связь / Д. Гуденаф. – М.: Metallurgia, 1968. – 328 с.
10. Полинг, Л., Общая химия / Л. Полинг. – М.: Мир, 1974. – 846 с.
11. Мюллер, Х. Структурная неорганическая химия / под ред. А.М. Ховива. – М.: Изд. дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
12. Глестон, С. Теория абсолютных скоростей реакций, вязкость. Диффузия и электрохимические явления / С. Глестон, К. Лейдер, Г. Эйринг. – М.: ИЛ, 1948. – 584 с.
13. Еремин, Е.Н. Основы химической кинетики / Е.Н. Еремин. – М.: Высшая школа, 1976. – 541 с.
14. Анисимов, С.И. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов [и др.]. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
15. Кононенко, Т.В. Сравнительное исследование абляции материалов фемтосекундными и пико/наносекундными лазерными импульсами / Т.В. Кононенко [и др.] // Квантовая электроника. 1999. Т. 28. № 2. С. 167–172.
16. Зиненко, В.И. Основы физики твердого тела / В.И. Зиненко, Б.П. Сорокин, П.П. Турчин. – М.: Физматлит. 2001. – 336 с.
17. Дей, К. Теоретическая неорганическая химия / К. Дей, Д. Селбин. – М.: Химия. 1976. – 568 с.
18. Сидоров, Л.Н. Молекулы, ионы и кластеры в газовой фазе // СОЖ. 2000. Т. 6. №11. С. 46–51.
19. Слуцкер, А.И. Атомный уровень флуктуационного механизма разрушения твердых тел (модельно-компьютерные эксперименты // ФТТ. 2005. Т. 47. №5. С. 777–787.
20. Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах / Б.С. Бокштейн. – М.: Metallurgia, 1978. – 250 с.
21. Чудинов, В.Г. Кооперативный механизм самодиффузии в металлах // ЖТФ, 2000. Т. 70. №7. С. 133–135.
22. Leitner M., Sepiol B., Stadler L., Pfau B., Vogl G.. Atomic diffusion studied with coherent X-rays / M. Leitner [et al.] // Nature Materials. 2009. V. 8. P. 717–720.
23. Copyright ЗАО "Группа Компаний «СпецМеталлМастер» - <http://specmetal.ru/mekhanicheskie-svoistva-tugoplavkikh-metallor>.
24. Назарян, Э.А. Напряжения и деформации листового молибдена при плоском напряженном состоянии с учетом деформационного упрочнения / Э.А. Назарян, М.М. Аракелян // Изв. Акад. наук Армении, Механика. 2006. Т. 59. № 14. С. 74–84.

Дата поступления  
в редакцию 15.02.2012

V.I. Naumov

## SWITCHING OF CHEMICAL AND VIBRATIONAL COMMUNICATION SYSTEM IN TRANSITION METALS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The atoms of transition metals containing M-M dimers in which the metals are linked by covalent bonds. The most durable and have a melting metals, dimers are connected quintuple (Nb, Te, Ta, Re) and sixfold (W and Mo) bonds. Chemical bonds are not fixed and is continuously taking place in the metal switch contacts between neighboring atoms, which leads to an oscillatory system, the nature of which is fundamentally different from the thermal vibrations of atoms in the crystal lattice. Suggested a possible reason for the formation of dimers and the estimation of the switching frequency of chemical bonds and the activation energy of the formation-destruction of the bonds. The role of dimers in ensuring the strength and diffusion characteristics of metals, the increase in plasticity of metals at high and fragility - at low temperatures and the effect of impurities on hladolomkost metals.

*Key words:* d-metals, dimers, orders of bond, six bonds (W<sub>2</sub>, Mo<sub>2</sub>), switching of bonds, activation energy.

---

## ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

---

УДК 339

Ф.Ф. Юрлов, М.Е. Незнахин

### КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается возможность применения многоуровневого подхода как инструмента системного анализа при прогнозировании развития экономических систем, позволяющего анализировать комбинации многоуровневых объектов с множеством критериев, и приводится краткий анализ образующихся при этом различных практических ситуаций.

*Ключевые слова:* задачи выбора эффективных решений, прогнозирование развития экономических систем, модель жизненного цикла, многоуровневый подход.

Исследование функционирования экономических систем выявило, что данный процесс является сложным и состоит из более мелких частных субпроцессов. Рассматривая процесс управления экономическими системами, отметим, что он сочетает в себе множество взаимозависимых между собой процессов более низкого уровня. Отсюда следует, что для анализа экономических систем необходимо рассмотрение каждого из этих процессов индивидуально и в совокупности. Для решения данной задачи можно с успехом использовать два известных подхода к анализу экономических систем: метод многоуровневого подхода и модель жизненного цикла. В результате совместного применения указанных инструментов для анализа экономических систем можно сформировать перечень основных задач многоуровневого анализа решений, применяемых при управлении экономическими системами с применением модели жизненного цикла и характеризующих различные практические ситуации.

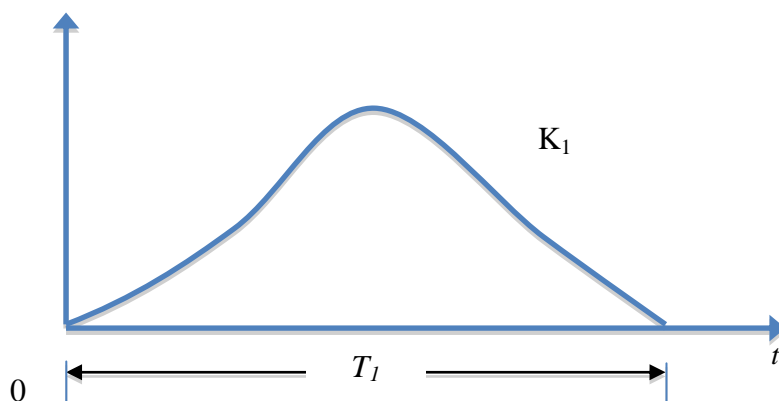
В настоящей статье формулируются основные задачи многоуровневого анализа выбора эффективных решений при управлении развитием экономических систем, на основе модели жизненного цикла и рассматриваются их оценки. Рассмотрим эти задачи:

1. Одноуровневые однокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта;
2. Одноуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта;
3. Одноуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе моделей жизненных циклов нескольких объектов;
4. Многоуровневые однокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта;
5. Многоуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта;
6. Многоуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе моделей жизненных циклов нескольких объектов.

Дадим краткий анализ сформулированных задач многоуровневого анализа решений при управлении экономическими системами на основе модели жизненного цикла.

*1. Одноуровневые однокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта*

При анализе данного типа задач для выбора эффективных решений управления экономическими системами на основе модели жизненного цикла одного объекта используется единственный критерий эффективности. При этом указанный анализ осуществляется лишь на одном из уровней организации. В качестве этого уровня могут выступать: бизнес-единицы, предприятия и т.д. Пример, иллюстрирующий данный тип задач, представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Модель однокритериального анализа жизненного цикла единственного объекта на одном уровне анализа**

Отметим, что критерий эффективности  $K_1$  могут представлять экономические, социальные, экологические и иные факторы. Период  $T_1$  может характеризовать жизненный цикл различных объектов: товара, технологии, организации и др. Данный тип задач является наиболее простым из всех сформулированных задач. В данном случае рассматривается однокритериальный выбор принимаемых решений в зависимости от типа критерия  $K_1$ , осуществляя его максимизацию или минимизацию. Например, при использовании критерия эффективности прибыли решается задача его максимизации:

$$\Pi(x)_{\max} = \max \Pi(x), x \in X.$$

При наличии ограничений производится подразделение на другие показатели.

В случае применения показателей затрат, того или иного вида, формулируется следующая задача:

$$Z(x)_{\min} = \min Z(x), x \in X.$$

здесь  $X$  – вектор управления, составляющими которого могут быть: организационные, финансовые и другие факторы.

*2. Одноуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта*

В данном случае для выбора эффективного решения используется набор критериев (показателей) эффективности:

$$K = \{K_i\}, i = 1, n,$$

где  $K_i$  – показатель эффективности  $i$ -го вида.

На рис. 2 представлен пример применения двух показателей эффективности объекта при выборе эффективных решений на основе модели его жизненного цикла.

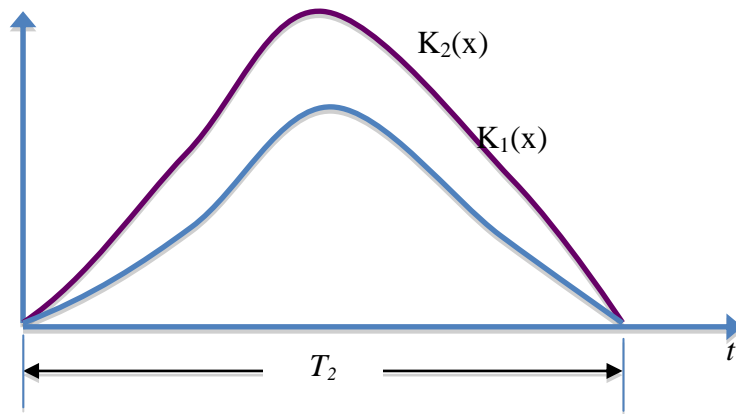


Рис. 2. Модель многокритериального анализа жизненного цикла единственного объекта на одном уровне анализа

Предположим, что в качестве объекта анализа выступает товар, который реализуется предприятием на рынке. В качестве показателя  $K_1$  выступает прибыль предприятия, а в качестве показателя  $K_2$  – объем продаж товара. В данном случае, в отличие от предыдущего примера, возникает необходимость одновременной оптимизации двух показателей:

$$K_1(x)_{opt} = opt K_1(x), x \in X$$

$$K_2(x)_{opt} = opt K_2(x), x \in X$$

Как показывает анализ, в общем случае не удастся одновременно оптимизировать эти показатели. В этом случае потребуются применение нескольких компромиссных решений.

3. *Одноуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе моделей жизненных циклов нескольких объектов*

В данном случае осуществляется сравнительная оценка эффективности нескольких объектов с некоторым набором показателей эффективности. Для первого объекта набор критериев имеет вид:

$$K_1 = \{K_{1i}\}, i = \overline{1, n}$$

Второй объект характеризуется совокупностью критериев

$$K_2 = \{K_{2j}\}, j = \overline{1, n}$$

В общем случае жизненные циклы объектов  $T_1$  и  $T_2$  неодинаковы, т.е.  $T_1 \neq T_2$ .

На рис. 3 представлен пример жизненного цикла первого объекта, а на рис. 4 – второго объекта.

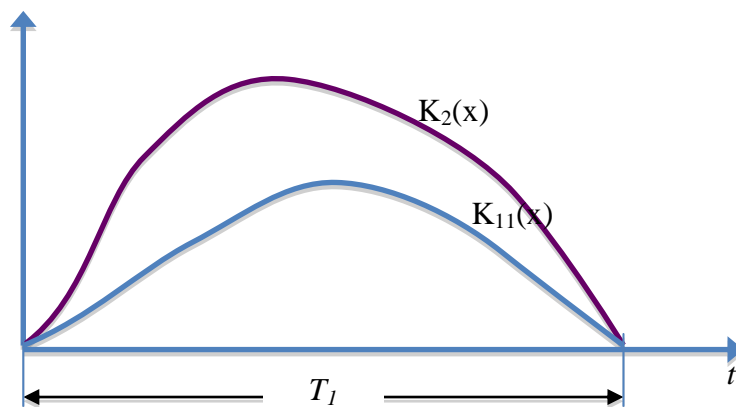
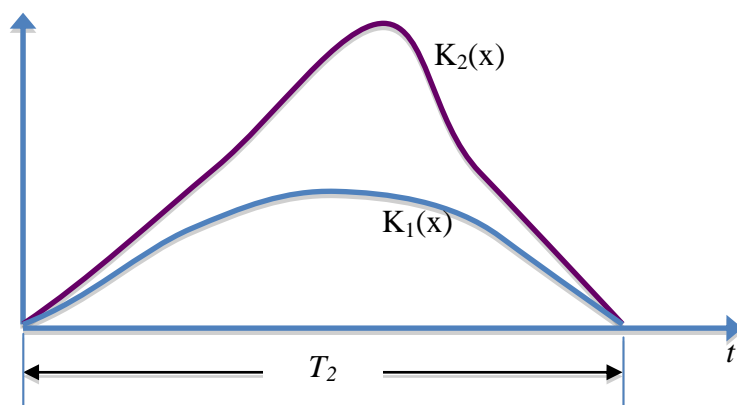


Рис. 3. Модель многокритериального анализа жизненного цикла первого объекта

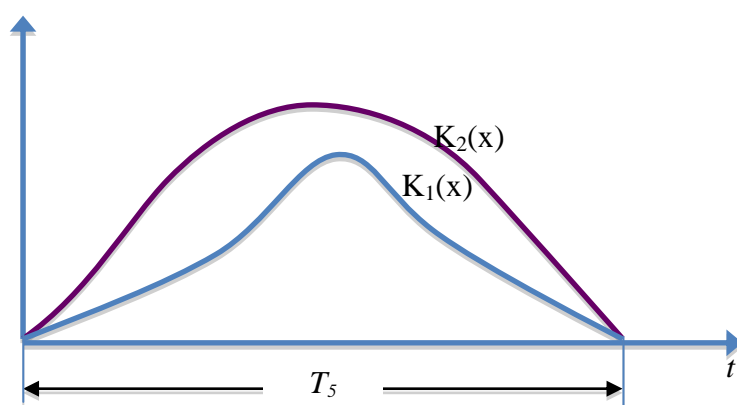


**Рис. 4. Модель многокритериального анализа жизненного цикла второго объекта**

Так как в общем случае сравниваемые объекты могут иметь различные величины показателей эффективности и разные жизненные циклы, возникает необходимость оптимизации указанных параметров.

*4. Многоуровневые однокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта*

Проиллюстрируем рассматриваемую задачу с помощью примера, отражающего модель жизненного цикла единственного объекта при решении однокритериальной задачи выбора эффективных решений управления экономическими системами на нескольких иерархических уровнях, изображенной на рис. 5.



**Рис. 5. Модель однокритериального анализа жизненного цикла единственного объекта**

В данном случае анализируемый объект рассматривается на двух уровнях анализа с использованием единственного критерия. Допустим, что в качестве объекта анализа выступает инвестиционный проект. Для оценки эффективности проекта используется показатель чистой текущей стоимости (ЧТС). В качестве уровней анализа выступают: предприятие и региональный государственный орган, например, Министерство инвестиционной политики Нижегородской области. На первом уровне определяемая коммерческая эффективность проекта, на региональном уровне рассчитывается бюджетная эффективность этого проекта.

*5. Многоуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе модели жизненного цикла единственного объекта*

На рис. 6 представлена ситуация модели многокритериального анализа единственного объекта на двух уровнях анализа.

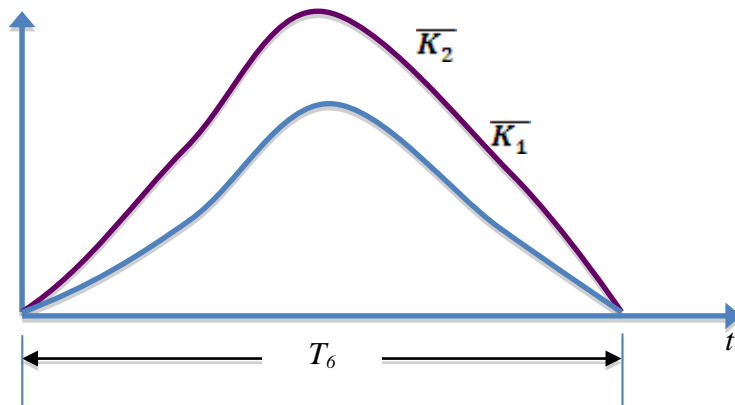


Рис. 6. Модель многокритериального анализа единственного объекта на двух уровнях анализа

Здесь  $\overline{K}_1$  . представляет набор показателей эффективности объекта, определяемый на первом уровне анализа:

$$\overline{K}_1 = \{K_{1i}\}, i = \overline{1, n}$$

Набор показателей, относящихся ко второму уровню анализа, находится из выражения:

$$\overline{K}_2 = \{K_{2j}\}, j = \overline{1, J}$$

Показатели  $\overline{K}_1$  могут иметь, например, экономическое содержание и определяться на уровне предприятия. Показатели  $\overline{K}_2$  могут представлять набор социальных показателей, определенных на уровне региона.

*6. Многоуровневые многокритериальные задачи выбора эффективных решений на основе моделей жизненных циклов нескольких объектов*

На рис. 7 представлен пример задачи выбора эффективных решений при двух критериях эффективности на основе модели жизненного цикла нескольких объектов на различных уровнях анализа.

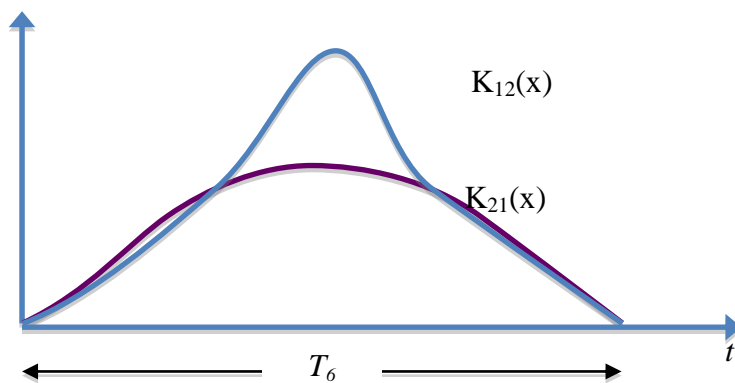
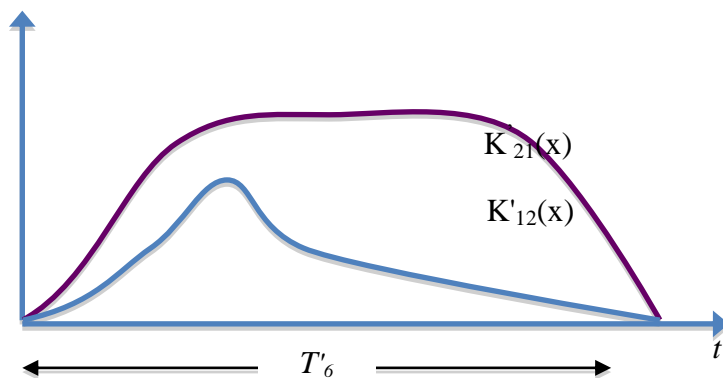


Рис. 7. Модель многокритериального анализа жизненного цикла первого объекта на двух уровнях анализа

Здесь  $K_{12}(x)$  – показатель, относящийся к первому уровню анализа объекта, а  $K_{21}(x)$  – показатель, относящийся ко второму уровню анализа.

На рис. 8 представлена ситуация, отражающая состояние критериев эффективности второго анализируемого объекта на основе модели жизненного цикла на двух уровнях анализа. В данном случае длительности жизненных циклов объектов не равны, т.е.

$$T_6 \neq T'_6 .$$



**Рис. 8. Модель многокритериального анализа жизненного цикла второго объекта на двух уровнях анализа**

Здесь  $K_{12}$  – показатель эффективности первого объекта, определяющегося на первом уровне анализа;  $K_{21}$  – показатель эффективности, относящийся ко второму уровню анализа;  $K'_{12}$  – показатель эффективности второго объекта, определяемый на первом уровне анализа;  $K'_{21}$  – показатель эффективности, определяемый на втором уровне анализа второго объекта.

Пример: Производится сравнительная оценка эффективности инновационных проектов. В качестве  $T_5$  и  $T'_5$  выступают длительности жизненных циклов указанных проектов.

Показатель  $K_{11}(x)$  представляет объем отгруженной инновационной продукции первого проекта. Показатель  $K_{21}(x)$  характеризует бюджетную экономическую эффективность проекта. В качестве показателя  $K_{12}$  выступает объем отгруженной инновационной продукции второго проекта. Показатель  $K_{21}$  – представляет общественную социальную эффективность проекта.

### Выводы

1. В существующей экономической литературе, обычно, анализируются вопросы оценки эффективности экономических систем на основе модели жизненных циклов на одном уровне управления. При этом не учитывается многоуровневый характер выбора эффективных решений.

2. В реальных экономических задачах возникает необходимость анализа моделей жизненных циклов на разных уровнях управления экономикой: на уровне бизнес-единицы, предприятий, отраслей промышленности и т.д.

3. Для решения указанных задач может найти применение многоуровневый подход, который является составной частью теории сложных систем.

4. Предложенная в настоящей работе классификация задач выбора эффективных решений может быть использована при анализе различных объектов экономических систем на основе модели жизненных циклов.

### Библиографический список

1. **Юрлов, Ф.Ф.** Методы и модели в экономике: учеб. пособие / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; НГТУ. – Н.Новгород, 2010. – 243 с.
2. **Незнахина, Е.Л.** Управление развитием предприятия на основе модели жизненных циклов: учеб. пособие / Е.Л. Незнахина, С.В. Ратафьев, Ф.Ф. Юрлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. – 231 с.
3. **Шапкин, Е.И.** Эффективная стратегия при планировании и управлении в машиностроении: учеб. пособие / Е.И. Шапкин, Ф.Ф. Юрлов; НГТУ. – Н.Новгород, 2008. – 308 с.
4. Организация как система: Принципы построения устойчивого бизнеса Эдварда Деминга / Генри Нив; [пер. с англ.]. – 2е изд. – М.: Альпина Паблшерз, 2011. – 370 с.

5. **Юрлов, Ф.Ф.** Многокритериальная оценка экономического состояния предприятий и отраслей промышленности: учеб. пособие / Ф.Ф., Юрлов, Д.Н. Лапаев, А.Ф. Плеханова; НГТУ. – Н. Новгород, 2008. – 178 с.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**F.F. Yrlov, M.E. Neznahin**

**A CHOISE PROBLEMS IN EFFECTIVE DECISIONS CLASSIFICATION  
AT FORECASTING OF ECONOMIC SYSTEM DEVELOPMENT  
USING LIFE CYCLE MODELS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

The development of economic systems management on the basis of a life cycle model allows to fulfill more effective definition of necessary transformations in economic systems and realize necessary changes. However, the presence of life cycles various kinds at various levels of economic system management allows to analyze occurring changes only on one of the levels, excluding various split-level combinations from consideration. In this article the possibility of a multilevel approach application is considered as a tool of the system analysis at forecasting of economic system development which allows to analyze multilevel objects combinations with lots of criteria.

*Key words:* a choise problems in effective decisions, a forecasting of economic systems development, a life cycle model, multilevel approach.



УДК 336.74

И.Б. Ромашова, О.В. Хохлова

## ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПРЕИМУЩЕСТВА

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Рассматриваются различные приемы инновационного менеджмента с позиции управления преобразованиями в хлебопекарном производстве. В основу статьи положен обобщенный опыт научных разработок в этой сфере. Авторы излагают инструментарий и суть приемов и видов инноваций, актуальных для небольшого хлебопекарного производства.

*Ключевые слова:* инновации, инновационная деятельность, рефрейминг, бенчмаркинг, инжиниринг, реинжиниринг, метод «точно во время», методология всеобщего управления качеством, методы управления знаниями.

Все в нашем мире подвержено переменам, и идти в ногу с ними – основная задача современного человека, от способности которого создавать и внедрять новые идеи и новые технологии во всех сферах человеческой деятельности зависит развитие экономики в целом. Инновационная составляющая бизнеса является ключевым фактором выживания в глобальной конкуренции, помогая обеспечить стратегическое преимущество конкретного предприятия.

Как известно, под инновационной деятельностью понимается комплекс мероприятий по разработке, внедрению, освоению, производству, диффузии и коммерциализации различных новшеств [1].

Для изучаемого авторами хлебопекарного производства, расположенного в Богородском районе Нижегородской области, инновационная деятельность – это, прежде всего, средство обеспечения стратегического преимущества, а не основной вид деятельности. Посредством инноваций компания стремится обеспечить себе не только удержание существующего рынка, но и расширение его, а также охват новых рынков и новых для себя клиентов.

В последние три года авторами статьи рекомендованы, а богородским предприятием «Хлеб» использованы следующие практические приемы инновационного менеджмента:

1. *Рефрейминг* – прием, позволяющий изменить точку зрения и, соответственно, восприятие, что особенно важно с точки зрения преобразования бизнеса [3].

В основе рефрейминга заложены постулаты:

- Любые симптомы, поведение, коммуникации предприятия становятся проблемными, т.е. приводящими к кризису только в том случае, когда они неверно используются или ложно воспринимаются менеджментом.
- Предприятие обладает всеми необходимыми ресурсами, позволяющими добиться целесообразного преобразования.

Данный прием инновационного менеджмента был использован для постановки диагноза и разработки инновационной стратегии предприятия «Хлеб». При этом применялось несколько фреймов (точек зрения):

- структурный – настройка структуры на новые задачи, прогрессивные технологии;
- человеческий – уравнение нужд организации и потребностей сотрудников, создание системы сбалансированных показателей для планирования и мониторинга деятельности;
- политический – обеспечение базы поддержки через политическое лобби в местных органах власти и СМИ;
- символический – культивирование красоты, смысла, веры и других общечеловеческих ценностей в коллективе.

Опыт внедрения показал, что рефрейминг – простая, удобная и адаптированная к рос-

сийским условиям концепция по управлению предприятием, применение которой существенно укрепляет позиции фирмы на рынке и позволяет:

- давать оценку бизнесу с нескольких основных позиций, а не только с финансовой, что исключает субъективизм и неадекватность в оценке деятельности предприятия;
- иметь возможность постоянного мониторинга бизнеса в условиях быстро меняющейся внешней среды, т.е. отслеживать функционирование предприятия в динамике;
- выявить параметры, определяющие эффективность или неэффективность работы предприятия и постоянно поддерживать высокие смыслы жизне- и бизнес-деятельности сотрудников.

2. *Бенчмаркинг*. Это понятие является англоязычным и не имеет однозначного перевода на русский язык. Термин произошел от англ. «bench» – место, «marking» – отметить [5].

В бизнес-среде существует множество трактовок бенчмаркингу. Классическим определением бенчмаркинга являются слова основателя этого метода Роберта Кэмпбелла: «Бенчмаркинг – это поиск лучших методов, которые ведут к улучшению деятельности». Более развернутое определение дает экс-председатель Американского общества качества (ASQ) Грегори Ватсон: «Бенчмаркинг – это процесс систематического и непрерывного измерения: оценка процессов предприятия и их сравнение с процессами предприятий лидеров в мире с целью получения информации, полезной для усовершенствования собственной деятельности».

Следовательно, бенчмаркинг – это не шпионаж, не копирование чужих идей, а эффективный метод улучшения бизнеса, при помощи которого организация обучается, приобретая способность делать то, чего раньше не умела. В основе его лежит креативное отношение к опыту компаний-конкурентов, а также признанных лидеров по тем вопросам ведения бизнеса, которые представляют стратегический интерес [2].

Применяя идеи бенчмаркинга на предприятии «Хлеб», мы предложили руководству предприятия изучить широкий круг вопросов, начиная с технологий выработки стратегии ведения бизнеса, изучения возможностей, которые позволят компании отстроиться от конкурентов, и заканчивая распределением имеющихся ресурсов и схемами мотивации персонала. Было организовано обучение топ-менеджеров предприятия путем обзора лучшего практического опыта в хлебопекарной отрасли по вопросам:

- структуры управления предприятием;
- стратегии ведения бизнеса и распределения ресурсов;
- позиционирование предприятий на рынке и сопровождение новых линий продукции;
- внедрение новых технологий управления изменениями на основе применения системы менеджмента качества по стандартам ИСО 9000, а также методологии всеобщего управления качеством (TQM) или «Шесть сигм».

В свое время руководитель Новозеландского исследовательского центра организационного совершенствования (СОЕР) Робин Манн предложил разделять два вида бенчмаркинга: сравнительный и процессный. Сравнительный бенчмаркинг по своей сути близок к конкурентному анализу и представляет собой процесс измерения результатов, оценки и сравнения показателей деятельности организации и уровня ее развития с показателями развития бизнеса компаний– лидеров в своей области.

Процессный же бенчмаркинг представляет собой изучение механизма функционирования отдельных процессов, приемов, операций и т.п. лучших предприятий, работающих в похожих условиях, с целью их адаптации и внедрения в собственные процессы организации.

Комплексное использование сравнительного и процессного подходов на исследуемом предприятии проводилось нами по методике бенчмаркинга, состоящей из следующих этапов:

- 1) оценка организации и определение областей для улучшения;
- 2) выбор параметров сравнения;
- 3) поиск и выбор эталонной компании для сопоставления;
- 4) сбор необходимой информации;
- 5) анализ полученной информации;

- б) разработка проекта внедрения изменений с технико-экономическим обоснованием;
- 7) внедрение изменений в практику организации данного бизнеса;
- 8) контроль процесса осуществления данного бизнеса и анализ внесенных улучшений.

Освоение этого приема инновационного менеджмента, способствующего повышению эффективности бизнеса, позволит и в будущем нашему предприятию идти в ногу со временем.

3. *Инжиниринг* – прием инновационного менеджмента, применяемый для повышения организационно-технического уровня производства.

Сам термин «Инжиниринг» произошел от англ. «engineering» – изобретательность, знание и означает комплекс инженерно-консультационных услуг коммерческого характера по подготовке и обеспечению непосредственно процесса производства, обслуживанию сооружений, эксплуатации хозяйственных объектов и реализации продукции [6].

Можно отметить специфические особенности инжиниринга:

- Инжиниринг воплощается не в вещественной форме продукта, а в его полезном эффекте – на материальном носителе в виде документов (чертежей, диаграмм и т.п.), без нематериального носителя, например, в виде консультаций.
- Инжиниринг, в отличие от ноу-хау и франчайзинга, связанных с реализацией новых знаний, принадлежащих ограниченному количеству продавцов, имеет дело с воспроизводимыми знаниями, имеющими множество продавцов.

Инжиниринг базируется на двух подходах:

- усовершенствование – улучшение показателей на 10 – 50%;
- реинжиниринг – рост показателей на 100%.

Как отмечает американский ученый М. Хамлер: «Реинжиниринг — это фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование деловых процессов (бизнес-процессов) для достижения резких, скачкообразных улучшений в таких решающих показателях деятельности предприятий, как стоимость, качество, сервис и темпы» [4]. Используется этот прием в качестве комплексного средства реорганизации предприятия в целом или его отдельных организационных единиц. После чего компания может стать объектом для дальнейшего усовершенствования.

Таким образом, цель реинжиниринга – достижение качественно иного, более высокого уровня показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятия путем создания принципиально новых бизнес-процессов.

На исследуемом нами предприятии пришлось применять следующие подвиды инжиниринга:

- усовершенствование делового документооборота, маршрутизация внутренних носителей информации;
- кризисный реинжиниринг, предпосылкой которого стало развитие кризисных явлений в стране и ухудшение условий предоставления кредитных ресурсов;
- рыночный реинжиниринг, вызванный падением объема продаж хлебопродуктов в связи со снижением спроса на хлебобулочные изделия;
- реинжиниринг развития, обусловленный снижением эффективности действующей организационной структуры управления предприятием.

В результате реинжиниринга была проведена перестройка основных бизнес-процессов предприятия, внедрены современные информационные и рекламные технологии, исключено функциональное дублирование ряда служб, расширена самостоятельность в принятии решений владельцев основных бизнес-процессов, что позволило минимизировать количество вертикальных взаимодействий в системе управления и сэкономить время вышестоящего руководителя. Были перераспределены некоторые функции управления - в зависимости от эффективности процесса, а не от некогда закрепленных обязанностей. При этом в рамках методики «точно во время» найдены новые методы работы с поставщиками сырья и материалов, найдены гибкие схемы оплаты кредиторской задолженности.

В дальнейшем в рамках направления реинжиниринга планируется снижение доли работ по проверке и контролю, которые, как известно, не добавляют стоимости к продукту и

увеличивают время операционного цикла. Предполагается также минимизация работ по согласованию контрактов и договоров путем налаживания долгосрочных устойчивых связей с торговыми комплексами.

4. В дополнение к перечисленным ранее, считаем также необходимым использовать для исследуемого предприятия следующие приемы инновационного менеджмента, предназначенные для трансформации экономических систем [7–10]:

- ABC/ABM – методология (Activity Based Costing / Activity Based Management) – совокупность методов стоимостного анализа бизнес-процессов, цепочек создания стоимости, отдельных организационно-структурных единиц, а также методов повышения экономической эффективности процессов управления. Используется как аналитическое средство, а также средство повышения эффективности бизнес-процессов и организационных единиц.
- Метод «точно во время» (Just-In-Time) – совокупность методов повышения качества работ и обслуживания. Применяется для повышения качества и эффективности производственной деятельности и оптимизации взаимодействия с поставщиками, подрядчиками и заказчиками.
- Методология всеобщего управления качеством (Total Quality Management) – совокупность методов управления предприятием, основным рычагом которых является качество.

Методы управления знаниями (Knowledge Management) – междисциплинарное направление науки и практики, реализующееся в конкретных бизнес-приложениях, направленных на повышение эффективности процессов приобретения и использования знаний. Применяется на стыке информационных технологий, управления персоналом, управления бизнес-процессами.

Одной из задач стратегического менеджмента является управление инновациями, прежде всего, посредством принятия решений по отбору нововведений и распределению между ними ограниченных ресурсов компании. Учитывая инновационный потенциал рассматриваемого хлебопекарного производства и стоящие перед ним цели, авторы рекомендуют акцентировать внимания руководства на перечисленных далее видах инноваций, распределенных по определенным признакам:

А. Если рассматривать предприятие как систему:

- Инновации на входе в предприятие (изменения в выборе и использовании сырья, материалов, машин и оборудования, информации);
- Инновации на выходе с предприятия (изделия, услуги, технологии, информация);
- Инновации системной структуры предприятия (управленческой, производственной, технологической).

В. По сферам приложения:

- Товарно-продуктовые инновации – связаны с изменениями, вносимыми в реализуемый товар для удовлетворения новой структуры потребностей, и изменениями, вносимыми в производимый продукт для снижения производственных затрат;
- Технолого-технические инновации – связаны с изменениями в используемой технике и технологии производства на предприятии в основном с целью снижения издержек, а, следовательно, осуществления ценовой конкуренции;
- Организационно-управленческие инновации – разновидность нетехнологических инноваций, направленных на повышение эффективности аппарата и системы управления, совершенствование организационных структур предприятия для достижения целей его функционирования и развития.

С. По источнику инновационной идеи: нисходящие – инновационные предложения, вызванные потребностями улучшения рыночного положения организации и развития технико-технологической базы производства.

Д. По степени новизны:

- Модифицирующие (развивающие, дополняющие, дифференцирующие, модернизирующие) инновации. Их разработка и внедрение связаны с существенно более низкими затратами, осуществляемыми в условиях сравнительно низкой неопределенности и рисков.

- Псевдоинновации – новшества, являющимися таковыми только для внедряющего их предприятия (заимствованные, имитационные).

Е. По отношению к разработке:

инновации, разработанные силами данного предприятия, или инновации, разработанные в отрасли.

Ф. По характеру удовлетворяемых потребностей:

- Ориентированные на существующие потребности, которые не удовлетворены частично или полностью;
- Создающие новые потребности.

Очевидно, что в условиях увеличивающейся глобальной конкуренции особую актуальность приобретает стратегическое планирование инноваций, основной целью которого является создание долгосрочного конкурентного преимущества посредством постоянной адаптации к быстро изменяющейся внешней среде. Главная задача стратегического планирования инновационной деятельности состоит в построении схемы инновационного поведения компании на рынке. Однако необходимо заметить, что инновации являются источником развития лишь в случае их эффективного и оперативного использования, а также создания благоприятной среды для их инициирования.

#### Библиографический список

1. **Аньшина, В.М.** Инновационный менеджмент: Концепции многоуровневых стратегий и механизмов инновационного развития: учеб. пособие / В.М. Аньшина, А.А. Дагаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2006.
2. **Афонин, И.В.** Инновационный менеджмент: учеб. пособие / И.В. Афонин. – М.: Гардарики, 2005.
3. **Балабанов, В.С.** Инновационный менеджмент: учеб. пособие / В.С. Балабанов, М.Н. Дудин, Н.В. Лясников. – М.: АП «Наука и образование», 2008.
4. **Бараненко, С.П.** Инновационный менеджмент: учебно-методический комплекс / С.П. Бараненко, М.Н. Дудин, Н.В. Лясников. – М.: ЗАО Центрполиграф, 2010.
5. **Вертакова, Ю.В.** Управление инновациями: теория и практика: учеб. пособие / Ю.В. Вертакова, Е.С. Симоненко. – М.: Эксмо, 2008.
6. **Виханский, В.С.** Стратегическое управление / В.С. Виханский. – М.: Экономистъ, 2008.
7. **Дудин, М.Н.** Инновации на предприятиях малого бизнеса // Креативная экономика. 2007. № 7.
8. **Ильенкова, С.Д.** Инновационный менеджмент / С.Д. Ильенкова. – М.: Юнити, 2005.
9. **Маренков, Н.Л.** Инноватика: учеб. пособие / Н.Л. Маренков. – М.: КомКнига, 2005.
10. **Оголева, Л.Н.** Инновационный менеджмент: учеб. пособие / Л.Н. Оголева. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**I.B. Romashova, O.V. Khokhlova**

#### INNOVATION ACTIVITY AS A MEANS OF CONTROL OF STRATEGIC ADVANTAGE

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Authors investigate different techniques of innovation management from the point of view of control of transformations at a baking manufacture. The aggregate scientific work experience in this sphere is assumed as a basis for this article. Authors expound instruments and the essence of the techniques and types of innovations urgent for a small baking manufacture and underline their point of view with the help of original quotations.

*Key words:* innovations, innovation activity, reframing, benchmarking, engineering, reengineering, “just-in-time” technique, methodology of the total quality management, knowledge management techniques.

УДК 338

С. Н. Яшин, Н.А. Мурашова

## ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ И ИСТОЧНИКИ ЕГО ИНВЕСТИРОВАНИЯ В ПОСТКРИЗИСНОМ ПЕРИОДЕ В РОССИИ И НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Инновационное развитие предприятий России и Нижегородской области осложняется рядом проблем, связанных с экономическим кризисом; низкой технологической оснащенностью производства; ухудшением институциональных условий инновационного бизнеса; малой долей участия российского бизнеса в финансировании НИОКР и др. Это ведет к сокращению наукоемкой продукции в совокупном экспорте и снижению числа инновационно-активных предприятий, следовательно, ухудшению экономики и инновационного климата страны.

В статье, на примере Нижегородской области показана необходимость комплексной оценки эффективности инновационной деятельности для возможности сравнения ее по предприятиям различных отраслей и регионов, а также для разработки комплекса необходимых мер и стратегий дальнейшего инновационного развития.

*Ключевые слова:* экономический кризис, инновационное развитие, институциональные условия, инновационная активность, инновационный климат, оценка, экономическая эффективность, предприятие.

Инновационное развитие является наиболее перспективным способом хозяйствования в современных условиях, который базируется на непрерывном поиске и использовании новых методов и сфер реализации потенциала предприятия в условиях изменчивой внешней среды. В связи с этим растет инновационный потенциал, расширяются адаптационные способности предприятия к изменениям внешней среды, что, в свою очередь, может позволить реализовать новые возможности, обеспечивая устойчивое развитие предприятия.

Ключевая проблема российской экономики осталась неизменной с советского периода – низкая технологическая оснащенность производства. Задача модернизации производства в советский период решалась за счет административной мобилизации ресурсов внутри страны наряду с определенными импортными закупками оборудования. В настоящее время единственным способом модернизации является прямая интеграция российской экономики и мировое хозяйство. Как показывает зарубежный опыт, передача технологий, а также вливание иностранных инвестиций в технологическое переоснащение производства происходят лишь тогда, когда экономическая система страны настолько интегрирована в экономический процесс зарубежных стран, что повышает заинтересованность стран-доноров в экспорте технологий и инвестиций.

Последний финансово-экономический кризис обнажил острые проблемы перехода российской экономики на инновационный путь развития, который был заявлен на высоком правительственном уровне уже более шести лет назад, при этом следует отметить, что особых подвижек в этой области не наблюдается. Сравнение России не только с высокоразвитыми, но и развивающимися государствами показывает, что достижения отечественной экономики в данной сфере выглядят весьма скромно (табл. 1).

Россия, находясь на ресурсной стадии развития, в ближайшей перспективе не станет лидером в инновационном плане. Хотя в 2004–2005 гг. наметилась положительная тенденция в динамике финансирования и проведения прикладных научных исследований, о чем свидетельствуют следующие данные: финансирование исследований выросло более чем на 50%; количество выданных резидентам патентов увеличилось на 20%; увеличился экспорт высокотехнологичной продукции в 2008 г. по сравнению с 2005 г. в 1,3 раза; экспорт в секторе услуг в сфере высоких технологий увеличился в три раза.

Таблица 1

**Отдельные показатели инновационной активности в некоторых странах  
и регионах мира в 2008 г.**

Показатель	РФ	США	Евросоюз	Германия	Франция	Китай	Южная Корея	Сингапур
Расходы на НИОКР; в процентах к ВВП	1,08	2,61	2,01	2,52	2,12	1,42	3,23	2,39
Экспорт высоких технологий в процентах к промышленному экспорту	7	28	14	14	19	30	33	46
Лицензионные платежи, полученные в млрд долл.	0,4	82,6	27,6	7,2	8,8	0,3	1,9	0,7
Лицензионные платежи уплаченные в млрд долл.	2,8	25	54,2	9,7	4,6	8,2	5,1	9,9
Зарегистрированные заявки на платежи резидентами, тыс. ед.	22,5	241,3	81,9	47,9	147,7	153,1	47,9	14,7
Зарегистрированные заявки на платежи нерезидентами, тыс. ед.	11,9	214,8	21,6	13,1	2,4	92,1	13,1	2,4
Зарегистрированные заявки на торговые марки резидентами, тыс. ед.	31,5	256,4	313	72,8	70,4	669,3	112,2	5,4
Зарегистрированные заявки на торговые марки нерезидентами, тыс. ед.	10,4	33,1	21,9	3,4	3,2	56,8	20,1	11,2

Для развития инновационного сектора экономики в странах со средним уровнем доходов важны также прямые иностранные инвестиции и импорт товаров. Прямые иностранные инвестиции в 2006–2008 гг. в обрабатывающие отрасли РФ увеличились почти в два раза. Инвестиционный импорт в этот период в среднем вырос примерно на 30% в год. В условиях кризиса упал поток прямых иностранных инвестиций в несырьевой сектор экономики (в 1,5 раза) и инвестиционный импорт (на 40%). По данным Всемирного экономического форума, в кризисном периоде увеличилась восприимчивость нашей экономики к современным зарубежным технологиям – вырос индекс технологической готовности, включающий в том числе использование передовых технологий, адаптацию фирм к новым технологиям, передаче технологий прямыми инвесторами.

Однако эти тенденции мало что меняют в неблагоприятной ситуации, в инновационной среде в РФ за 2005–2008 гг. сократились: численность исследователей – на 11,8 %; количество персонала, занятого выполнением научных исследований и разработок – на 14,2%; численность научного вспомогательного персонала – на 19%. В 2000–2008 гг. снизилось количество: исследовательских организаций – на 28,3 %; научно-исследовательских, проектно-конструкторских подразделений в организациях на 15,8%; проектных и проектно-исследовательских организаций – на 50,6%. Однако за тот же период возросло количество производственных конструкторских бюро на 31,4%, опытных заводов – на 75,6%, что обусловлено реакцией на повышение рыночного спроса.

В настоящее время в России число предприятий, осуществляющих инновационную деятельность, является незначительным, так, в 2009 г. их удельный вес составлял 9,4%, тогда как в Германии – 73 %; Бельгии – 58%; Эстонии – 47%; Чехии – 41%. При этом в РФ госу-

дарственную помощь на внедрение технологических инноваций получают не более 1% предприятий, в Австрии – 18%; Италии – 14%; Нидерландах – 13%; Германии – 9%.

В нашей стране мала доля высокотехнологичной продукции в совокупном экспорте – 2%, из них собственно научные исследования и разработки составляют 0,4%. Это положение выглядит особенно критичным при сравнении с другими странами: в Китае доля высокотехнологичной продукции в совокупном экспорте составляет 17%; в Германии – 16%; Франции – 20%; США – 28%. Доля нашей страны в мировых затратах на НИОКР сократилась за 1997–2007 гг. на 5 %, в тот же период Китай увеличил свою долю в затратах на НИОКР на 103 %; Турция – на 79%; ЮАР – на 40%.

Ухудшение позиций нашей страны на фоне других государств в области НИОКР и инновационной деятельности, в ряде аналитических документов, объясняется нехваткой финансовых ресурсов, возникшей, по причинам экономического кризиса, снижения цен на углеводородное сырье, трудностей трансформационных процессов и т.д. В действительности недостаточное финансирование инновационной деятельности является результатом низкого технико-технологического уровня предприятий и не рассматривается ими как важное направление инвестиций.

Обсуждая причины сложившейся ситуации, представители всех экономических школ сходятся во мнении, что дело в практической государственной экономической политике. В качестве примера можно принести помощь государства крупным, стратегически важным, но неэффективным предприятиям. Другим примером может служить предложенный Минэкономразвития России план развития экономики до 2030 г. с сохранением дефицита бюджета до 2020 г. и с более сильной зависимостью от конъюнктуры мировых цен на нефть и высоким риском инфляции. В настоящее время уже нет сомнений в достаточности только инвестиционно-инновационной активности государства, так как в рыночной экономике, государство имеет ограниченные возможности воздействия на неэкономические субъекты.

Участие российского бизнеса в финансировании НИОКР в процентах к ВВП не внушает оптимизма: в 4 раза меньше, чем в Великобритании; в 5 раз – чем в Китае; в 2 раза – чем в Бразилии. При этом наиболее рентабельными (около 30%) в РФ являются компании, занятые добычей и экспортом нефти, природного газа, металлов, а инновационно-активных в технологическом плане предприятий – около 6%. В отраслях машиностроения, в производстве оптического оборудования, электронного и электрооборудования рентабельность по товарам составляет примерно 8%, а инновационно-активных в технологическом плане предприятий – около 20%. Следовательно, сырьевые отрасли не выступают заказчиками технологических инноваций, в результате не растет технико-технологический уровень компаний сырьевого сектора экономики, а машиностроительные отрасли имеют очень ограниченный спрос на свою продукцию. Крупные компании в сырьевом секторе, не стали «локомотивами» инновационного развития, а если крупный бизнес не предъявляет спрос на инновации, то вряд ли можно рассчитывать на развитие малого инновационного предпринимательства.

Государство, выступая субъектом инновационной деятельности, обязано формировать институциональные условия для инновационной активности бизнеса. Всемирный экономический форум поставил Россию по общему качеству госинститутов на 118-е место из 139 стран.

Рыночная экономика базируется на конкуренции, спросе и предложении. На предприятиях спрос предъявляют собственники активов. В РФ – это чаще физические лица, которые являются одновременно и управляющими предприятий. Исследователи назвали такое состояние «экономикой физических лиц», что означает сосредоточение экономической власти у отдельных лиц и членов их семей, которые контролируют производство продукции и распределение доходов от их реализации. Поэтому для российских предпринимателей главным конкурентным преимуществом, позволяющим получать рентный доход – «покровительство» со стороны органов власти и ее представителей, что противоречит инновационной активности.

Произвол государства в лице его представителей приводит к асимметрии экономиче-



ской власти. Собственник для получения дохода от вложенного капитала вынужден делать инвестиции не в инновации, а во власть, чтобы либо самому обладать экономической властью, либо найти защиту у власти. В таких институциональных условиях инвестирование бизнеса в инновации встречает ряд проблем. Одной из них становится величина транзакционных издержек инновационной деятельности. Другая проблема – совершенствование человеческого капитала, с которым тесно связан инновационный тип экономического роста. В 2000–2009 гг. доля населения, имеющего доходы ниже прожиточного минимума, сократилась с 29% до 13,1%, но в 2000 г. размер прожиточного минимума составлял 53% среднедушевых доходов, а в 2009 г. – около 30%. По данным специалистов Института социально-экономических проблем народонаселения Российской академии наук, более 2/3 общего количества малоимущих и крайне бедных занято в экономике.

Специалисты агентства Standart and Poors отметили на основе анализа деятельности 90 крупнейших российских компаний, что средний индекс прозрачности российских предприятий, работающих только на внутренний рынок, в 1,3–1,5 раза ниже индекса компаний, включенных в биржевой листинг в Лондоне и Нью-Йорке.

В целом для оздоровления экономики и улучшения инвестиционного климата в нашей стране способствовало бы вступление во Всемирную торговую организацию и Организацию экономического сотрудничества и развития. Эти организации помогают отстаивать верховенство закона в интересах отечественных и зарубежных инвесторов.

Потенциал, накопленный в Нижегородской области, позволяет конкурировать на мировом рынке инновационной продукции. Однако, как и в целом по стране, в области сложилось несоответствие между достаточно большой численностью занятых в сфере научной деятельности специалистов, количеством получаемых патентов и отстающим от современных требований технологическим уровнем производства.

Удельный вес инновационно-активных предприятий Нижегородской области в 2009 г. составлял около 3,6% (в среднем по России – 9,8%, США – 30%), что объясняется неудовлетворительным состоянием инновационного климата; отсутствием в последние годы областной поддержки инновационной, научной, научно-технической и научно-исследовательской деятельности; несформированностью целостной инновационной системы, способной обеспечить технологический коридор от научного потенциала до непосредственных результатов исследовательской деятельности к рынку.

Важнейшей целью инновационной политики государства, реализуемой как в России, так и в Нижегородской области, является обеспечение устойчивого сбалансированного экономического развития и повышение качества жизни населения на основе создания условий для роста инновационного уровня и конкурентоспособности экономики, продвижения инновационной продукции на межрегиональный и международный рынки. В современных условиях внедрение системы мониторинга инновационного развития будет способствовать росту инновационной активности компаний и повышению конкурентоспособности страны, регионов.

В связи с этим в 2010 году Правительством Нижегородской области, в частности, Министерством промышленности и инноваций, выпущен каталог промышленных предприятий «Исследование инновационной активности промышленных предприятий и организаций Нижегородской области», который содержит информацию о развитии инновационной деятельности в регионе за ряд предшествующих лет. Информационной основой для идентификации инновационной активности предприятий (ИАП) служила форма федерального статистического наблюдения «№4-инновация». Основные результаты исследования инновационной активности Нижегородской промышленности: общее количество исследуемых предприятий составляет 889 предприятий, в это число не вошли: предприятия розничной и оптовой торговли; предприятия, занимающиеся издательской деятельностью; предприятия, организованные в местах лишения свободы.

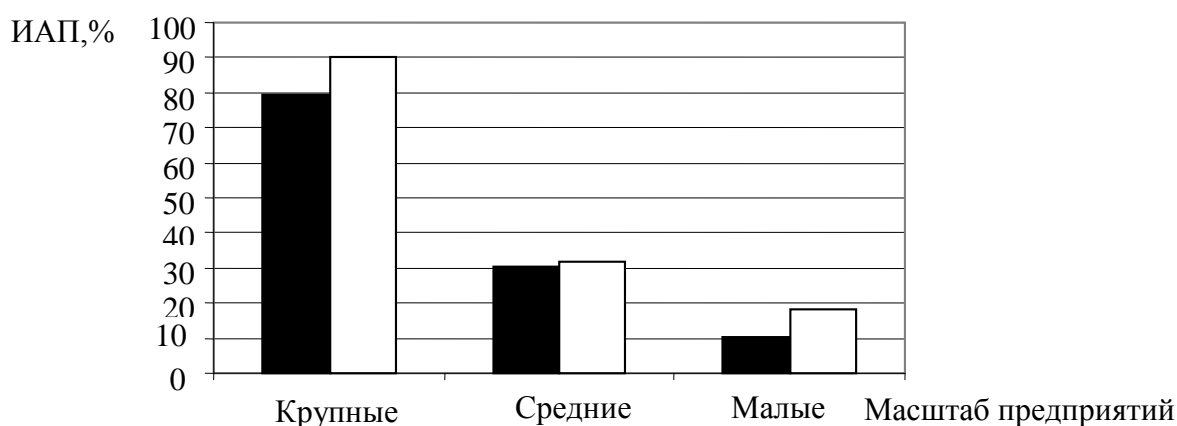
При проведении исследований, по разным причинам, часть предприятий не принима-

ла в них участия: в 2008 году – 724; в 2009 году – 665. Основными причинами уменьшения этого числа являются: исключение предприятия из федерального списка, ликвидация или нахождение в стадии ликвидации, технические сбои в компьютерных сетях, прямые отказы от заполнения формы №4 – инновация.

По результатам деятельности в 2009 году, выявило 185 инновационно-активных предприятий, деятельность которых связана с реализацией или разработкой технологических, маркетинговых или организационных инноваций, что составляет 28% от общего количества исследуемых предприятий. Для сравнения приведем данные 2008 года: инновационно-активных предприятий – 230, что составляло 31,6% от общего количества исследуемых предприятий. Наличие этих вариаций подтверждает необходимость проведения ежегодного мониторинга инновационной активности промышленности, для четкого выявления тенденций с целью принятия регулирующих управленческих мероприятий.

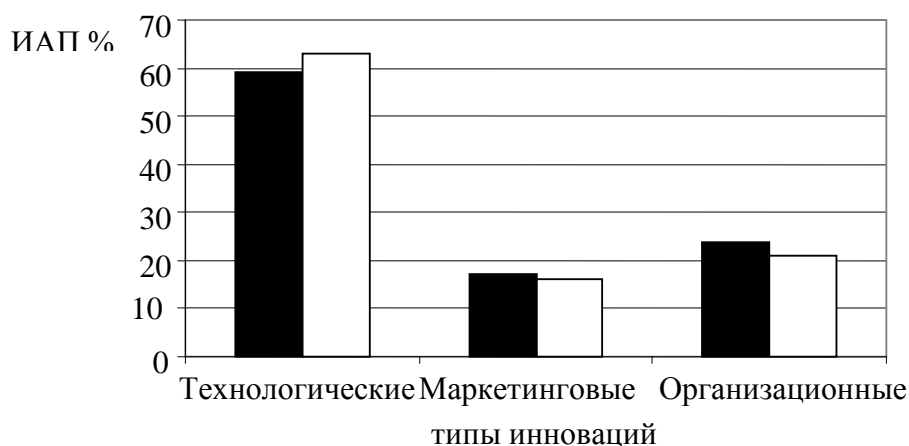
Удельный вес предприятий, разрабатывающих или внедряющих новые (либо усовершенствованные) продукты или технологические процессы по странам Европейского Союза (ЕС), составляет: Ирландия – 74%; Дания – 71%; Германия – 69%; Австрия – 67%; Греция – 29%; Португалия – 26%. Сравнение с аналогичными показателями Нижегородской области позволяет сделать вывод о том, что инновационная активность Нижегородской области соответствует инновационной активности таких стран ЕС, как Греция и Португалия, но еще далека от инновационной активности таких стран, как Ирландия, Германия, Австрия.

На рис. 1 представлена диаграмма, иллюстрирующая удельный вес инновационно-активных предприятий по масштабу их бизнеса: крупные, средние и малые предприятия. Отметим, что такое распределение не характерно для инновационно-ориентированных экономик, базирующихся на знаниях. Для них имеет место обратная зависимость, при которой процент инновационно-активных предприятий максимален для группы малых предприятий, существенно меньше для средних и минимален для крупных. Это подтверждает необходимость формирования в Нижегородской области структур (технопарки и бизнес-инкубаторы), занимающихся созданием малых инновационных фирм в массовом количестве. Переход экономики Нижегородской области на инновационный путь развития во многом определяется успехом в создании таких структур.



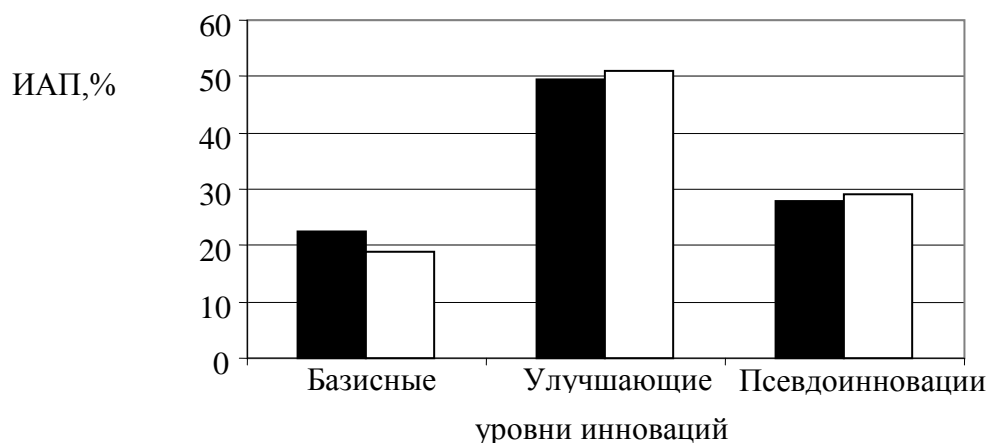
**Рис. 1. Удельный вес инновационно-активных предприятий (ИАП) в группах субъектов крупного, среднего и малого бизнеса, %:**  
 ■ – 2009 г.; □ – 2008 г.

На рис. 2 приведены распределения общего числа инновационно-активных предприятий по типам инноваций (технологические, маркетинговые, организационные). Как видно из рис. 2, в 2009 году технологические инновации реализовывали 59,3% предприятий; маркетинговые – 17,0%; организационные 23,7% предприятий от общего числа. Данная диаграмма показывает, что в 2009 году, как и в 2008, нижегородские предприятия концентрировали свои усилия в области технологических инноваций.



**Рис. 2. Распределение инноваций по типам:**  
 ■ – 2009 г.; □ – 2008 г.

На рис. 3 приведены распределения общего числа инновационно-активных предприятий по уровням инноваций (базисные, улучшающие, псевдоинновации). Из рис. 3 видно, что в 2009 году удельный вес базисных инноваций составил 22,6%; улучшающих – 49,6%; псевдоинноваций – 27,8%. Данная диаграмма показывает, что в 2009 году, как и в 2008, преобладают улучшающие инновации. Значительным является и число предприятий, реализующих псевдоинновации.



**Рис. 3. Распределение инноваций по уровням:**  
 ■ – 2009 г.; □ – 2008 г.

Исследование распределения числа инновационно-активных предприятий по отраслям в 2009 г. показало, что совокупность всех предприятий Нижегородского региона относилась к следующим отраслям: машиностроение; радиоэлектроника, приборостроение, информатика и связь; энергетика, предприятия ЖКХ и коммунального сервиса; производство строительных материалов и добывающая промышленность; химическая и нефтехимическая промышленность, производство медикаментов и стекла; целлюлозно-бумажная промышленность и деревообработка; черная и цветная металлургия; легкая промышленность; пищевая промышленность; научное и инфраструктурное обеспечение инноваций в промышленности. Проведенное исследование характеризует наибольшую инновационную активность в следующих отраслях: радиоэлектроника, приборостроение, информатика и связь; машиностроение; химическая, нефтехимическая промышленность, производство медикаментов и стекла. При этом пищевая промышленность по количеству инновационно-активных предприятий соизмерима с химией и нефтехимией, а ее отнесли к числу отраслей с низкой инновационной актив-

ностью, поскольку в этой отрасли преобладающими являются псевдоинновации. Отметим, что, согласно закономерностям инновационной экономики, наиболее инновационно-активной группой являются малые предприятия, что наблюдается в радиоэлектронике и приборостроении.

Результаты исследования иллюстрируют распределение инновационной активности предприятий по типам инноваций (технологические, маркетинговые, организационные) для отдельных отраслей, при этом для каждого типа показано распределение по уровням новизны используемых инноваций (базисные, улучшающие, псевдоинновации). В табл. 2 продемонстрированы результаты по данным 2009 г. только для отраслей с наибольшей инновационной активностью, таких как радиоэлектроника, приборостроение, информатика и связь.

Таблица 2

**Распределение инновационно-активных предприятий радиоэлектроники и приборостроения, информатики и связи в 2009 г.**

Масштаб предприятия/ тип инноваций	Крупные	Средние	Малые
Технологические, %			
- базисные	43,70	43,70	12,60
- улучшающие	21,10	52,60	26,30
- псевдоинновации	0,00	0,20	0,10
Маркетинговые, %			
- базисные	0,10	0,00	0,00
- улучшающие	33,30	45,70	25,00
- псевдоинновации	0,00	0,00	0,02
Организационные, %			
- базисные	0,00	0,00	0,00
- улучшающие	25,00	18,70	15,00
- псевдоинновации	15,00	19,00	0,02

Анализ табл. 2 показал, что для исследуемых предприятий характерна концентрация основных усилий в области технологических инноваций. При этом в области технологических инноваций базисные составляют 43,7% для крупных и для средних предприятий, а 12,6% – для малых, такое распределение является естественным. Отметим, что в отрасли радиоэлектроники продуктовые базисные инновации реализует 16 предприятий, из них семь крупных, семь средних и два малых предприятия, что соответствует – 43,7%; 43,7% и 12,6%. Технологические улучшающие инновации составляют 21,1% для крупных предприятий; 52,6% – для средних; 26,3% – для малых. Это соответствует значительной доле малых и средних предприятий в данном секторе. Доля псевдоинноваций для данной области весьма незначительна. В области маркетинговых инноваций базисные отмечены только у одного предприятия. Совершенствованием своей маркетинговой политики на уровне улучшающих инноваций занимается 33,3% крупных; 45,7% средних и 25% малых инновационно-активных предприятий. На уровне заимствований (псевдоинновации) своей маркетинговой работы занимаются в основном малые предприятия. В области организационных инноваций базисных разработок не отмечено. Всего 10 предприятий занимаются совершенствованием своей организационной работы на уровне улучшающих инноваций: из них пять крупных, три средних и два малых. Путем заимствования передового опыта других предприятий (псевдоинновации) совершенствованием своей организационной работы занимается 6 предприятий: из них два крупных, три средних и одно мелкое.

Для предприятий машиностроения характерна концентрация основных усилий в области технологических инноваций в большей степени, чем для предприятий радиоэлектроники (табл. 3). Работа по внедрению маркетинговых и организационных инноваций находится примерно на одном уровне предшествующей отрасли. Однако группа малых инновационных предприятий в этом секторе промышленности практически отсутствует.

Таблица 3

## Распределение инновационно-активных предприятий машиностроения в 2009 г.

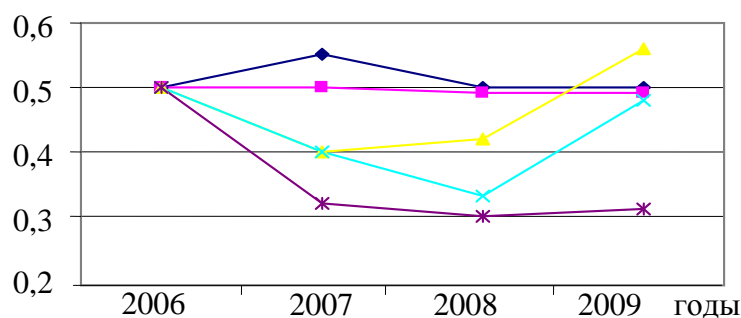
Масштаб предприятия/ тип инноваций	крупные	средние	малые
Технологические,%			
- базисные	82,4	17,7	0,0
- улучшающие	28,6	71,4	0,0
- псевдоинновации	0,1	10,9	0,0
Маркетинговые,%			
- базисные	0,1	0,0	0,0
- улучшающие	0,1	19,0	0,1
- псевдоинновации	17,0	30,0	0,0
Организационные,%			
- базисные	14,0	0,0	0,0
- улучшающие	21,0	15,0	0,0
- псевдоинновации	21,0	29,6	0,0

В области технологических инноваций предприятий машиностроения: базисные составляют 82,4% для крупных предприятий и 17,7% – для средних; улучшающие составляют 28,6% для крупных предприятий и 71,4% – для средних; псевдоинновациями занимается одно крупное и два средних предприятия. В области маркетинговых инноваций базисные инновации внедряются одним крупным предприятием; улучшающие инновации также одним крупным; псевдоинновациями в маркетинговой сфере занимаются три крупных предприятия. В области организационных инноваций отмечены две разработки по внедрению базисных инноваций крупными предприятиями. Совершенствованием своей организационной работы за счёт улучшающих инноваций занимается пять крупных и три средних предприятия. На уровне псевдоинноваций в организационной работе занимается пять крупных и девять средних предприятий.

Министерством промышленности и инноваций Нижегородской области для определения общих тенденций инновационного развития региона используется система обобщенных индексов. Частные показатели объединяются в один общий показатель, динамика, изменения которого отражает тенденции инновационного развития региона. В проведенном исследовании использовалась концепция сбалансированной системы показателей, предложенная Д. Нортоном и Р. Капланом и прошедшая успешную апробацию на многих экономических системах. Она основана на увязке четырех общих показателей экономической системы: взаимоотношения с клиентами, внутренних бизнес-процессов, финансовых показателей, развития и обучения. Анализ региональных инновационных процессов потребовал расширения классической модели Каплана – Нортона за счет введения дополнительного показателя: показателя трансфера технологий. Результаты расчетов отдельных обобщенных показателей инновационного развития Нижегородского региона за 2006–2009 гг. приведены на рис. 1, а динамика обобщенного индекса инновационного развития Нижегородского региона представлена на рис. 4.

Общий показатель «обеспеченность финансовыми ресурсами» включает в себя такие частные показатели, как: объем инновационной продукции в расчете на одного работающего; количество собственных средств на технологические инновации в расчете на одного работающего; оценка фактора высокой стоимости нововведений.

Обобщенный показатель «клиентская ориентация» включает в себя такие частные показатели, как: коэффициент конкурентоспособности; доля высокотехнологичной продукции в объеме промышленной продукции по предприятиям первой группы.



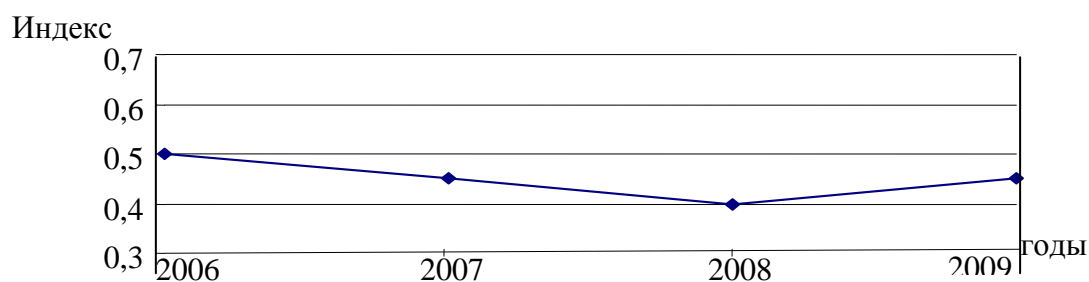
**Рис. 4. Динамика обобщенных показателей инновационного развития Нижегородского региона:**

- ◆ - обеспеченность финансовыми ресурсами; ■ - клиентская ориентация;
- ▲ - внутренние инновационные процессы;
- х - уровень развития и обучения; \* - интенсивность трансфера технологий

Общий показатель «внутренние инновационные процессы» включает в себя следующие частные показатели: доля инновационно-активных предприятий; затраты на технологические инновации из внебюджетных фондов и иностранных инвестиций на одного работающего; оценка фактора низкого инновационного потенциала предприятия; удельный вес затрат на выполнение исследований и разработок, приобретение новых технологий и программных средств в затратах на технологические инновации.

Обобщенный показатель «интенсивность трансфера технологий» включает в себя следующие частные показатели: количество совместных проектов по выполнению исследований и разработок, в которых участвуют организации в расчете на одного работающего; число приобретаемых новых технологий на 1000 работающих; число передаваемых новых технологий на 1000 работающих.

Результат анализа данных показал некоторое улучшение инновационных показателей Нижегородского региона в 2009 г. по отношению к 2008 г., даже несмотря на последствия экономического кризиса (рис. 5).



**Рис. 5. Обобщенный динамический индекс инновационного развития Нижегородского региона**

Повышение инновационной активности объясняется следующими причинами: поддержкой местными властями малого предпринимательства; общей стабилизацией российского рынка. Также оказали влияние создавшиеся в Нижегородской области благоприятные условия для развития бизнеса – прежде всего за счет отсутствия во многих сферах деятельности серьезной конкуренции.

В Нижегородской области в конце 2008 г. сохраняется общероссийская тенденция финансирования расходов малыми предприятиями за счет собственных средств, не привлекаемая для этих целей заемные. Это несмотря на то, что большинство банков, работающих в области, предлагают услуги по кредитованию малого бизнеса, а местными властями разработаны механизмы по кредитно-финансовой поддержке малых инновационных предприятий. В

основном предложении на рынке кредитования малого бизнеса в Нижегородской области определяют следующие банки: местный ОАО «НБД банк», лидирующий в кредитовании субъектов малого бизнеса Сбербанк России, «ВТБ 24», «Промсвязьбанк» и др.

В настоящее время региональными властями реализуется следующая мера – Областной фонд поддержки малого предпринимательства предоставляет поручительство при кредитовании приоритетных инновационных проектов. Подобные бюджетные гарантии снимут недоверие банков к кредитоспособности малых заемщиков и решат проблему залога. Как следствие, ожидается повышение спроса со стороны предпринимателей на кредитные продукты.

В целях содействия развитию инновационного бизнеса в Нижегородской области для предприятий установлен ряд льгот: право выплачивать 50% от стоимости арендной платы за пользование имуществом, арендованным для реализации инновационного проекта; налоговые льготы по налогу на имущество организации, транспортному налогу, налогу на прибыль организации в части средств, зачисляемых в областной бюджет согласно Налоговому кодексу РФ. С помощью налоговых льгот государство в лице Правительства Нижегородской области старается вывести малый бизнес из «тени», дать толчок к его легализации. Теневая экономика – это проблема не только Нижегородской области, но и всей России.

Пока инновационным предприятиям надеяться на средства частных инвесторов не приходится. Специализированных инвестиционных компаний, занимающихся венчурным финансированием, в области нет. Привлечение инвестиций как внутри области, так и за ее пределами затрудняется по причине отсутствия единой информационной базы, содержащей сведения обо всех предлагаемых к реализации инновационных проектах, разработках.

Возможность получить недорогой кредит даст стимул инновационным предприятиям к увеличению объемов производства, проведению новых научных исследований и осуществлению разработок.

В заключение следует отметить, что тенденции развития современных компаний показывают необходимость комплексной оценки эффективности инновационной деятельности для возможности сравнения ее по предприятиям различных отраслей и регионов, а также для разработки комплекса необходимых мер и стратегий дальнейшего инновационного развития.

*Дата поступления  
в редакцию 30. 01.2012*

**S.N. Yashin, N.A. Murashova**

## **INNOVATED DEVELOPMENT ENTERPRISES AND SOURCES IT'S INGESTIONS FOR PERIOD AFTER OF CRISIS IN RUSSIA AND NIZEGORODSCKAY REGION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

Innovated development enterprises in Russia and Nizerogorodsckay region be complicated a number problems witch tie down with crisis of economic, low technological equipment means of production, change for the worse institutional conditions innovational for business, smaller part of participation Russia's business in finance of scientific and experience designer elaboration and other. This have influence on reduce innovation products in joint export and decrease quantity innovational activity enterprises, therefore, change for the worse economics and innovational climate for country.

In the article cite as an example for Nizegorodsckay region show necessity complex of appreciation efficient of activity enterprises innovation from compare with enterprises of other branches and regions, and also from working out complex of necessary measures and strategy further innovated development.

*Key word:* crisis of economic, innovated development, institutional conditions, institution activity, innovational climate, appreciation, efficient of economic, enterprise.

УДК 372.881

Л.Б. Зорина

**СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматриваются социально-экономические факторы развития отечественной системы высшего профессионального образования, в частности, анализируются показатели динамики региональных систем ВПО и уровней среднемесячной заработной платы соответствующего им населения, что позволяет сделать выводы об основных тенденциях и проблемах, существующих в настоящее время в данной сфере.

*Ключевые слова:* Система высшего профессионального образования; регион; высшее учебное заведение; образовательные услуги; развитие; показатели; факторы; средняя заработная плата; тенденции.

В современном обществе высшее профессиональное образование практически во всех случаях является неотъемлемой составляющей и основанием профессионального и карьерного развития личности. Действительно, в наше время трудно найти высококлассного специалиста, не имеющего диплома, подтверждающего его квалификацию. С другой стороны, кадровые службы предприятий и организаций требуют от соискателей открытых вакансий подтверждения уровня их профессиональной компетентности и навыков. Кроме этого, осознание необходимости получения знаний, позволяющих свободнее и эффективнее ориентироваться в быстро, иногда кардинально изменяющейся ситуации, как в самой организации, так и за её пределами, всё чаще заставляет людей становиться студентами и слушателями высших учебных заведений. Безусловно, большая часть из них надеется в будущем получить конкретное возмещение осуществлённых в процессе обучения издержек. Как правило, оно связано с обеспечением карьерного роста и увеличением материального вознаграждения работников.

В этой связи целесообразно провести исследование показателей развития отечественной системы образования и её влияния на уровень заработной платы специалистов, являющейся, как правило, одним из основных факторов обеспечения и повышения уровня их благосостояния.

Анализ данных государственной службы по статистике и мониторингу позволяет сделать вывод о постоянном увеличении количества учреждений высшего профессионального образования в нашей стране на протяжении последних десятилетий. Так, в начале 1990–1991 учебного года подготовку дипломированных специалистов в нашей стране осуществляли 514 государственных организаций. Коммерциализация образовательных услуг привела к возникновению новых учебных заведений, которое через пять лет увеличило их общее количество почти в полтора раза (до 762 единиц), а ещё через пять лет до 965. Таким образом, суммарное количество высших учебных заведений за последнее десятилетие прошлого века увеличилось почти в два раза (за счёт появления 413 коммерческих и 84 бюджетных организаций) и в 2000 году составило 1068 учебных заведений. В дальнейшем темп роста этого показателя замедлился, но только в 2009–2010 учебном году впервые сократилось на двадцать две позиции число коммерческих вузов.

В то же время количество государственных и муниципальных вузов не уменьшилось, а даже увеличилось на две единицы. В итоге, в 2010 году в нашей стране статистические службы зафиксировали 1114 образовательных организаций системы ВПО. Динамика изменения количества высших учебных заведений в федеральных округах России представлена в табл. 1.

Практически та же динамика наблюдается в отношении изменения количества сту-



дентов, неуклонно возраставшего до прошлого учебного года, в котором впервые снизилось почти на сто тысяч и составило 7418,8 тысяч человек. Необходимо отметить, что уменьшение произошло, прежде всего, за счёт обучающихся на очном и очно-заочном (вечернем) отделениях – соответственно на 177,2 и 20,1 тысячи и составило 3280000 и 323600 человек. В то же время количество получающих высшее образование по заочной форме обучения возросло до 3639,2, увеличившись почти на 100 тысяч, а через экстернат – 175,9 тысячи. В последнем случае рост составил около 4400 человек и был обусловлен коммерческими образовательными организациями, значительно увеличившими данную категорию студентов.

Эти достаточно показательные явления стали следствием процессов, позволяющих говорить о новых тенденциях и направлениях развития системы высшего профессионального образования в России.

В этой связи представляет определённый интерес анализ изменения количества вузов и обучающихся в них студентов в регионах страны. В табл. 2 представлены наиболее характерные показатели данной динамики.

Очевидно, что наибольшее количество высших учебных заведений находится в двух крупнейших городах России: в Москве – 264 и Санкт-Петербурге – 89. Третье место делят Республика Татарстан и Краснодарский край – 34 вуза, пятое занимает Московская область – 33, далее следуют Свердловская область – 32 вуза, за ней Самарская – 29, Ростовская – 27, Новосибирская – 25 и другие. В Нижегородской области свою деятельность осуществляли 18 высших учебных заведений, два из которых являлись коммерческими.

В подавляющем большинстве регионов зафиксировано менее 10 высших учебных заведений, в том числе по одному – в республиках Калмыкия, Ингушетия, Тува, Алтай, Хакасия, Новгородской, Магаданской, Сахалинской, а также Еврейской автономной областях. Необходимо отметить, что почти все эти регионы характеризуются низкими уровнями социально-экономического развития.

Различна и динамика рассматриваемого показателя. Так, в течение пятнадцати последних лет он вырос в городе Москве на 120 пунктов, в Санкт-Петербурге – на 23, в Краснодарском крае – на 24, а в Татарстане, Московской и Свердловской областях – на 11, а в Нижегородской – на 4. Необходимо отметить, что в одном из самых обеспеченных регионов России – Ямало-Ненецком автономном округе была предпринята попытка создать хотя бы один негосударственный вуз, но она не увенчалась успехом.

Общее количество филиалов высших учебных заведений в 2009–2010 учебном году сократилось по сравнению с предыдущим периодом на 26 единиц и составило 1637 подразделений, в том числе государственных и муниципальных вузов – 1066, негосударственных – 571. Необходимо отметить, что количество первых немного (на 33 единицы), но сократилось, а последних, наоборот, увеличилось на 10 позиций.

Наибольшее количество филиалов учреждений системы ВПО в 2009–2010 учебном году – 119 (67 – государственных и муниципальных и 52 негосударственных) было зарегистрировано в Московской области. Причём оно увеличилось на 23 единицы, несмотря на общую тенденцию сокращения данной категории учебных заведений.

Однако безусловным лидером по этому показателю является Южный федеральный округ, в котором в том же году было зафиксировано 332 организации: в Краснодарском крае соответственно 83 (25 государственных и муниципальных и 57 негосударственных), Ростовской области – 63 (46 и 17 соответственно), Ставропольском крае – 58 (41 и 17), республике Дагестан – 41 (33 и 8), Волгоградской области – 35 (12 и 23). Среди аналогичных регионов выделяются также Тюменская область – 84 (68 и 16), в том числе Ханты-Мансийский – 42 (35 и 7) и Ямало-Ненецкий – 25 (20 и 5) автономные округа, Свердловская область – 48 (34 и 14), республики Татарстан – 53 (26 и 27) и Башкортостан – 43 (34 и 9), Красноярский край – 37 (24 и 13), Самарская – 34 (20 и 14), Ленинградская – 33 (24 и 9) и Кемеровская – 33 (27 и 6) области. Любопытно, что нет филиалов только в одном субъекте РФ – в Ненецком автономном округе Архангельской области, а по одному – в Ингушетии, Северной Осетии – Алании, Туве и Алтае.

Таблица 1

Динамика изменения количества высших учебных заведений в федеральных округах Российской Федерации в 2001–2009 годах

РФ и федеральные округа	1995/1996	2000/2001	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010
Российская Федерация	762	965	1068	1090	1108	1134	1114
Центральный федеральный округ	250	321	378	394	415	440	425
в том числе г. Москва	144	183	229	237	253	276	264
Северо-Западный федеральный округ	88	119	130	131	132	132	131
Южный федеральный округ (по 2009 год)	104	144	149	149	149	150	148
Приволжский федеральный округ	129	151	178	175	172	170	169
Уральский федеральный округ	53	68	70	73	73	75	75
Сибирский федеральный округ	92	111	114	118	117	117	117
Дальневосточный федеральный округ	46	51	49	50	50	50	49

Таблица 2

Динамика изменения количества высших учебных заведений в некоторых субъектах Российской Федерации в 2001–2010 годах

Субъекты РФ	1995/1996	2000/2001	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010
Российская Федерация	965	1039	1044	1071	1068	1090	1108
г. Москва	144	183	229	237	253	276	264
г. Санкт-Петербург	56	78	87	89	89	90	89
Республика Татарстан	23	31	35	34	33	33	34
Краснодарский край	10	28	33	33	35	35	34
Московская область	22	31	31	35	33	33	33
Свердловская область	21	27	26	30	31	31	32
Самарская область	22	27	29	29	29	30	29
Ростовская область...	24	31	31	31	27	28	27
Новосибирская область	22	25	26	26	26	26	25
Ставропольский край	20	26	23	23	23	24	23
Воронежская область	15	16	18	18	19	21	22
Сахалинская область	2	2	2	2	2	1	1
Республика Адыгея	2	2	1	1	1	1	1
Республика Калмыкия	1	2	1	1	1	1	1
Новгородская область	1	1	1	1	1	1	1
Республика Алтай	1	1	1	1	1	1	1
Республика Тыва	1	1	1	1	1	1	1
Магаданская область	1	1	1	1	1	1	1
Еврейская автономная область	1	1	1	1	1	1	1
Ямало-Ненецкий автономный округ	0	0	1	1	0	0	0

Таблица 3

Динамика изменения количества студентов высших учебных заведений в некоторых субъектах Российской Федерации в 1990–2010 годах

Субъекты РФ	90/91	1995/1996		2000/2001		2005/2006		2006/2007		2007/2008		2008/2009		2009/2010	
		*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
Российская Федерация	2824	2791		4741		7065		7310		7461		7513		7419	
		2655	135	4270	471	5985	1070	6133	1177	6208	1253	6215	1298	6136	1283
г. Москва	528,7	508,5		869,6		1198,0		1279,6		1312,6		1312,8		1281,1	
		450,5	57,7	708,7	160,9	856,7	341,3	883,8	395,7	889,7	423,0	893,2	419,5	882,0	399,1
г. Санкт-Петербург	247,5	217,8		356,7		428,8		439,5		450,1		458,7		454,3	
		205,6	12,2	315,6	41,1	381,0	47,8	390,8	48,6	395,6	54,5	400,1	58,6	395,0	59,3
Республика Татарстан	69,6	67,6		127,2		222,1		228,0		227,8		223,7		220,2	
		65,2	2,4	107,9	19,3	164,4	57,7	167,0	61,0	167,0	60,8	166,7	57,1	165,0	55,2
Свердловская область	85,2	85,2		153,9		208,9		211,1		214,4		220,8		218,5	
		82,0	3,2	139,4	14,5	179,1	29,8	177,7	33,4	180,5	33,9	181,8	39,0	182,6	35,9
Ростовская область	89,6	89,7		150,4		213,7		220,1		220,7		220,8		217,7	
		86,9	2,8	139,3	11,1	196,8	16,9	199,0	21,2	200,7	20	199,6	21,2	195,3	22,5
Нижегородская область	60,3	58,4		99,1		180,8		192,4		191,4		189,5		180,2	
		58,3	0,1	93,1	6,0	153,3	27,5	163,9	28,5	164,2	27,2	161,5	28,4	153,1	27,2
Республика Алтай	2,7	4,2		5,8		5,6		5,6		5,3		5,5		5,5	
		4,2	0	5,4	0,4	5,4	0,6	5,1	0,5	4,7	0,5	4,9	0,6	5,1	0,5

\* - в том числе количество студентов, обучающихся в государственных или муниципальных высших учебных заведениях,

\*\* - в том числе количество студентов, обучающихся в коммерческих высших учебных заведениях.

Таблица 4

**Динамика изменения показателей среднемесячной номинальной начисленной заработной платы  
в некоторых субъектах Российской Федерации в 2000–2009 годах**

Субъекты Российской Федерации	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Российская Федерация	2223,4	3240,4	4360,3	5498,5	6739,5	8554,9	10633,9	13593,4	17290,1	18637,5
Ямало-Ненецкий автономный округ Тюменской области	8964,7	12577,1	15876,2	20027,2	23890,2	27534,1	32336,4	37363,5	44168,7	46480,5
Ненецкий автономный округ Ар- хангельской области	5065,9	9225,9	12626,8	15918,3	19024,7	23016,8	28591,6	34380,7	41181,1	43965,1
Чукотский автономный округ	5686,5	8215,5	13501,7	17270,7	18618,2	23314,4	25703,0	30859,1	38317,4	42533,9
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра Тюменской области	8492,2	12589,8	14634,3	17209,3	19660,0	22828,5	26826,3	32227,9	37412,0	38386,6
г. Москва	3229,3	4924,2	6388,4	8611,6	10634,0	14424,6	17997,9	23623,3	30552,1	33358,0
Магаданская область	4247,9	5614,3	7444,3	9386,0	11174,6	14672,6	17747,2	22101,6	28030,4	32656,5
Сахалинская область	3680,8	4979,2	6959,3	9331,0	11711,1	15242,6	18842,1	23346,3	30060,4	32625,9
Камчатский край	4448,5	6157,2	8678,6	10319,6	12297,7	15477,1	18540,9	21814,7	27254,2	31569,9
Нижегородская область	1697,6	2508,2	3404,1	4205,9	5255,7	6533,4	8111,7	10302,0	13467,7	14746,5
Республика Ингушетия	1243,6	1758,2	2729,2	3576,0	4002,8	5448,9	6432,0	7285,4	8913,8	10957,6
Республика Калмыкия	1220,0	1759,1	2533,7	2960,8	3605,7	4495,0	5562,2	7101,2	9083,1	10848,7
Республика Северная Осетия - Алания	1166,7	1702,7	2446,9	2792,6	3457,2	4722,3	5918,4	7625,8	9150,9	10831,5
Кабардино-Балкарская Республика	1180,6	1625,1	2269,4	2877,1	3515,6	4653,3	5851,4	7213,9	9033,9	10777,4
Карачаево-Черкесская Республика	1130,9	1637,0	2425,7	3080,9	3696,2	4710,1	5870,9	7558,4	9383,6	10477,1
Республика Дагестан	878,7	1171,9	1834,3	2409,2	3000,1	3659,8	4530,0	5696,4	7595,1	9125,3

Приём на обучение в государственные и муниципальные образовательные учреждения высшего профессионального образования за счет бюджетов всех уровней в 2010 году составил 519,1 тысяч человек и сократился по сравнению с 2009 годом на 40,7 тысяч человек или на 7,3%. Удельный вес принятых с полным возмещением стоимости обучения уменьшился на 1,3 процентного пункта и составил 56,6% от общего числа принятых.

В 2010 году доля принятых в негосударственные образовательные учреждения высшего профессионального образования увеличилась на 0,7 процентного пункта и составила 14,6%.

Платных образовательных услуг населению в 2010 году было оказано на 326 миллиардов рублей или на 0,3% больше, чем в 2009 году.

Динамика общей численности студентов высших образовательных учреждений представлена в табл. 3. В 2009–2010 учебном году она снизилась по сравнению с предыдущим периодом почти на 100 тысяч и составила 7419 тысяч человек. Большая часть из них – 6136 тысяч студентов – обучалась в государственных и муниципальных организациях. Снижение количества обучающихся произошло во всех федеральных округах за исключением Дальневосточного, в котором наблюдается незначительное, но увеличение количества обучающихся.

Наибольшее количество студентов зафиксировано в Москве – 1281,1 тысячи и Санкт-Петербурге – 454,3 тысячи. Однако если в Москве количество обучающихся в негосударственных учреждениях составляло примерно одну треть, а именно 399,1 тысячи и уменьшилось на 20,4 тысячи, то во второй столице лишь 59,3 тысячи и увеличилось на 700 человек в сравнении с аналогичным показателем 2008–2009 учебного года. Третье место занимает республика Татарстан – 220,2 тысячи студентов, на том же уровне находятся показатели Свердловской – 218,5 тысячи и Ростовской – 217,7 тысячи – областей.

Наименьшее количество студентов (менее 10000) зафиксировано в республиках Алтае и Туве соответственно 5,5 и 6 тысяч, а также в Еврейской автономной области – 8100. И если в первых двух показатели не изменились, то в последнем произошло незначительное увеличение численности потенциальных выпускников.

Данная статистика наглядно показывает характер существующих в системе образования России проблем и настоятельной необходимости их решения в настоящее время. Безусловно, их влияние на социально-экономическое положение как в целом регионов, так и проживающих в них граждан. Однако его уровень, как показывают приведённые данные, напрямую не связан с наличием развитой системы учреждений высшего профессионального образования и, особенно, их филиалов в регионе.

Так, анализ показателей среднемесячной номинальной начисленной заработной платы работников организаций позволяет сделать следующие выводы. В целом по Российской Федерации в 2009 году данный показатель составил 18637,5 рублей. Его наибольшие значения были зафиксированы в Ямало – Ненецком, Ханты-Мансийском (Югре) и Чукотском автономных округах – соответственно 46480, 38386 и 42534 рубля, в Ненецком автономном округе Архангельской области – 43965,1 рубля, в Москве – 33358 рублей, в Магаданской и Сахалинской областях – 32656 и 32626 рубля, а также в Камчатском крае – 31570 (табл. 4).

В то же время, наименьшие показатели среднемесячной заработной платы отмечены всё в том же Южном федеральном округе, а именно, в Карачаево-Черкесской – 10477 рублей, Кабардино-Балкарской – 10777, Северной Осетии–Алании – 10832, Калмыкии – 10849, республике Ингушетии – 10958. Меньше десяти тысяч рублей, а именно 9125,3 рубля, получают работники только в одном субъекте Российской Федерации – в республике Дагестан, напомним, втором по количеству действующих филиалов высших учебных заведений регионе страны. Низкие значения средней заработной платы наблюдаются также в Алтайском крае – 10872 рубля, в Мордовии – 10937 рубля, Брянской области – 10951 рубль.

Конечно, уровень социально-экономических показателей российских регионов, одним из которых является среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников организаций, определяется не только количеством зарегистрированных на их территории

высших учебных заведений и их филиалов. В данном анализе не рассматривается, например, факторы трудовой миграции населения, а также возможности получения жителями регионов высшего образования в других субъектах. Однако до сих пор считалось, что незаменимой составляющей и даже основой любого прогрессивного движения является обеспечение этого процесса способными его осуществить высококвалифицированными интеллектуальными кадрами, подготовленными, прежде всего, в рамках региональных систем соответствующих образовательных организаций, осуществляющих качественную подготовку необходимых специалистов с учётом специфических аспектов стратегического развития конкретного субъекта страны. Это обстоятельство часто не учитывается филиалами высших учебных заведений, которые осуществляют свою деятельность, прежде всего, для достижения коммерческих целей, что, в конечном итоге, обуславливает возникновение проблем в системе высшего профессионального образования страны в целом.

Усиливающаяся коммерциализация образовательной деятельности, вызванная жёсткой конкуренцией между учебными учреждениями, существующими в условиях рыночной экономики, заставляет снижать требования как к содержанию реализуемых образовательных программ, так и к уровню их освоения студентами и слушателями. Эти тенденции особенно наглядно проявляются в процессе обучения по заочной, очно-заочной (вечерней), а также дистанционной формам обучения. Безусловно, они приводят к снижению как качества подготовки абитуриента, так и снижению статуса и имиджа высшего образования в нашей стране.

Мы вынуждены признать, что диплом о высшем профессиональном образовании, как правило, не предоставляет его обладателю не только гарантию высокой оплаты труда, но и вообще какой-либо работы в соответствии с присвоенной квалификацией. Основной проблемой выпускников последних лет становится поиск рабочего места, позволяющего получить необходимый и так ценный кадровыми службами практический опыт. При этом часто полученная квалификация не играет решающей роли в решении данной задачи.

В этой связи, хотелось бы отметить скорее «обратную» тенденцию, которая проявляется в результате практических наблюдений и анализа рассматриваемых статистических данных: высокая заработная плата определяет возможность получения необходимого высшего профессионального образования. Этому процессу способствует и сокращение количества бюджетных мест в вузах, а также имеющаяся возможность у студентов всех форм обучения совмещать работу и учёбу.

В сложившейся ситуации, учитывая достаточно высокую стоимость образовательных услуг, можно говорить о повышении актуальности и эффективности обучения коммерческих студентов, которые, как уже отмечалось ранее, заинтересованы в том, чтобы возместить затраченные на обучение средства и обычно не тратят их на образование, не связанное с будущей профессиональной деятельностью. Однако, как показал анализ, далеко не всегда полученные знания и квалификация обеспечивают соответствующий уровень заработной платы. Приходится признать, что необходимость в высшем профессиональном образовании обусловлена, прежде всего, конъюнктурными предположениями, возможностью карьерного роста, который обеспечивается, в частности, посредством предоставления соответствующего диплома.

Данное обстоятельство приобретает особое значение в современных условиях в связи с принятием Правительством РФ 7 февраля 2011 года Федеральной целевой программы развития образования на 2011-2015 годы. Согласно её положениям, «прогнозная численность студентов в 2013 году может составить 4,2 миллиона человек, снизившись более чем на 40 процентов к численности студентов вузов в 2009 году». В профессиональном образовании прогнозируется снижение численности профессорско-преподавательского состава на 20–30 процентов. С другой стороны, указанная программа определяет основные задачи в области профессионального образования, заключающиеся, в частности, в необходимости приведения содержания и структуры рынка профессионального образования в соответствии с потребностями рынка труда и развития системы качества образования и востребованности образовательных услуг.

Таким образом, исследованию факторов, определяющих выбор и содержание образовательных программ, реализуемых высшими учебными заведениями, в настоящее время должно уделяться приоритетное внимание, так как в сложившейся ситуации оно позволяет снизить негативные последствия сложившейся ситуации как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективе.

В Нижегородской области в 2009–2010 учебном году действовали 18 учреждений высшего профессионального образования, из них 16 – государственных и 2 негосударственных, а также 12 филиалов государственных и 15 негосударственных вузов. Количество студентов, обучающихся в высших учебных заведениях, снизилось со 189,5 в 2008–2009 учебном году до 180,2 тысячи в 2009–2010 году за счёт уменьшения обучающихся (до 153,1 тысячи) в государственных образовательных учреждениях. В негосударственных, наоборот, произошло небольшое увеличение студентов до 27200 человек. Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата в 2010 году составила 14746,5 рубля (пятое место среди субъектов Приволжского федерального округа).

#### Библиографический список

1. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики г. Москва – 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 15.10.2011).
2. Официальный сайт Министерства экономического развития Российской Федерации г. Москва – 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.economy.gov.ru> (дата обращения 16.10.2011).
3. Официальный сайт Института комплексных экономических исследований г. Москва – 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.icess.ac.ru> (дата обращения 16.10.2011).

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**L.B. Zorina**

#### **SOCIAL AND ECONOMIC FACTORS OF DEVELOPMENTS SYSTEM OF HIGHER VOCATIONAL EDUCATION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

In the present work social and economic factors of developments of system of higher vocational education are considered. Measures of dynamics of region system of higher vocational education and average earnings of region populations are analyzed. It is allow make resume about real trends and problems in this sector.

*Key word:* System of higher vocational education; region; institution of higher education; educational services; development; measures; factors; average earnings; trends.



## СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 65.0

Е.Е. Егоров

### ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ КАПИТАЛОМ ОРГАНИЗАЦИИ

Нижегородский государственный педагогический университет

Результатом статьи является выявление ключевых элементов инфраструктуры управления человеческим капиталом организаций, основанное на обобщении подходов к определению сущности человеческого капитала, его структуры и места в системе интеллектуального капитала. Также в статье представлены разработки по возможной оценке эффективности построения инфраструктуры управления человеческим капиталом, что дает возможность оценить как саму инфраструктуру, так и подойти к решению более крупной проблемы оценке – самого человеческого капитала организации. Изложенные в статье подходы дают возможность руководителям выстраивать соответствующую инфраструктуру, что обеспечивает повышение конкурентоспособности организации в условиях инновационного развития

*Ключевые слова:* управление, человеческий капитал, инфраструктура, оценка эффективности, интеллектуальный капитал, организация.

В эпоху серьезных экономических преобразований во всем мире многие исследователи пытаются определить фактор или ресурс, на который можно опереться при проведении реформ и выводе экономики на новый этап развития. И подавляющее количество ученых и практиков склоняются к тому, что таким ресурсом является человеческий капитал. Однако многократно повторяемый лозунг о том, что человеческий капитал является главной ценностью общества и определяющим фактором устойчивого развития и экономического роста, часто не находит практической реализации, ни на уровне страны и регионов, ни на уровне отдельных организаций. Между тем, как показывает опыт исторического развития организационно-экономических систем, страны и конкретные компании, сделавшие ставку именно на указанный фактор, получают серьезные конкурентные преимущества, которые достигаются не за счет природных ресурсов, а за счет знаний, информации, инноваций, источником которых выступает человек [1]. В то же время в современной практике управления большинством организаций человеческий капитал либо игнорируется почти полностью, либо задействованы лишь его ограниченные возможности. Этого определенно недостаточно для становления в России экономики, основанной на знаниях, и обеспечения конкурентоспособности отечественных предприятий. На наш взгляд, такое положение во многом связано с тем, что отсутствует четкое понимание методов и инструментов, которые обеспечивают эффективное формирование, использование и развитие человеческого капитала в условиях организации. В частности, это касается непроработанности вопросов наличия соответствующей инфраструктуры управления человеческим капиталом и недопонимания важности ее создания в условиях конкретных организаций. Из-за чего последние несут существенные потери, как в тактическом диапазоне деятельности, так и в стратегической перспективе, что в итоге ведет к потерям ресурсов и значительно занижает стоимость самих организаций или их ценность для общества.

Таким образом, научная проблема исследования состоит в разрешении противоречия между объективной и значительной потребностью российских организаций в эффективном управлении человеческим капиталом, с одной стороны, и в отсутствии соответствующей комплексной инфраструктуры, адаптированной к условиям российской экономики, с другой. Предлагаемая статья основана на синтезе многочисленных работ зарубежных и отечественных авторов, посвященных теории и методологии человеческого капитала, изложенном в преломлении к российской практике управления организациями и исследований проведенных автором. Признавая значимость исследований в рамках указанной проблематики, следует отметить, что методология формирования и развития инфраструктуры управления человеческим капиталом российских организаций находится в процессе становления, а основные методы его оценки ее эффективности заимствованы из западной практики и не адаптированы к условиям отечественной экономики.

Цель статьи заключается в обосновании и разработке методического инструментария формирования, использования и развития инфраструктуры управления человеческим капиталом, который определяется, как важнейший актив организации. Ключевая идея базируется на гипотезе, согласно которой эффективность управления человеческим капиталом во многом определяется соответствующей инфраструктурой. Использование предложений, изложенных в статье, на наш взгляд, будет способствовать росту человеческого капитала организации соответственно, повышению эффективности ее функционирования. Для того чтобы изложить основные элементы инфраструктуры управления человеческим капиталом и возможности их использования в организации, необходимо определиться с терминологией исследования. В данном случае, желая избежать ненужной полемики о нюансах трактовки терминов, используемых в исследовании, воспользуемся наиболее распространенными формулировками человеческого капитала и инфраструктуры.

Итак, человеческий капитал это «сформированный в результате инвестиций и накопленный человеком определенный запас здоровья, знаний, навыков, способностей, мотиваций, которые целесообразно используются в той или иной сфере общественного воспроизводства, а также содействуют росту производительности труда и производства, и тем самым влияют на рост доходов человека» [2, с. 83]. Применительно к организации данное определение можно упростить и сформулировать как знания, умения, здоровье, мотивация и способности работников организации. Что касается формулировки понятия инфраструктуры, то предлагаем воспользоваться классическим словарем иностранных слов определяющих, ее как «составные части общего устройства экономической или политической жизни, носящие подчиненный, вспомогательный характер и обеспечивающие нормальную деятельность экономической (политической) системы в целом» [3, с. 156]. Если еще более его обобщить и перенести впоследствии на сферу управления человеческим капиталом, то следует определить инфраструктуру, как комплекс взаимосвязанных обслуживающих структур или объектов, составляющих и/или обеспечивающих основу функционирования системы. Далее следует определиться с местом человеческого капитала в системе ресурсов организации, а также с его содержанием. По поводу места человеческого капитала в структуре активов организации существует большое разнообразие мнений, но большинство исследователей склоняются к включению человеческого капитала в интеллектуальный капитал. Это определяется отнесением всех видов нематериальных ресурсов, способных существенно увеличивать стоимость компании в отдельный специфический комплекс ресурсов и рассматривать его вместе, как совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых активов. Именно интеллектуальный капитал в настоящее время рассматривается большинством исследователей, как потенциально лидирующий фактор развития современных организаций [4, с. 125]. С целью обоснования места и роли человеческого капитала как одного из основных активов предприятия представляем следующую обобщенную структуру интеллектуального капитала (рис. 1).

Учитывая нематериальный характер и многогранность человеческого капитала, представляется затруднительным однозначно определить его составные элементы. Существую-

щие в настоящее время подходы акцентируют внимание либо на функциональной стороне человеческого капитала, то есть, на возможности обладателя получать доход, на росте производительности его труда, либо выделяют такие содержательные характеристики человеческого капитала, как знания, профессиональные навыки и опыт, творческий потенциал, морально-психологическое и физическое здоровье. Существуют и комплексные подходы, которые используют формулировку человеческого капитала, включающую, как характеристики человеческого капитала, так и его функциональные возможности. Однако все исследователи склоняются к тому, что основой для формирования человеческого капитала являются природные способности и таланты, которые развиваются за счет инвестиций в человеческий капитал организации.

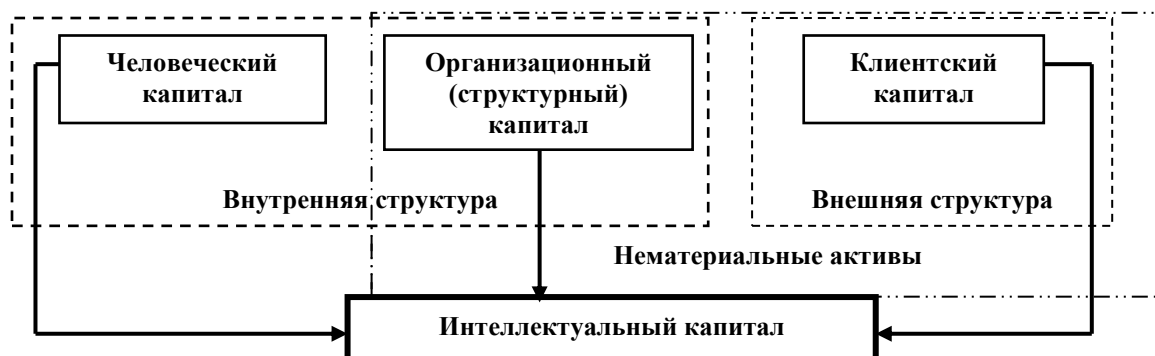


Рис. 1. Обобщенная структура интеллектуального капитала

Принимая во внимание, что представленные взгляды на составные компоненты человеческого капитала в принципе не противоречат друг другу, а являются взаимодополняющими, можно представить составляющие человеческого капитала следующим образом (рис. 2).

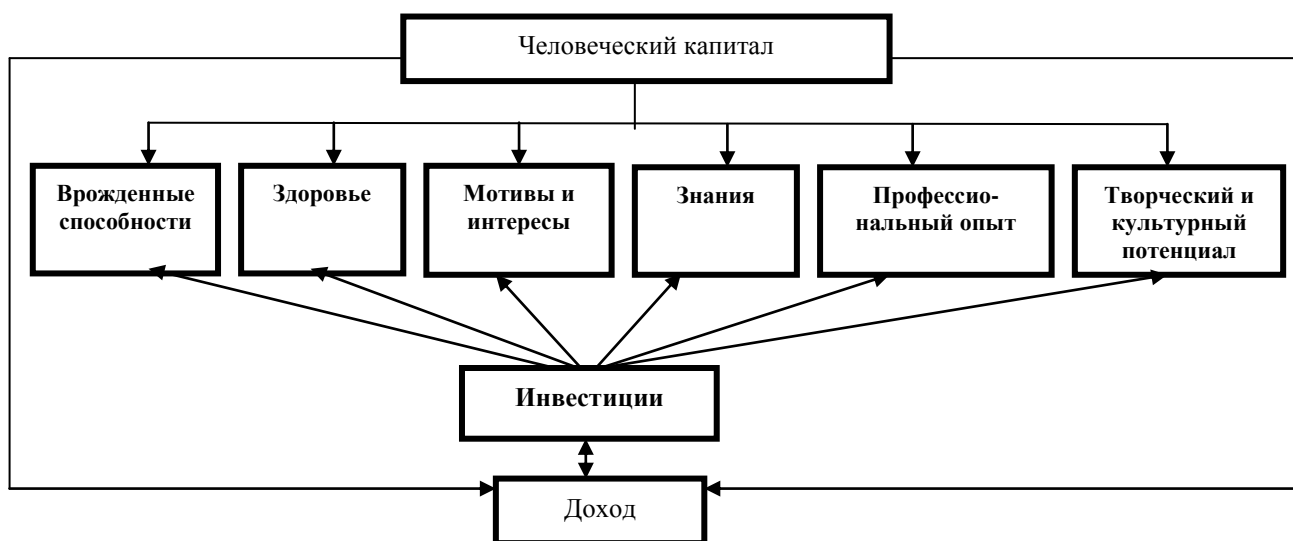


Рис. 2. Составляющие человеческого капитала

Изучение различных подходов к человеческому капиталу показало, что на сегодняшний день в отечественной и зарубежной теории и практике не сложилось единого представления о единой классификации разновидностей человеческого капитала. Даже поверхностный анализ используемых в настоящее время группировок классов человеческого капитала позволяет выявить их существенный изъян – отсутствие четкого разграничения личного, организационного и общественного человеческого капитала.

Для решения проблемы неоднородности человеческого капитала существует доста-

точно распространенное деление, связанное с весьма укрупненным разделом на общий и специальный человеческий капитал [5, с. 44]. Общий капитал включает теоретические и другие универсальные знания, имеющие широкую область применения и приобретаемые, прежде всего, в школах, ПТУ, ССУЗах, вузах, других образовательных учреждениях, а также общие профессиональные (специализированные) знания. При этом важнейшей формой наращивания обычного человеческого капитала является самообучение.

Отличительной особенностью специального капитала является то, что он соотносится лишь с конкретной организацией. Он включает в себя знания особенностей рабочего места, руководства, коллег по работе, их возможностей, достоинств и недостатков, клиентов, специфики предприятия и т.п., а также практические навыки по использованию этих знаний. Инвестируя в человеческий капитал, многие руководители опасаются переманивания высококвалифицированных рабочих и хорошо подготовленных менеджеров другими фирмами. Однако анализ ситуации на рынке труда развеивает эти опасения. Хотя переманивание специалистов и имеет место на рынке труда, однако масштабы его все же сравнительно невелики. И главным ограничителем в этом, как ни странно, является специальный капитал, который применим лишь к данной организации, и накапливается в течение длительного времени. Многие высококвалифицированные работники, сменив место работы и попав в иную производственную среду, часто вообще оказываются неспособными достичь своих прежних результатов на новом месте. Вот почему на практике наиболее эффективной сегодня оказывается модель накопления и использования неперемещаемого человеческого капитала – японская система пожизненного найма работников. В более мягких формах эта модель сегодня широко используется многими американскими и западноевропейскими корпорациями. Данная система обеспечивает максимальное наращивание и закрепление знаний, умений и навыков работников в рамках определенного предприятия. Накопление общего и специального человеческого капиталов служит одной из важнейших предпосылок наиболее эффективного его использования. Оно обеспечивает высокую компетентность и неформальную вовлеченность работника в дела коллектива, позволяет ему максимально проявить инициативу, раскрыть свои способности и дарования. Наличие персонала высочайшей квалификации и качества делает их практически недостижимыми для менее богатых человеческим капиталом конкурентов, которые, даже обладая такой же передовой техникой и технологией, обычно не в состоянии использовать их со столь высокой отдачей.

Эффективное использование человеческого капитала практически невозможно без наличия социальной компоненты. Понятие социального капитала отражает в большей степени характер отношений между работниками, способы и культуру их общения, развитость межличностных коммуникаций. Содержанием социального капитала являются межличностные связи, отношения доверия, солидарность, готовность к кооперации и поддержке, умение работать в группе, команде.

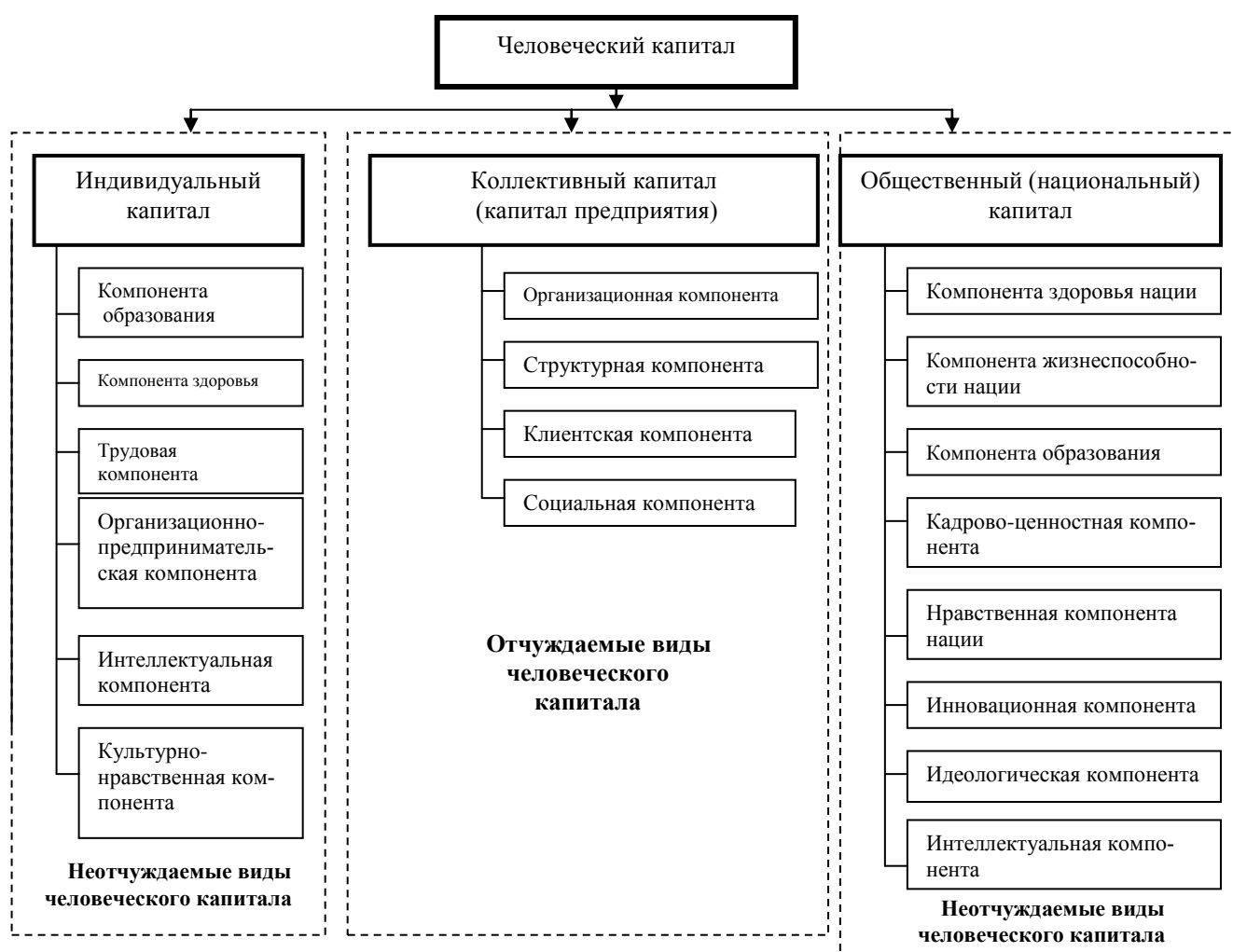
Также следует отметить наличие организационного капитала, то есть институционализованного знания, которым владеет организация и которое хранится в базах данных, инструкциях и т.д. Часто организационный капитал объединяют со структурным капиталом, выделяя в последнем выстроенные взаимосвязи соподчинения и коммуникаций внутри организации, то есть организационную структуру, наличие четких регламентов и положений, регулирующих деятельность фирмы.

Отдельно выделяют и еще одну компоненту, включаемую в структуру человеческого капитала – клиентский капитал. Под ним понимается система взаимосвязей организации с клиентами, которая выражается в информированности, узнавании, выделении и предпочтении клиентами товаров и услуг данной организации на рынке. Потребительский капитал предприятия распространяется и на его поставщиков.

Следует отметить, что указанные ранее компоненты могут быть включены в интеллектуальный капитал, как самостоятельные виды капитала, но в данном случае, мы относим их к органичному составляющим именно человеческого капитала. Такой подход обусловлен

необходимостью выстраивания комплексной инфраструктуры управления человеческим капиталом в организации. Не следует забывать и про общественную (национальную) форму человеческого капитала, которая непосредственно в данном исследовании фигурировать не будет, однако является существенным элементом системного представления исследуемого объекта.

Таким образом, мы можем соединить элементы, входящие в состав индивидуального (личного), коллективного (организационного) и общественного (национального) человеческого капитала (рис. 3) [6, с. 19]:



**Рис. 3. Классификация видов человеческого капитала в зависимости от степени обобщенности**

В состав индивидуального человеческого капитала включается компонента образования, а в состав национального человеческого капитала – компонента жизнеспособности нации, кадрово-ценностная компонента нации, инновационная компонента, компонента образования и здоровья. При этом основу человеческого капитала составляют знания, которыми владеют работники предприятия. Кроме того, считаем необходимым подчеркнуть, что среди составляющих человеческого капитала наибольшее значение имеют компонента образования, компонента здоровья и трудовая компонента. Особенностью человеческого капитала является то, что он не может быть собственностью предприятия, поэтому с утратой человеческого капитала автоматически теряется ценность как структурного, так и организационного и клиентского капитала. Следует подчеркнуть, что национальный человеческий капитал не является результатом механического суммирования коллективного или индивидуального

человеческих капиталов, а формируется и развивается на основе их неразрывного взаимодействия. При успешном развитии каждого из видов человеческого капитала может быть получен значительный синергетический эффект, выраженный в росте человеческого капитала как нации в целом, так и отдельных экономических субъектов [6, с. 21].

Исходя из изложенных установок, перейдем к определению существенных компонентов инфраструктуры управления человеческим капиталом. В комплексной инфраструктуре можно выделить два крупных блока обеспечивающих эффективность формирования, использования и развития человеческого капитала: первый блок это виды инфраструктуры, которые отвечают за обеспечение неотчуждаемых видов человеческого капитала; второй блок это виды инфраструктуры, которые отвечают за интеграцию человеческого капитала и других видов интеллектуального капитала организации. Это можно на новом уровне обобщения представить в виде следующей схемы (рис. 4).



**Рис. 4. Схема комплексной инфраструктуры управления человеческим капиталом организации**

Приведенная на рис. 4 блочно-модульная схема инфраструктуры управления человеческим капиталом, конечно, не является аксиомой, но позволяет комплексно увидеть основные компоненты обеспечения формирования, использования и развития человеческого капитала организации. Следует отметить, что элементы инфраструктуры не изолированы друг от

друга, а достаточно тесно взаимосвязаны, причем не только внутри выделенных блоков, но и между блоками. Например, очевидно, что подсистема обеспечения культурно-нравственного уровня напрямую взаимосвязана с социальным взаимодействием, вместе с тем и то и другое не может быть оторвано от подсистемы обеспечения формирования персонала и подсистемы его мотивации и т.д. Перечислять подобные взаимодействия можно долго, но важно понимание гибкого взаимодействия всех элементов инфраструктуры. Далее раскроем более подробно подсистемы обеспечения инфраструктуры управления человеческим капиталом организации.

*Подсистема обеспечения формирования персонала.* Целью данной подсистемы является своевременное обеспечение стратегических планов организации квалифицированными работниками, обладающими определенными характеристиками. Среди этих характеристик можно выделить определенный уровень образования, обладания определенными навыками, способностями, мотивацией, опытом работы в сфере деятельности организации и т.д. Для достижения этой цели данная подсистема призвана решать следующие задачи:

- прогнозирование потребностей в персонале, которое должно осуществляться на основе систематического сбора информации о количественном и качественном спросе на персонал;
- планирование персонала на основе количественных и качественных характеристик персонала;
- организация маркетинга персонала;
- удовлетворение спроса путем привлечения кандидатов на занятие вакантных должностей из внутренних и внешних источников;
- организация проведения отбора работников, на основе совокупности различных методов, позволяющих определить соответствие кандидата должности на которую он претендует;
- закрепление юридических взаимоотношений работника и организации на взаимовыгодной основе, посредством заключения трудового договора;
- организация трудовой адаптации новых работников.

*Подсистема обеспечения организации труда персонала.* Целью данной подсистемы является качественное обеспечение повышения эффективности работы предприятия, что означает:

- достижение более высокой производительности труда;
- сокращение издержек;
- более рациональное использование ресурсов;
- повышение качества продукции и качества обслуживания потребителей.

Данная подсистема решает три взаимосвязанные задачи:

1) экономическую, заключающуюся в создании условий для повышения производительности труда, сокращении потерь рабочего времени, создании благоприятных условий для работы, увеличении эффективности использования всех видов ресурсов;

2) психофизиологическую, связанную с улучшением условий труда с точки зрения повышения его безопасности, сохранения здоровья человека и его трудоспособности, облегчения работы, повышения его привлекательности и содержательности;

3) социальную, направленную на всестороннее развитие сотрудников, повышение уровня их профессиональных знаний и квалификации, стимулирование их творческой инициативы и степени удовлетворенности трудом.

Основными направлениями организации труда являются:

- рационализация форм разделения и кооперации труда;
- совершенствование условий труда;
- совершенствование режима труда и отдыха;
- улучшение организации рабочего места;
- совершенствование морального и материального стимулирования;
- укрепление трудовой дисциплины.

*Подсистема обеспечения поддержания здоровья персонала.* Целью данной подсистемы является обеспечение работоспособности персонала, его здоровья, отсутствия профессиональных заболеваний и т.д. Основными направлениями деятельности подсистемы являются:

- обязательное медицинское страхование;
- добровольное медицинское страхование;
- проведение медосмотров;
- организация здорового отдыха и различных оздоровительных мероприятий;
- пропаганда здорового образа жизни и отказа от вредных привычек;
- профилактика общих заболеваний;
- профилактика профессиональных заболеваний;
- обеспечение соответствующих санитарных норм на рабочем месте;
- организация питания.

*Подсистема обеспечения мотивации работников.* Целью данной подсистемы является повышение мотивированности персонала организации и стимулирование его к высокопроизводительному труду. Данная подсистема реализуется в трех основных направлениях:

1) обеспечение мотивации к работе в данной организации, на данном рабочем месте, посредством условий труда, взаимоотношений с руководителями и коллегами, наличием перспектив и т.д.;

2) материальное вознаграждение, которое можно условно разделить на «денежное» (заработная плата, премии, бонусы, доплаты, надбавки и т.п.) и «не-денежное» (питание, транспортные услуги, сотовая связь, обеспечение жильем и иными благами за счет организации);

3) нематериальное вознаграждение в виде: наград, повышения в должности, выигрыша конкурсов, общественное признание, творческие достижения, социальное общение и т.п.

Основными направлениями реализации данной подсистемы являются:

- разработка и применение различных систем оплаты труда по разным категориям работников организации;
- назначение надбавок за определенные условия труда
- определение доплат стимулирующего характера;
- разработка премиальных и бонусных систем;
- дополнительное пенсионное страхование на предприятии и другие виды страхования;
- помощь в повышении образования, профподготовке и переподготовке;
- участие в распределении прибыли;
- покупка работниками акций;
- определение компенсационного пакета;
- формирование социальных видов стимулирования;
- формирование психологических видов стимулирования;
- формирование моральных видов стимулирования;
- формирование творческих видов стимулирования и др.

*Подсистема обеспечения развития персонала.* Цель данной подсистемы – создание и совершенствование комплекса целенаправленных образовательных, информационных, социально-культурных, мотивационных мероприятий, которые содействуют повышению компетентности работников, усилению их мотивации.

В данной подсистеме можно выделить две существенные и взаимосвязанные компоненты, которые определяют уровень развития человеческого капитала:

1) обучение персонала – это планомерный процесс целенаправленной и систематической передачи работником знаний, навыков и умений со стороны опытных, квалифицированных специалистов, руководителей, преподавателей и тренинг-менеджеров;

2) управление деловой карьерой и служебно-профессиональным продвижением персонала – это этапы осознанной трудовой деятельности человека, обусловленные его образо-



ванием, способностями, жизненной позицией, целями и амбициями в области трудовой деятельности и связанные с должностным или профессиональным ростом.

К основным задачам данной подсистемы можно отнести:

- профессиональное образование работников;
- подготовку и переподготовку специалистов;
- повышение квалификации персонала;
- профессиональную ориентацию новых сотрудников;
- планирование карьеры;
- работу с кадровым резервом;
- ротацию персонала;
- делегирование полномочий;
- создание условий для саморазвития и самообучения.

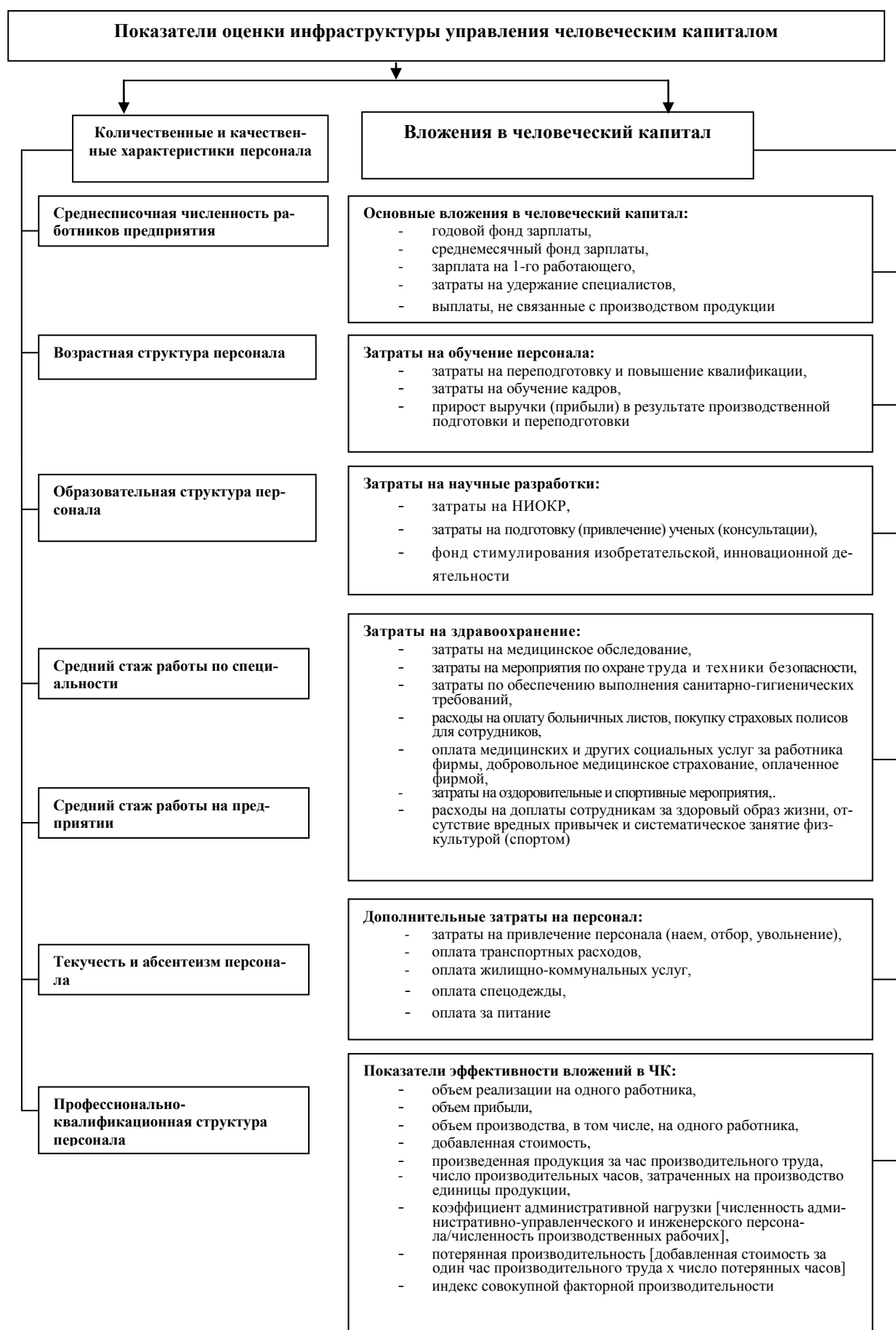
Развитие персонала рассматривается как более емкое и широкое понятие, чем обучение, так как отражает не только приобретение работниками новых профессиональных навыков и умений, но и обновление ими своих знаний, мотивов, ценностей, интересов в процессе каждодневной трудовой деятельности.

*Подсистема обеспечения культурно-нравственного уровня коллектива.* Целью данной подсистемы является установление и усиление взаимосвязи, взаимодействия между работниками организации и подразделениями, формирует благоприятный психологический климат в организации, предоставляет ценностные ориентиры для деятельности работников.

В целом данная подсистема отождествляется с организационной культурой и имеет целью самоорганизацию социально-экономической системы.

К основным элементам данной подсистемы обычно относят [7, с. 19]:

- поведенческие стереотипы: общий язык, используемый членами организации; обычаи и традиции, которых они придерживаются; ритуалы, совершаемые ими в определенных ситуациях;
- групповые нормы: свойственные группам стандарты и образцы, регламентирующие поведение их членов;
- провозглашаемые ценности: артикулированные, объявляемые во всеуслышание принципы и ценности, к реализации которых стремится организация или группа («качество продукции», «лидерство на рынке» и т.п.);
- философию организации: наиболее общие политические и идеологические принципы, которыми определяются ее действия по отношению к служащим, клиентам или посредникам;
- правила игры: правила поведения при работе в организации; традиции и ограничения, которые следует усвоить новичку для того, чтобы стать полноценным членом организации; «заведенный порядок»;
- организационный климат: чувство, определяемое физическим составом группы и характерной манерой взаимодействия членов организации друг с другом, клиентами или иными сторонними лицами;
- существующий практический опыт: методы и технические приемы, используемые членами группы для достижения определенных целей; способность осуществлять определенные действия, передаваемая из поколения в поколение и не требующая обязательной письменной фиксации;
- принятые значения: мгновенное взаимопонимание, возникающее при взаимодействии представителей группы друг с другом;
- интеграционные символы («базовые метафоры»): идеи, чувства и образы, выработанные группой для самоопределения, которые не всегда оцениваются на сознательном уровне, но находят воплощение в зданиях, офисной структуре и других материальных аспектах существования группы. Этот элемент культуры отражает не когнитивные или оценочные, а эмоциональные и эстетические реакции членов группы.



**Рис. 5. Основные показатели оценки инфраструктуры управления человеческим капиталом организации**

Отдельно следует рассмотреть *подсистему мониторинга состояния человеческого капитала*, являющуюся не только внутренним компонентом инфраструктуры у правления человеческим капиталом, но и внешней, по отношению к ней системой оценки ее эффективности. Сложность оценки инфраструктуры управления человеческим капиталом, заключается, прежде всего, в том, что оценивать отдельные компоненты инфраструктуры, нельзя ввиду невозможности получения её комплексной адекватной оценки. Оценивать же воздействие инфраструктуры на человека будет некорректно, потому что единицу человеческого капитала представляет не сам работник, а его знания, умения и навыки, и этот капитал вне его носителя (человека) не существует.

Анализ существующих методов оценки человеческого капитала позволил сделать следующий вывод: несмотря на большое количество как зарубежных, так и отечественных подходов к оценке человеческого капитала, отсутствует комплексная система показателей оценки человеческого капитала, отвечающая требованию соответствия стратегии и целям развития предприятия. Тем более отсутствует оценка инфраструктуры управления человеческим капиталом. Поэтому проблема получения достоверной оценки инфраструктуры управления человеческим капиталом остается нерешенной, одной из причин чего является недостаточная обеспеченность подлинными исходными данными.

В связи с тем, что формирование человеческого капитала организации осуществляется на основе личных качеств и характеристик сотрудников, то в качестве основных показателей, используемых для исследования инфраструктуры управления человеческим капиталом, можно принять: квалификационный состав сотрудников, средний уровень образования, возрастной состав персонала, средний стаж работы по специальности, затраты на персонал. Далее предлагается следующая система показателей оценки человеческого капитала, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки эффективности инфраструктуры управления человеческим капиталом организации (рис. 5).

Применение системы показателей для оценки инфраструктуры управления человеческим капиталом позволяет организациям получить комплексную информацию о затратах живого труда, эффективности его использования и вложениях, необходимых для нормального функционирования человеческого капитала, с целью принятия управленческих решений, обеспечивающих как конкурентоспособность организации, так и ее успех.

Оценка инфраструктуры управления человеческим капиталом является определенным этапом в оценке самого человеческого капитала организации. Целью общей оценки человеческого капитала является получение реальной стоимости предприятия для принятия обоснованных управленческих решений.

В целом, оценка человеческого капитала предприятия способствует решению следующих задач:

- получение объективной стоимости предприятия;
- обеспечение мониторинга персонала в целях получения оперативной информации о функциональном состоянии каждого сотрудника, его потенциальных возможностях, уровне освоения им необходимых компетенций, а также о состоянии коллектива и прогноза успешности его функционирования;
- диагностика проблемных зон в организации бизнес-процесса и выработка мероприятий по их устранению;
- разработка моделей компетенций, соответствующих бизнес-задачам предприятия.

Обобщая все изложенное, следует отметить, что определение ключевых элементов инфраструктуры управления человеческим капиталом организации и оценка этой инфраструктуры дает возможность руководителям организаций выстраивать соответствующую инфраструктуру, что обеспечивает повышение конкурентоспособности организации в условиях инновационного развития.

## Библиографический список

1. Эдвинссон, Л. Корпоративная долгота. Навигация в экономике, основанной на знаниях / Л. Эдвинссон. – М.: ИНФРА-М, 2005. – XX, 248 с.
2. Дятлов, С.А. Основы теории человеческого капитала / С.А. Дятлов. – СПб.: СПбУЭиФ, 1994. – 156 с.
3. Словарь иностранных слов / Н.Г.Комлев. – М.: Наука, 2006.
4. Стюарт, Т.А. Интеллектуальный капитал. Новый источник богатства организаций / Т.А. Стюарт. – М.: Поколение, 2007. – 368 с.
5. Крупица, В.В. Менеджмент персонала: организационно-экономические аспекты управления в профессиональном обучении / В.В. Крупица. – Н. Новгород: ВГИПИ, 2001. – 264 с.
6. Тугускина, Г.Н. Человеческий капитал предприятия: теория, методология, оценка: автореферат на соискание ученой степени доктора экономических наук / Г.Н. Тугускина. – М.: ГУУ, 2011. – 26 с.
7. Шейн, Э. Организационная культура и лидерство: построение, эволюция, совершенствование / Э. Шейн. – СПб.: Питер, 2002.

Дата поступления  
в редакцию 03.02.2012

**E.E. Egorov**

**EFFECTIVE STEERING OF ORGANIZATION HUMAN CAPITAL:  
INFRASTRUCTURE ASPECTS**

Nizhny Novgorod State Pedagogical University

**Purpose.** The human capital research universal approach is considered to be one of the main purposes of modern economic sciences. The paper contains the revealing of steering infrastructure key elements. The author also suggests the variant of steering effectiveness estimation criteria.

**Design/methodology/approach.** The system approach adapted to contemporary Russian economic reality is considered to be suitable for this research. Human capital is the under-system of intellectual capital, as well as organizational capital and client capital.

**Findings.** The approach described in this paper can be applied for steering infrastructure composing. It means new opportunities of innovation economic development.

**Research limitations/implications.** The present study provides new opportunities for creating of human capital estimation complex system.

**Originality/value.** The interconnections between human capital and intellectual capital are studied from practical realization point of view. New opportunities of economic resources keeping are discovered. Original methodology of business process diagnostic is suggested.

*Key words:* steering, human capital, infrastructure, estimation effectiveness, intellectual capital, organization.

УДК 321.9

М.С. Лыцев

**ПРОБЛЕМА ГЕНЕЗИСА РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛИТ РОССИИ  
В КОНЦЕ XX ВЕКА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируются проблемы становления, самоорганизации и трансформации элит территорий в 90-е годы прошлого столетия. Региональный политический режим на рубеже веков являлся сочетанием противоположных политических форм и практик, и результатом изменения их положения как агентов формирующейся государственности явилось признание их новой роли в интеграционной парадигме российской политики начала XXI века. Выбранный этап интересен тем, что региональные элиты не только переживают период своей институционализации, позиционируясь на разных уровнях власти, но и возвращение из собственно федеральной политики в русло региональной сферы управления.

*Ключевые слова:* региональная элита, региональный политический процесс, политический транзит, региональные политические режимы, взаимоотношения между Центром и регионами, контр-элиты, рыночные реформы, концепции развития.

Проблемы генезиса региональных элит России в конце XX века актуальны до сих пор. Так как, *во-первых*, модернизационные процессы, которые происходят в России в настоящее время, проводятся людьми, которые стали частью политической элиты регионов ещё в 80-90-е года прошлого века. *Во-вторых*, трансформационные процессы, которые формируют новую нынешнюю Россию, зависят от роли не только федеральной политической элиты, но и от региональной её составляющей. *В-третьих*, в условиях формирования и становления новой системы властных отношений политическая элита всех уровней может выполнять не свойственные ей функции. Например, в условиях увеличивающейся роли бюрократического аппарата (которое происходит в настоящее время) возникает опасность подмены некоторых целей только формирующегося нового государства, которым является современная Россия.

Цель данной статьи – провести краткий политический анализ основных событий, которые происходили в 90-е годы XX века, связанных со становлением региональных элит России. Перестройка и последовавший за ней распад СССР дали толчок к развитию множества кризисных явлений. К концу 80-х годов прошлого века КПСС всё ещё оставалась единственной центристремительной силой в обществе, в котором все более увеличивались центробежные силы. Она более или менее успешно исполняла инструментальные политические функции выражения требований в советском обществе. Всё это поддерживалось вертикальной интеграцией и кооптацией элит территорий в систему управления через систему региональных парткомов. В Советском Союзе все первые секретари обкомов и респкомов одновременно являлись субъектами центральной власти, получая статус членов ЦК КПСС или Политбюро ЦК и депутатов Верховного Совета. На эту властную вертикаль опиралось все здание государства. Коллапс системы привёл к окончательному разбалансированию партийных комитетов, включая ключевой региональный мезоуровень – обкомы и горкомы, которые вместе с номенклатурной системой назначений составляли систему, на которую опиралась монополия КПСС. Становление России после разрушения СССР не остановило дальнейшую фрагментацию общества. Более того, начало рыночных реформ в 1992 г. стало новым этапом в процессе регионализации государства. Судьба почти всего постсоветского пространства во многом определялась реакцией «Большой России» на события в Москве. Регионы в начале 90-х годов XX века представляли собой настоящий «бурлящий котёл». Все участники тех событий желали и ждали быстрых перемен, а отдельные группы хотели оказаться у власти. Процесс смены правящих элит в регионах обрел новое дыхание под флагом «десоветизации»

режимов. Всё чаще представителями Президента РФ становились «защитники» Белого Дома в Москве. Например, так у руля Нижегородской области стал кандидат физико-математических наук Б. Немцов. В результате демократы заняли ключевые властные должности, практически полностью вытеснив представителей номенклатуры. Однако это не помещало образовать союз представителей двух элит – прежней (в лице хозяйственной номенклатуры) и новой (демократической). За демократической элитой остались органы исполнительной власти, за старой – места в экономических структурах и частично в Советах. Все это создавало предпосылки для нового жесткого противостояния, что в дальнейшем и произошло. Другой силой, претендующей на власть в регионах, преимущественно в местных органах самоуправления, выступили региональные представительства федеральных политических партий патриотической направленности (ЛДПР, Русский национальный собор и т.д.).

Центральная власть в лице Правительства РФ и Президента РФ, в свою очередь, пытались оформить свои интересы в виде федерализации, что не имело до поры ни последовательной политики в отношении регионов, ни институтов федеративного государства. Первым шагом на этом пути стало подписание Федеративного договора 31 марта 1992 года. Он включал в себя три близких по содержанию договора о разграничении полномочий между федеральной властью и органами власти на местах всех трех типов (республик; краев, областей и городов Москва и Санкт-Петербург; автономных округов и областей). Договор помог региональной элите снизить внутривластное напряжение, однако далеко не все её представители оказались вовлечены в системообразующий политический процесс. Кроме этого, республиканскую элиту тревожило, что республики получили меньше прав, чем остальные субъекты.

В это же время «демократы», за которыми была исполнительная власть, начинают разделяться на две диаметрально противоположные группы, – которые поддерживали и не поддерживали курс Президента РФ на ликвидацию Советов.

В апреле 1993 года был объявлен референдум, на который вынесли вопросы – на каких основаниях строить властные структуры в новой России. Большинство его участников поддержали курс Президента РФ Б. Ельцина. Верховный Совет, напротив, выступал против президентско-парламентской республики. Как и в Москве, так и в провинции продолжало усиливаться напряжение, которое закончилось событиями 3–4 октября 1993 года.

Одним из результатов трагического противостояния федеральных и местных политических элит стало формирование на местах контрэлит. Почти сразу же они оказались втянуты в процесс «старо-новых» клиентельных связей. Возникновение контрэлит территорий, как групп лиц, стремящихся во власть и проясняющих свои интересы и приоритеты в рамках «команд» отдельных лидеров, – это результат глубоких расколов и конфликтов, внутри некогда целостных правящих региональных элит и поэтому они не стали продолжением гражданского общества, как это было в Восточной Европе.

Однако в силу своей организованности и востребованной образованности и работоспособности, представителям контрэлит удалось закрепиться во властных кругах. Таким образом, в начале 90-х годов XX века в структуре региональных элит некоторых регионов России образовался активный, состоящий из нескольких элементов и претендующий на власть центристский сегмент. До 1996 года в нем преобладали умеренно-либеральные ориентации. Постепенно выдавив «демократических реформаторов», с середины 90-х годов прошлого века и до сих пор он является одним из главных каналов поставки кадров в правящую элиту страны и регионов.

Противостояние между представителями региональных элит вылилось в движение от полицентризма региональных властей (когда существовала определенная система сдержек и противовесов) к моноцентризму. Поэтому модель власти, где главенствующая роль главы субъекта федерации и неформальный консенсус ветвей властей, устраивала и «реформаторов», и «центристов». Кроме этого их объединяло еще то, что все они боролись за власть и привилегии для представителей своих групп, но почти никто за демонополизацию и институциональное ограничение власти как таковой.

Политический кризис из-за событий октября 1993 года нанес непоправимый удар по надеждам и иллюзиям населения, которые ждали формирования правового гражданского общества в России. Экономический спад производства в купе с политическим расколом страны интенсифицировали развитие кризиса идеологии и образование ценностного вакуума в сознании простого населения. Отсутствие единства в правящей элите не только страны, но и регионов обусловило усиление тенденций моноцентризма власти, которые вылились в противостояние федеральных и региональных политических институтов во второй половине 90-х годов XX века. Нарастание конфронтационных тенденций между элитами территорий и руководством страны, при наличии у обеих сторон разных программ выхода страны из всеобщего кризиса [1, с. 77], стало причиной возрастания противостояния между правящими классами и контрэлитой. Жесткая борьба в «верхах» стала одним из главных двигателей дезорганизационных процессов в регионах и обнажила ряд зависимостей. Стала явью зависимость механизмов и каналов рекрутации элит от социокультурных реалий; параллельное распространение противоположных типов рекрутирования – номенклатурного и гласностязательного с его прогрессией в развитых регионах. Политический процесс под влиянием понимания «демократических верхов» развивался по сценарию «сообщества элит».

Стали проявляться следующие тенденции – изменение иерархии внутри региональных элит, апробация новых источников, механизмов и процедур рекрутирования, институциональная по отношению к режимам роль выборов и т.д. Приходящие к власти «центристы» изменили не только тип и характер активности правящих региональных элит, а также политический процесс. На местах региональные правящие группы санкционировали переход местных политических партий, общественных движений, негосударственных СМИ из партнерской роли к позиции, зависимой от власти, что привело к росту роли «личной преданности» по отношению к власти.

Таким образом, положение региональных элит территорий к середине 90-х годов прошлого века характеризовалось следующим образом. *Во-первых*, у них уже имелись определенные коммуникационные возможности, способности для взаимодействия не только между собой, но и с федеральными институтами. *Во-вторых*, в 1993-94 гг. был сформирован Совет Федерации ФС РФ, который в определенной мере оформил корпоративные интересы региональных элит и средства их защиты. *В-третьих*, эволюционное развитие региональных элит зависело от масштаба общественных преобразований и степенью конфликтности на местах.

Об этом процессе в своем первом послании Федеральному Собранию РФ говорил Президент РФ В. Путин. Проблема корпоративизма местных правящих групп, которая зазвучала и в выступлениях главы государства, во многом обнажила те проблемы и процессы, которые происходили во второй половине 90-х годов XX века.

Процесс складывания и выдвижения элит территорий можно рассматривать как часть более широкого процесса приспособления. Новаторская деятельность ответственных провинциальных руководителей развёртывалась перед лицом подстерегающего общества хаоса. Местные лидеры пытались оградить свои регионы от беспорядочной борьбы за власть в центре. Подобные усилия провинциальных лидеров на местах в определенной мере могли погасить влияние, оказываемое процессами, происходившими в Центре, а заодно сформировать некоторые особенности регионального развития России.

Одной из причин политизации провинций и увеличения региональной оппозиции центру было поведение сторонников «Демократической России», сторонников президентского курса реформ. Они интерпретировали феномен регионализма как тактический ответ представителей бывшей региональной номенклатуры на вызов, брошенный правительством Ельцина. Например, по их мнению, таким вызовом являлась региональная ассоциация «Сибирское Соглашение», где доминировала «партократия». С началом рыночных реформ стала чётко проявляться картина разделения России по принципу «Север – Юг» (промышленно развитые и богатые сырьем области севера европейской части России и Сибири и бедные аг-

рарные регионы юга России). Это стало следствием унаследованной структуры экономики, а также возрастающей тенденции превращения сырьевого сектора в основу российской экономики. В результате произошло географическое смещение оси в Западную и Восточную Сибирь и на север европейской части России.

В условиях системного политического и экономического кризиса процессы региональной дифференциации привели к тому, что существенно обострились межрегиональные противоречия. Например, в это время можно выделить тенденцию стать независимыми в экономическом плане регионы, которые производили экспортные товары и получали большие финансовые ресурсы. Усиливается разрыв между либеральными регионами - Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Екатеринбург, Самара, Пермь, и регионами, где доминирует «русский традиционализм» (коммунистическими) – Краснодар, Волгоград, Пенза, Тамбов, Иваново, Владимир, Ульяновск. В условиях всё более усиливающегося регионализма главной задачей региональных элит стала легитимация своего статуса. Для наиболее дальновидных руководителей регионов актуальной задачей оказалась не ориентация на рыночные модели, создаваемые столицей, а выработка собственной реформаторской стратегии. Одним из вариантов самоутверждения региональных лидеров, происходило в рамках провозглашения своей концепции развития. Например, в это время появились следующие концепции - «нижегородская», «ульяновская», «татарстанская» и другие.

Всё это приводило к тому, что Центр соглашался с определенным усилением элит территорий, так как это было основой пакта между федеральной и региональной элитами. Его целью было строительство нового социального и политического уклада. В рамках этого пакта элиты выполнили чрезвычайно важные задачи. Центр организовывал политическое и юридическое сопровождение приватизации государственной собственности, освобождал региональные элиты от коммунистической идеологии и от социальных обязательств перед массами.

Главным результатом деятельности Центра стало формирование региональных групп элит различного уровня и характера, из которого возник новый политический класс. Региональные элиты сложились как самостоятельные группы со своими корпоративными интересами, отличающимися от интересов Центра. Но в условиях генезиса они выполнили одну очень важную функцию: они спасли страну в условиях жесточайшего кризиса от глобального социального взрыва, который мог разразиться в условиях распада многих институтов советского общества и острых противоречий между социальными группами. Элиты территорий нашли уникальные специфические формы и методы приспособления населения регионов к новой ситуации в стране и в экономике, с помощью чего сохранили не только социальный мир, но и защитили свою собственность и политическую власть.

После начала политики жестких реформ в 1992 году в стране и в экономике воцарился «стихийный рынок», в политических отношениях на уровне регионов сложился адекватный тип политических отношений – торг регионов во взаимоотношениях с Центром. Для местных элит основой существования стало выстраивание рыночных отношений (в большинстве регионов) на основе местных правил, хотя и отягощенных государственным вмешательством.

В экономической сфере стихийно сформировались новые группы собственников, а также стали появляться различные группы лоббистов (хотя до сих пор у нас не существует официального закона о лоббизме), отстаивающих интересы новых собственников. Вместо поэтапного формирования единого рынка и укрепляющегося на его основе единства России начался процесс политической децентрализации, из-за которого возникла угроза сепаратизма отдельных регионов и распада всей страны [2]. Экономическим базисом децентрализации стало стремление элит территорий защитить местные рынки от конкурентов из других регионов, консолидировать местные активы и получать сверхприбыль за счет монопольных позиций. До конца 90-х годов прошлого века, это удавалось, так как власть глав регионов базировалась на мощи «удельных князей» (хозяев местных промышленных и банковских активов), которые вели «войну» на два фронта: с Центром, выбивая преференции и отстаивая свои интересы и с населением региона, сдерживая его социальное недовольство минимально



необходимыми средствами. Вместе с тем не все региональные власти могли проводить собственную независимую политику, некоторые главы регионов были вынуждены обращаться к Центру за поддержкой во время обострения противостояния враждующих в регионе группировок или накануне выборов [3, с. 170–171].

Однако децентрализация государства не перешла опасную грань. К концу 90-х годов XX века в обществе созрело ожидание укрепления государства. Например, Н. Петров в своей статье «Федерализм по-русски» пишет следующее: «К началу 1999-го процесс децентрализации зашел так далеко, что возникла угроза, как бы система не вышла из колебательного режима и не перешла в новое качество ...» [4, с. 27]. Такую же позицию занимают Н. Лапина и А. Чирикова - «... укрепление позиций регионов ... заставляют федеральные власти демонстрировать политическую волю и принимать решения, которые ограничивали бы произвол «удельных князей»» [3, с. 166]. Причем у Центра, всегда в запасе были мощные политико-административные и экономические ресурсы, которые он мог использовать в случае необходимости [5, с. 182].

С политической точки зрения Центр в 90-е годы прошлого столетия нуждался в свободе маневров на уровне регионов, в расширении возможностей по использованию ресурсов в рамках всей страны и в обеспечении политической лояльности губернаторов. Под этим понимается следующее – наличие гарантий от политических рисков, связанных с непредсказуемостью поведения глав регионов и меньшая трудоемкость в формировании общей позиции по значимым для Центра проблемам.

В свою очередь, элиты территорий тоже получали определенные преференции. Они становились важной частью «общероссийской властной корпорации», имея «свою долю» административной ренты. Но был еще один очень важный политический эффект – ответственность за неэффективное управление в подведомственном регионе перекладывалась с его главы на Центр и поэтому элиты территорий могли в определенной степени сохранить лицо перед региональным электоратом.

С экономической точки зрения Центр видел в реформах один из инструментов для решения экономических проблем у крупного бизнеса. По мнению Н. Зубаревич, регионы в 90-е годы XX века оказались «закрытыми», что означало доминирование элиты над ключевыми объектами собственности в регионе и возникновение института административного предпринимательства. Данная стратегия оказывалась вполне эффективной для получения административной ренты [6, с. 74].

В условиях ослабления связки «Центр – регионы», утраты властями ряда распорядительных полномочий и появления в процессе приватизации крупных центров влияния всё это вынуждало региональные политические элиты поступаться определенной частью своих привилегий и ставило на повестку дня вопрос об их объединении. В результате в регионах складывались режимы, где шла жестокая борьба за власть нескольких групп, но ни одна из них не могла навязать свою точку зрения другой. Одновременно происходил процесс сращивания отдельных групп. По уровню развития такие политические режимы называются *традиционными* (Г. Алмонд, Д. Пауэлл). В них преобладают дифференцированные государственные структуры, которые продуцируют доминирование культа подчинения и санкционированное участие людей в акциях власти. Неудивительно, что общим итогом генезиса региональных элит в конце XX века явилось «качество» государства как «дефективного политического субъекта», который не имеет постоянного и устойчивого стратегического курса развития. В 90-е годы прошлого столетия губернаторы являлись действительно главными фигурами в региональной политике. Главы регионов и представители других элит региона образовывали устойчивые общности и формировали региональные режимы того времени. Их устройство определялось положением правящих групп и характером взаимоотношений с другими статусными образованиями. Взаимоотношения региональных политических элит со статусными группами строились в диапазоне от авторитарно-патерналистских до партнерских и зависимых [7, с. 80]. И от сепаратистских до протекционистских во взаимоотношении-

ях с Центром. Их отражением явилась самоорганизация некоторых типов элит территорий в зависимости от характера их политического поведения и взаимоотношений с верховной властью. Одни хотели максимальной независимости (стремились к конфедерации), другие пытались мобилизовать местные общности, чтобы построить «светлое будущее в отдельно взятом регионе». Третьи, которые опережали Центр в проведении реформ, искали зарубежных партнеров, а четвертые, прагматично сотрудничали с федеральной властью с целью «политического крышевания» и получения финансовой помощи в виде дополнительных траншей. Но, в конечном итоге, все лидеры использовали свое политическое искусство и ресурсы для укрепления своих позиций на местах и получения определенных выгод от политического торга с Кремлем. Таким образом, трансформация местных политических элит подчинялась центробежному фактору, а государство низводилось до совокупности определенных территорий.

Итак, в течение 90-х гг. XX века отношения федеральной и региональной элит в Российской Федерации претерпели глубокую трансформацию, в процессе которой существенным изменениям подверглись ключевые параметры взаимодействия – политико-правовые основы отношений, их содержание и механизмы. Если смена политико-правовых основ была определена отказом от унитарных отношений в пользу федералистских, то изменение содержания было определено динамикой двух тенденций. На первом этапе, вначале 90-х гг. прошлого века, произошел отказ от долгосрочной стратегии в пользу ситуативных установок и корпоративных интересов федеральной элиты, доминировавших в течение последнего десятилетия. Смена руководства страны на рубеже веков обусловила отказ от политической конъюнктуры в отношениях «Центр – регионы» в пользу стратегических целей восстановления единства Федерации. Что касается изменения механизмов, то в 90-х гг. XX века на смену всеобъемлющему контролю центра над регионами (характерному для советского периода и осуществлявшемуся в режиме силовых и директивных стратегий) пришли компромиссные стратегии политического торга.

В течение 90-х гг. XX века компромисс между слабым Центром и сильными элитами территорий предоставлял последним политическую автономию и статус политического актора общероссийского масштаба в обмен на политическую лояльность. Заключенный в рамках стартовавшей в 2000 г. административно-правовой реформы компромисс предполагал, что главным субъектом политического процесса станет федеральная власть, а региональные элиты, сохранив определенные ресурсы влияния, утратят роль независимых властных центров и статус самостоятельных политических акторов общероссийского масштаба. Регионы получили гарантии экономической помощи от Центра в обмен на поддержку политики Москвы в ходе выборов Президента РФ и Государственной Думы ФС РФ.

Таким образом, в 90-х гг. прошлого века, несмотря на существенное изменение территориально-государственного устройства России, механизмов формирования политических элит (на смену принципу назначения пришли выборы) и характера взаимодействия федеральной и региональной элит, Центр сохранил приоритет в отношениях с элитами территорий.

#### Библиографический список

1. **Ершов, В.Н.** Нижегородский патерик времен перестройки, гласности, реформ, выборов, путчей и иных событий / В.Н. Ершов. – Н. Новгород: Нижполиграф, 1996. – 192 с.
2. **Иванов, В.** Путин и регионы. Централизация России / В. Иванов. – М.: Европа, 2006. – 240 с.
3. Лапина, Н. Региональные элиты в РФ: модели поведения и политические ориентации / Н. Лапина, А. Чирикова. – М.: ИНИОН, 1999. – 221 с.
4. **Петров, Н.** Федерализм по-русски // Pro et Contra. 2000. Т. 5. № 1.– С. 7–33.
5. **Лапина, Н.** Стратегии региональных элит: экономика, модели власти, политический выбор / Н. Лапина, А. Чирикова. – М.: ИНИОН, 2000. – 200 с.

6. **Зубаревич, Н.В.** Изменение роли и стратегий крупного бизнеса в регионах России // Региональные процессы в современной России: экономика, политика, власть: сб. ст. – М., 2003. С. 80–85.
7. **Распопов, Н.П.** Региональные политические элиты // Регионоведение: социально-политический аспект: учеб. пособие / Н.П. Распопов. – Н.Новгород: Изд-во ВВАГС, 2000. – 230 с.

*Дата поступления  
в редакцию 03.02.2012*

**M.S. Lystcev**

## **REGIONAL ELITE GENESIS PROBLEM: LATE XXth CENTURY RUSSIA**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** The paper analyzes problem of origin, self-organization and transformation of regional elites during the last decade of the XXth century. As a result the author arrives to the conclusion that political and juridical balance of federal and regional elites has been realized.

**Design/methodology/approach:** The methodological approach chosen by the author combines elements of secondary sociological analysis and political science comparative analysis. Interdisciplinary way of thinking correlates with complex and multilevel social reality of modern Russia.

**Findings:** The application field of this research results is the great diapason of social and political projects of various power levels interactions in this country.

**Research limitations/implications:** The present study discovers new aspects of social function and political role of modern Russian elites as well as their institutionalization. Regional political regime within the last decade of XXth century had been the combination of different forms and practices, that's why integrative paradigm of Russian elites is necessary.

**Originality/value:** New aspects of regional Russian elite social positioning are revealed.

*Key words:* regional elite, federal elite, contra-elite, regional political process, Center and regions policy, internal policy.

УДК 316.3

С.В. Гуляев

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МУНИЦИПАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА:  
ОПЫТ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В центре рассмотрения – проблематика обновления механизмов современного муниципального хозяйства. Отсутствие адекватных стратегий его развития рассматривается автором как одно из главных препятствий к достижению социально-экономической стабильности, особенно на региональном уровне, где динамичность и гибкость отношений в управляющих системах приобретает первостепенное значение.

В качестве объекта исследования рассмотрена коммунально-рентная модель муниципального хозяйства Перевозского района Нижегородской области, на примере которого показан механизм успешной инновационно-управленческой деятельности. Реализуемая в данном регионе система корпоративного управления базируется на организационных принципах, позволяющих широким слоям населения представлять и защищать свои социально-экономические интересы. В перспективе подобный механизм местного самоуправления способен, по мнению автора, служить в качестве инструмента реального повышения благосостояния и качества жизни россиян.

*Ключевые слова:* региональная экономика, социальное управление, местное самоуправление, муниципальное хозяйство, муниципальная собственность, социально-экономическое развитие.

Сферы здравоохранения и образования в современной России продолжают на сегодняшний день оставаться злободневной темой отечественных социально-экономических исследований. Наиболее серьёзной проблемой здесь является несовершенство правовой базы, основу которой составляют никем не отменённые нормативные ориентиры прежнего советского законодательства, предполагающие предоставление населению бесплатных медицинских услуг и возможностей образования. В настоящее время социально-экономическая ситуация в данных сферах осложнена, с одной стороны, несогласованностью действий коммерческих предприятий и государственных учреждений, с другой стороны – невниманием к специфике регионального развития, которая для нашей страны имеет особенно важное значение. Кроме того, сказываются последствия неадекватного перехода к рыночной экономике: все затраты на образование и здравоохранение в Российской Федерации осуществляются только за счет государства. В России нет ни одного социального проекта, в данных областях, оплачиваемого за счет предпринимателей или организаций, при этом 1,5% населения Российской Федерации владеют 50% национальных богатств. Всего в России 114 миллиардеров с совокупным капиталом в 297 миллиардов долларов. При этом российские миллиардеры, живущие по большей части за пределами нашей страны и не озабоченные проблемами, собственными большинству населения, платят самые низкие в мире налоги (13%), которые невозможно представить себе для Франции и Швеции (57%), Дании (61%) или Италии (66%). По состоянию на 2011 год в России на образование предполагалось потратить 516,6 миллиарда рублей, а на здравоохранение 466,1 миллиарда рублей, при этом многие услуги в данных областях оказываются только на платной основе. Это особенно ярко проявляется в сфере медицины, где, к примеру, договор с фондами обязательного медицинского страхования на оказание услуг оказывается часто за пределами реализации.

Федеральной службой государственной статистике РФ в 2010 году провела аналитическое исследование распределения доходов среди населения страны. Оказалось, что в крайней нищете находятся 13,4% с доходами ниже 3422 руб. в месяц, в нищете существуют 27,8% с доходом от 3422 руб. до 7400 руб. в месяц, в бедности пребывают 38,8% с доходами от 7400 руб. до 17000 руб., выше бедности проживают 10,9% с ежемесячным доходом от 17000 руб. до 25000 руб., со средним достатком живут 7,3% их доходы от 25000 руб. до

50000 руб. в месяц, к состоятельным относятся 1,1% и они получают от 50000 руб. до 75000 руб. в месяц и только 0,7% богатых имеют доход свыше 75000 руб. в месяц. При этом официальный прожиточный минимум по данным за 9 апреля 2011 составил 5902 руб. по России и 8656 руб. по Москве [1]. Приведённые статистические данные не учитывают, что практически все, кто имеет уровень дохода «выше бедности», проживают в городах. В Российской деревне уровень дохода остается на уровне «бедности» и ниже. Можно сделать простой вывод о том, что население сельской местности не способно оплатить платное обучение и оказание платной медицинской помощи. Несмотря на это человек в современном мире, для того чтобы выжить, не может обойтись без обучения и получения каких-либо профессиональных навыков, а также без оказания специальной медицинской помощи. Все эти расходы в Российской деревне должно взять на себя государство. При этом необходимо, чтобы бюджеты муниципальных образований и бюджеты районных центров самостоятельно могли позволить себе все необходимые расходы. Для этого нужно найти стабильные источники доходов.

В России такими источниками являются доходы от продажи полезных ископаемых и налоги. Следовательно, органам власти необходимо провести мониторинг всех имеющихся ресурсов на территории муниципальных образований и предпринять все необходимые меры для получения максимального дохода.

Особое теоретическое и практическое значение приобретает решение вопросов обновления механизма муниципального управления, поскольку именно на органы местного самоуправления возлагается непосредственная ответственность за решение проблем комплексного социально-экономического развития подведомственной территории. Опыт последнего десятилетия показывает, что в муниципальных образованиях сформировались серьёзные, требующие компетентного рассмотрения проблемы, связанные с разгосударствлением и приватизацией собственности, перераспределением земли, спадом производства, высвобождением квалифицированных кадров рабочих и специалистов, резким сокращением инвестиций и т.д. В этих условиях органы местного самоуправления должны не только решать текущие неотложные проблемы, но и иметь обоснованную стратегию деятельности, т.е. осуществлять управление, как функционированием, так и развитием территории. Однако практика свидетельствует, что на уровне муниципального образования чаще всего решаются проблемы функционирования, а вопросы развития (вопросы на перспективу) отодвигаются как бы на второй план. Между тем без решения стратегических проблем территории невозможно выйти из кризисной ситуации. Население различных городов и сел связывают своё материальное благополучие со стабильным экономическим положением в первую очередь, в своём районе или городе.

Сложный характер задач социально-экономического развития требует постоянного текущего и стратегического планирования и проектирования изменений систем управления, динамичного комбинирования связей и отношений в управляющих системах. В новых социально-экономических условиях, характеризующихся ростом числа хозяйствующих субъектов и многообразием форм собственности, назрела острая необходимость внедрить новый подход к управлению социально-экономическим развитием района, который в большей мере обеспечивает баланс интересов населения. Основной экономической функцией самоуправления является обеспечение на местном уровне нормального хода воспроизводственных процессов. Для этого муниципальный орган должен иметь экономическую базу и правовые возможности. Экономической основой местного самоуправления является муниципальная собственность. Она включает средства местного бюджета, муниципальные внебюджетные фонды, имущество органов местного самоуправления, муниципальные земли и другие природные ресурсы, находящиеся в муниципальной собственности, муниципальные предприятия и организации, банки и другие финансово-кредитные организации, муниципальный жилищный фонд, муниципальные учреждения образования, здравоохранения, культуры и спорта, другое движимое и недвижимое имущество.

Взаимоотношения местных органов с предприятиями, расположенными на их территории, строятся на правовой, в том числе и на договорной основе. Органы местного самоуправления предоставляют предприятиям землю, рабочую силу, услуги муниципального хозяйства. Предприятия со своей стороны, обеспечивают население рабочими местами и доходами, участвуют в формировании местного бюджета.

Финансовые ресурсы местного самоуправления формируются за счёт бюджетных и внебюджетных, кредитных и валютных средств. Местные органы власти должны самостоятельно разрабатывать, учреждать и исполнять свои бюджеты. В то же время вышестоящие органы отвечают за соответствие местных бюджетов нормативам минимальной обеспеченности. В реальности, однако, большинство муниципальных образований являются сегодня дотационными. Падение производства резко снижает налоговые поступления. Убыточны предприятия коммунального хозяйства. Выходом из этого положения могло бы стать повышение доли налоговых поступлений, остающихся в распоряжении местных органов. Иначе местное самоуправление попадает в полную зависимость от органов государственной власти. Основные типы муниципальных образований испытывали влияние территориального и отраслевого факторов на их внутреннюю хозяйственную жизнь. Причём территориальный фактор испытывал на себе влияние хозяйственной специфики (сельскохозяйственное производство, связанное с землёй, тяготеет к территориальному принципу организации хозяйственной жизни, к дисперсионному расселению населения, в то же время специфика промышленного производства, его концентрация на больших территориях приводят к возникновению компактных поселений).

Совокупность предприятий и учреждений, осуществляющих на территории муниципального образования хозяйственную деятельность, направленную на удовлетворение коллективных потребностей его населения, образует муниципальное хозяйство. Муниципальное хозяйство отличается от государственного достаточно широкими правами в области производственной деятельности и, прежде, всего в области распоряжения собственными ресурсами, а от частного хозяйства – общественным характером использования результатов деятельности.

Выделяют следующие виды муниципальных хозяйств:

- коммунальная модель муниципального хозяйства. Характеризуется тем, что основную тяжесть затрат на реализацию общественных интересов и потребностей несут сами жители муниципального образования и основным ресурсом являются налоги с населения. Главным элементом в этой системе выступает орган местного самоуправления, который осуществляет как накопление ресурсов, так и их расходование;
- коммунально-рентная модель муниципального хозяйства. От предыдущей отличается тем, что предусматривает участие органов местного самоуправления в сфере использования ресурсов территории и в её развитии через предоставление им ограниченных прав в финансово-кредитной деятельности и права ресурсной ренты, т.е. налоги с населения дополняются обложением производителя продукции и услуг на территории муниципального образования;
- муниципально-рентная модель подразумевает, что основное бремя по обслуживанию интересов населения и решению вопросов местного значения несут органы местного самоуправления, для чего им предоставляется возможность стать полноценным хозяйствующим субъектом на своей территории.

Существование указанных моделей зависит от огромного числа факторов, главными из которых, безусловно, являются:

- объём компетенции органов местного самоуправления, определённый законодательством;
- наличие и характер основных ресурсов территории;
- наличие квалифицированных кадров в органах местного самоуправления и на муниципальных предприятиях;
- налогоспособность населения.

В зависимости от этих факторов формируется конкретный вид муниципального хозяйства. Если рассматривать в качестве примера муниципальное образование, то хотелось бы отметить Перевозский район Нижегородской области, который относится к коммунально-рентной модели муниципального хозяйства и требует качественного обновления механизма управления.

Под понятием «обновление управления» подразумевается процесс модернизации, реконструкции и замены отдельных звеньев, методов и инструментария системы управления с тем, чтобы повысить её действенность и эффективность. Такое обновление может быть частичным и комплексным. Как правило, оно должно осуществляться поэтапно. Сегодня необходимо на основе новых идей, подходов, механизмов, методов разработать концепцию управления развитием, связанную с изменением содержания и структуры общественного развития. Происходит переход от традиционной административной модели управления, к новой модели менеджмента, где центральным системообразующим элементом становится не только эффективность на всех уровнях управления в целом в районе, но и повышение уровня жизнеобеспечения и жизнедеятельности населения.

При обновлении механизма управления большую роль сыграли принятые изменения по ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в РФ» от 06.10.2003 г. Согласно принципу территориальной организации местного самоуправления, все муниципальные образования переводятся на двухуровневую систему:

- первый уровень – это городское поселение, где непосредственно проживает городское население, и должно осуществляться местное самоуправление.
- второй уровень – сельские округа, которые создаются впервые, на данном уровне (подразумевается также осуществление местного самоуправления).

На первом уровне существующие муниципальные образования не упразднились, изменился только принцип определения их границ, т.е. образовался городской округ – г. Перевоз, при городской администрации. На втором – создание сельских округов при сельских администрациях. Принципиальным вопросом для этого уровня заключается в обосновании необходимости осуществления местного самоуправления в сельской местности. При этом необходимо проводить тесную взаимосвязь с созданными округами: помощь в реализации проектов и программ, которые улучшают уровень жизни населения; улучшают положение сельского хозяйства данного округа и района в целом.

Местные органы власти района выполняют две основные функции: предоставление услуг жителям и предприятиям и управление социально-экономическим развитием подведомственной территории. Управление функционированием часто рассматривается в качестве основной задачи органов власти. В то же время управление социально-экономическим развитием – весьма важная функция органов районного управления. Управление развитием может осуществляться с помощью широкого спектра различных стратегий, программ, конкретных действий и одноразовых управленческих решений, посредством которых местная администрация стремится стимулировать развитие экономики района, создавать новые рабочие места, увеличить налоговую базу, расширить возможности для определённых видов экономической активности, в которых заинтересовано местное сообщество.

Одна из особенностей управления развитием муниципальных образований состоит в том, что управленческие воздействия опосредованы. Местная администрация, как правило, не в состоянии непосредственно воздействовать на экономические субъекты, действующие в регионе. Из сферы прямого управления Перевозского района практически выпали хозяйствующие субъекты, прежде всего, приватизированные промышленные предприятия, предприятия сферы услуг, торговли и т.д. В то же время произошли качественные изменения в составе ресурсов экономического развития района традиционным ресурсам (трудовым, культурно-рекреационным, финансовым и др.) добавились те их виды, которые в условиях прежних экономических отношений либо в принципе не могли быть использованы, либо использовались крайне неэффективно. К ним, в частности, относятся:

- земля, здания и сооружения;
- коммунальная инфраструктура, городской транспорт и связь;
- налоговые и организационные условия ведения бизнеса;
- наличие стратегического плана развития и информационные услуги для инвесторов.

К возможным методам воздействия районной администрации на ход экономического развития можно отнести [2]:

- формирование в регионе благоприятных общих условий для развития деловой активности (рыночная инфраструктура, наличие земли и соответствующих прав на неё);
- регулирование деловой активности в регионе (Администрация формирует побудительные мотивы предпринимателей с целью принятия ими необходимых для развития данного района решений);
- прямую кооперацию администрации района и бизнеса (непосредственное сотрудничество Администрации и частных организаций).

При развитии района всё более эффективной становится внедрение корпоративной формы хозяйствования. Получение прибыли возведено в конечную цель, а удовлетворение хозяйственной потребности человека используется как средство для этого. Эффективность хозяйствования может быть лишь в форме, которая ведёт не к конкурентной борьбе за власть, а к балансу интересов всех участвующих в ней субъектов (юридических и физических лиц) по средствам кооперации и сотрудничества. Развитие малого бизнеса в районе играет очень важную роль, так как население Перевозского района – это потребители товаров, услуг, поэтому для социально-экономического развития района требуется реализация эффективной программы для поддержки предпринимательства. По данным на 1.02.2010 г., в районе зарегистрировано 340 субъектов малого бизнеса, в том числе 24 юридических лица и 316 индивидуальных предпринимателей. Более тысячи человек занято в своих структурах, что составляет 18% от общей численности людей, занятых в производстве. Основная масса предпринимателей ведёт торгово-закупочную деятельность – 248 человек, остальные занимаются оказанием бытовых и транспортных услуг, консультаций – 92 человека.

В минувшем году, благодаря договорам о социальном партнёрстве, заключённым администрацией с предпринимателями, в районный бюджет поступило 540 тысяч рублей. Малый бизнес сегодня – это новые рабочие места, пополнение бюджета налогами, решение социальных проблем. Поэтому требуется построение взаимовыгодных отношений с властью и предпринимателями, что должно способствовать развитию района в целом. В 2002 г. в Перевозе был создан Фонд поддержки предпринимательства, в задачу которого входило оказание помощи предпринимателям в налаживании и успешном ведении бизнеса. О результатах работы фонда можно сказать, что его деятельность оставляет желать лучшего. Поэтому необходимо реализовывать все предлагаемые программы для поддержки малого бизнеса в районе. Все предприятия и организации муниципальных образований можно разбить на три группы, работа каждой из которых по-разному оказывает воздействие на жизнь района, а значит, баланс интересов администрации и предприятия имеет различные основания.

Первую группу составляют крупные бюджетообразующие промышленные предприятия, эти предприятия в основном формируют доходную часть бюджета (налоги, платежи за трудовые ресурсы, использование основных фондов и др.). Ко второй группе относятся фирмы и предприятия, деятельность которых направлена на удовлетворение потребностей населения, при соблюдении собственного интереса. Третью группу образуют муниципальные предприятия и учреждения, финансируемые из бюджета.

Деятельность организаций и предприятий относят Перевозский район ко второй группе, которые направляют свою деятельность на удовлетворение потребностей населения района, при соблюдении собственного интереса, т.е. в районе существуют фирмы, которые относят район ко второй группе. К ним относятся предприятия торговли, общественного питания и бытового обслуживания, т.е. кого мы называем *малым бизнесом*. Состояние дел на этих предприятиях влияет на конъюнктуру цен в районе, на уровень занятости населения,



насыщенность потребительского рынка товарами и услугами. Баланс интересов администрации с этими предприятиями имеет следующий характер (схема). В условиях кризиса муниципальные меры регулирования потребительского рынка начинают играть значительную роль в повышении социальной защищённости населения района. Предприятия в условиях снижающейся покупательской способности населения также заинтересованы в том, чтобы сохранить баланс спроса и предложения на свои товары и услуги. Получение дополнительных льгот от администрации района позволяет им снижать себестоимость товаров и услуг. К числу данных предприятий можно отнести ОАО «Лактис», филиал РАЙПО «Перевозский хлебозавод» и др.

Баланс интересов предприятий может быть реализован через:

- договоры о совместной деятельности;
- договоры купли-продажи;
- лицензирование из деятельности.



**Рис. 1. Модель экономических взаимоотношений предприятий с администрацией района**

При реализации программы по обновлению механизма управления муниципального образования, оценке всех потенциальных возможностей и внедрения организационно-экономического обеспечения развития современных систем управления в Перевозском районе существует необходимость в создании Отдела корпоративного управления в администрации Перевозского района. Его главная задача в разработке и реализации социально-экономической политики по развитию экономической сферы с помощью разработок и проведения в жизнь специальных программ, которые направлены на рост экономики района и улучшению жизнедеятельности населения Перевозского района. Главная цель в этом процессе заключается в том, чтобы объединить инновационную деятельность, осуществляемую в районе, в один организационно оформленный управляемый процесс.

При внедрении корпоративной экономики главная цель социально-экономического развития муниципального образования – улучшение качества жизни каждого человека. Муниципальное образование – это не просто место совместного проживания людей. Оно объединяет сообщество в систему, состоящую из элементов (экономика, культура, право, поли-

тика и социальные отношения), функционирование которых направлено на достижение генеральной цели – улучшения качества жизни каждого человека.

Местное самоуправление, по существу, является системой корпоративного управления муниципального образования. В свою очередь система корпоративного управления представляет собой организационную модель, с помощью которой население представляет и защищает свои социально-экономические интересы.

Тип применяемой модели зависит от целей, механизмов их достижения и отражает сам факт разделения функций владения и управления муниципальным образованием. Муниципальное образование как корпорация есть организация лиц, обладающая как самостоятельный экономический субъект с определёнными правами и обязанностями, которые отличаются от прав и обязательств, присущих каждому члену сообщества в отдельности.

В рассматриваемой модели население (акционеры) передаст право управления собственностью менеджерам и Совету директоров, делегируя им право принятия решений по целому ряду аспектов деятельности корпорации – за исключением решений принципиальной важности. Эффективность корпоративного управления во многом зависит от успешного развития различных аспектов акционерных отношений. Формирование институтов, способных осуществлять финансирование, управление и контроль за корпорацией и есть предпосылка успешного развития экономики района.

В предложенной модели Совет директоров ответственен за решение следующих задач: формулирование стратегических целей; назначение руководителей, способных реализовать эти цели; надзор за реализацией стратегии; информирование населения (акционеров) о результатах управления активами корпорации.

Не менее важным механизмом управления, способным обеспечить управление в интересах населения (акционеров), является поглощение. Свободно функционирующий рынок поглощения, называемый рынком корпоративного контроля, представляет собой постоянно действующий аукцион активов компаний. Если стоимость активов оказывается ниже определённого уровня, который корпорация сочтёт для себя приемлемым, она присоединяет к себе “неудачника”, обеспечивая рост корпоративной собственности.

Практика корпоративного управления развитием экономики района предполагает состязание различных команд менеджеров, представляющих определённые программы социально-экономического развития сообщества, за получение доверенностей населения (акционеров) на управление корпорацией. В случае успеха выигравшая сторона получает контроль над корпорацией, даже не имея контрольного пакета акций.

В целом все участники корпорации имеют сходные интересы, связанные с ростом их доходов и укреплением здоровья каждого из них. Непосредственные способы реализации этих интересов у каждого человека могут не совпадать, так как каждый имеет собственные представления об оптимальной политике корпорации. Создавая систему двойного контроля, исходят именно из этих соображений.

Однако прежде чем говорить о значительных изменениях в системе управления, необходимо провести мониторинг всех имеющихся ресурсов муниципального образования, для того чтобы точно знать, как и с чем необходимо будет работать для получения максимального дохода.

В условиях значительных различий между муниципальными образованиями и оценки потенциальных возможностей Перевозского района представляется обоснованным и естественным проведение расчёта бюджетной обеспеченности. Для этого рассчитаем показатель средней бюджетной обеспеченности (СБО) – это количество бюджетных средств, приходящихся на одного жителя муниципального образования, выражаемая коэффициентом среднего дохода (К сд) Перевозского района.

$$К сд = Д пр / Ч пр, \quad (1)$$

где К сд – коэффициент среднедушевого дохода муниципального образования (%);  
Д пр – доходы бюджета Перевозского района (т.р.);

Ч пр – численность населения Перевозского района (чел.).

При анализе стартового социально-экономического потенциала района важное место должна занять оценка эффективности его использования. Тем не менее, обозначим общетеоретический подход к определению критерия такой оценки. Представляется, что критерий эффективности использования стартового потенциала района (К п) может быть представлен в виде [3]:

$$K_{п} = \frac{\Delta_{п}}{З_{п}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{п}$  – эффект от реализации районного социально-экономического потенциала;  
 $З_{п}$  – затраты, потребовавшиеся для достижения  $\Delta_{п}$ .

В свою очередь,  $\Delta_{п}$  может быть представлен в виде суммы двух составляющих, одна из которых характеризует прирост качества жизни населения, другая вклад района в решение проблем, т.е. статья бюджета «социальная политика». Что касается необходимых затрат ( $З_{п}$ ), то они зависят от специфики конкретных мероприятий по реализации потенциала.

Полученный показатель эффективности использования стартового потенциала района характеризует возможности Перевозского района и эффективность внедрения обновления «системы управления», которая приведёт к улучшению главного показателя уровня жизнедеятельности населения Перевозского района.

#### Библиографический список

1. Российская Федерация: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/rosstatsite/main/population/level/>
2. **Хватков, Ж.П.** Управление экономикой муниципального образования: теория, методология, практика / Ж.П. Хваткова. – Н. Новгород, 2008. – 96 с.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. – М.: Инфорэлектро, 1996. – 80 с.

Дата поступления  
 в редакцию 03.02.2012

**S.V. Gulyaev**

#### **MUNICIPAL ECONOMY MODERNIZATION: NIZHNY NOVGOROD REGION EXPERIENCE**

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky

**Purpose:** The municipal economy update is the main topic under consideration. The absence of suitable strategies of its development is one the main obstacles to the economic stability of modern Russia.

**Design/methodology/approach:** The economic modeling and mathematical analysis are the main methods of present research. The elements of system approach are also used for economic study of interaction between the federal and regional levels.

**Findings:** The experience of Perevozsky region municipal economy update described in this paper can be used as the model suitable for social development projects of other Russian regions.

**Research limitations/implications:** The way of innovational steering region development is initiated. The paper studied economic mechanisms containing great potential of further development.

**Originality/value:** The municipal annuity model is studied within the context of transitional economy of modern Russia for the first time. New aspects of its practical application are discovered. Additional opportunities of regional economy development are revealed.

*Key words:* regional economy, social steering, local self-government, municipal economy, municipal property, social-economic development.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 501,551.463

В.М. Галкин<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>2</sup>

## ОБ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЯХ В ТЕОРИИ СОЛИТОНОВ И РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН ЦУНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Институт прикладной физики РАН<sup>2</sup>

Обсуждаются особенности использования в эволюционных уравнениях условий, отличных от начальных. В качестве примеров рассматриваются уравнения Максвелла, Буссинеска, Кортвега де-Вриза, а также уравнения идеальной жидкости. Приводятся вычисления к эффекту разрыва в линеаризованной задаче распространения волн цунами, найденного в своё время авторами.

*Ключевые слова:* эволюционное уравнение, солитон, волны цунами, идеальная жидкость.

Содержание статьи можно разделить на две части. В одной из них обсуждается линейная модель цунами, возбуждаемого локальным очагом возмущения. В своё время [1, 2] авторы обнаружили неожиданный эффект бесконечного разрыва высоты волны цунами. Разумеется, это свидетельствует об ограниченности описания цунами с помощью этой модели, но с математической точки зрения результат представляется достаточно интересным. В публикациях [1, 2] опущены детали вычислений и мы воспроизводим их здесь.

Другая часть касается некоторых замечаний относительно эволюционных уравнений физики, в частности, гидродинамики. В качестве иллюстрации приводятся несколько классических примеров.

1. Под эволюционным уравнением понимается уравнение (система уравнений) вида

$$\dot{x} = f(t, x), \quad (1)$$

где  $x = x(t)$  может быть скаляром, вектором или более сложно устроенной величиной. Аргумент  $t$  интерпретируется как время. В постановке задач, в вопросах существования и единственности решений физикам помогает их интуиция. Поскольку большинство математиков (во всяком случае – «чистых») физической интуицией не обладает, то их эвристический подход к (1) в сущности есть метод Эйлера численного решения дифференциальных уравнений: зная  $x(t)$  в момент времени  $t$ , из (1) находится  $x(t + dt) = x(t) + f(t, x)dt$  в момент  $t + dt$  с повторением этого процесса.

Однако порой ситуация усложняется добавлением к (1) дополнительных ограничений не эволюционного характера. Рассмотрим несколько примеров.

1.1. В системе уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= 4\pi\rho, \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \end{aligned} \quad (2)$$

эволюционными относительно полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  являются последние два уравнения. Эвристические соображения математика наталкивают на мысль, что первые два уравнения в каком-то смысле должны следовать из оставшихся. И действительно, взяв дивергенцию от оставшихся, находим

$$\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad \frac{\partial \operatorname{div} \vec{E}}{\partial t} + 4\pi \vec{j} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, первые два уравнения играют роль начальных условий:  $\operatorname{div} \vec{H} \equiv 0$  и  $\operatorname{div} \vec{E} \equiv 4\pi \rho$ , если эти равенства выполняются в начальный момент и, кроме того, выполняется требование (уравнение неразрывности)  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0$ . Последнее есть внешнее ограничение по отношению к полям.

Нашу трактовку трудно найти в учебниках по электродинамике.

1.2. В конце XX века (примерно с 70-х годов) наблюдался бум исследований по нахождению солитонных решений уравнений гидродинамики. Мы коснёмся лишь двух уравнений: Буссинеска

$$u_{tt} - u_{xx} - 3(u^2)_{xx} - u_{xxxx} = 0 \quad (4)$$

и Кортевега де-Вриза (КдВ)

$$u_t + 6uu_x + u_{xxx} = 0. \quad (5)$$

При поиске рациональных по  $x$  решений, равных нулю при  $x = \pm \infty$ , легко устанавливается, что это решение должно иметь полюсы второго порядка и записываться в виде

$$u = -2 \sum \frac{1}{(x - x_i)^2}, \quad (6)$$

где суммирование ведётся по полюсам  $x_i = x_i(t)$ .

В [3] Абловиц и Сигур приводят для уравнений КдВ условия

$$\dot{x}_i = 12 \sum_{j \neq i} \frac{1}{(x_i - x_j)^2} \text{ и } \sum_{j \neq i} \frac{1}{(x_i - x_j)^3} = 0. \quad (7)$$

Для уравнения Буссинеска соответствующие уравнения не приводятся, но их легко получить теми же методами. Они оказываются таковыми:

$$\ddot{x}_i = 24 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-3} \text{ и } \dot{x}_i^2 + 12 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-2} - 1 = 0. \quad (8)$$

Можно предположить, что, как и в 1.1, вторые уравнения в (7) и (8) следуют из начальных условий. Однако это не так. Положение более благополучно в случае уравнения Буссинеска. Обозначим через  $I_i$  левую часть второго уравнения в (8). На решениях первого уравнения временная производная от  $I_i$  записывается как

$$\dot{I}_i = 24 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-3} (\dot{x}_i + \dot{x}_j) = 24 J_i. \quad (9)$$

Далее получаем

$$\begin{aligned} \dot{J}_i = & -3 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-4} (I_i - I_j) + 36 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-4} \left( \sum_{k \neq i} (x_i - x_k)^{-2} - \sum_{k \neq j} (x_j - x_k)^{-2} \right) + 24 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-3} \\ & \left( \sum_{k \neq i} (x_i - x_k)^{-3} + \sum_{k \neq j} (x_j - x_k)^{-3} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Если разложить на простейшие дроби (по переменной  $x_i$ ) слагаемые  $(x_i - x_j)^{-4} (x_i - x_k)^{-2}$  и  $(x_i - x_j)^{-3} (x_i - x_k)^{-3}$ , то в (10) пропадают все суммы кроме первой.

Итак, получаем:

$$\dot{I}_i = 24J_i, \quad \dot{I}_i = -3 \sum_{j \neq i} (x_i - x_j)^{-4} (I_i - I_j), \quad (11)$$

Следовательно, если брать начальные данные для эволюционного уравнения в (8) на многообразии  $I_i = 0, J_i = 0$ , то  $I_i \equiv 0$  на решениях и эти решения уравнения Буссинеска. В [4] найдено семейство рациональных решений предельным переходом в семействе многосоли-тонных решений. Приведённые ранее рассуждения показывают, что найденные там решения исчерпывают все рациональные решения уравнения Буссинеска.

Для уравнения КдФ положение хуже. Если взять производную от левк4444ой части  $I_i$  второго уравнения в (7), то на решениях эволюционного уравнения получим

$$J_i = \dot{I}_0 = \sum \left[ (x_i - x_j)^{-4} (x_i - x_k)^{-2} - (x_i - x_j)^{-4} (x_j - x_k)^{-2} \right].$$

Равенства  $I_i = 0, J_i = 0$  оказываются независимыми, т.е. появляется дополнительное ограничение  $J_i = 0$ . Независимость проверяется следующим образом. В системе  $I_i = 0$  с четырьмя переменными  $x_1, x_2, x_3, x_4$  решения есть. Но известно, что 4-полюсных рациональ-ных решений уравнения КдФ не существует, поэтому  $I_i \equiv 0$  невозможен.

1.3. *Наконец, обратимся к уравнениям движения идеальной (несжимаемой, но не обя-зательно однородной) жидкости*

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \bar{f}, \quad \frac{\partial P}{\partial t} + \text{div} \rho \bar{v} = 0, \quad \text{div} \bar{u} = 0. \quad (12)$$

Первое знакомство с (12) озадачивает: в двух эволюционных уравнениях три неизвестных величины – скорость  $\bar{u}$ , плотность  $\rho$  и давление  $P$ . Последнее к тому же определяется не од-нозначно: к  $P$  можно добавить произвольную константу. Если никаких ограничений не до-бавлять, то можно достаточно произвольно задать  $\bar{u}$  (взять поле скоростей в виде ротора) и из остальных уравнений определить  $P$  и  $\rho$ . Чтобы снять эту неопределённость, нужно при-влечь граничные условия, т.е. решать (12) в некоторой области  $V$ . Если взять дивергенцию от первого уравнения, то получаем

$$\text{div} \left( \frac{1}{\rho} \nabla P \right) = \text{div} (\bar{f} - (\bar{r} \nabla) \bar{u}). \quad (13)$$

Знание в момент времени  $t$  значения  $\bar{u}$  и эллиптичность уравнения позволяют вос-становить  $P$  в тот же момент  $t$  по информации о  $P$  на границе. Далее восстанавливаются  $\bar{u}$  и  $\rho$  в момент  $t + dt$  и граница  $S(t + dt)$  области, занятой жидкостью. Затем процедура повторяется.

О характере информации о давлении на границе  $S(t)$  в (13) дают представление две задачи – в одной из них требуется исследовать эволюцию газового пузыря, всплывающего в неограниченном объеме однородной жидкости. Внутри пузыря давление газа является по-стоянным (равным 0!) и для (13) получаем внешнюю задачу Дирихле. Во второй задаче ис-следуются поверхностные волны в океане с горизонтальным дном. На поверхности океана давление постоянно (его опять можно взять равным нулю), а на дне скорость направлена ему параллельно. Из (12) следует, что известной становится нормальная производная (т.е. пер-пендикулярная дну) – компонента градиента  $P$ . Краевая задача в (13) использует на  $S(t)$  знание либо  $P$  (на поверхности океана), либо нормальную производную от  $P$ .

Понимание изложенных соображений, собственно, является ключом к построению численных алгоритмов. Кроме того, вскрывается природа математических трудностей: в конце концов надо решать уравнение типа Пуассона (13). Некоторые упрощения в алгорит-мах, способствующие пониманию качественной картины, известны в двух случаях. В трёх-

мерных задачах часто используют линеаризацию уравнения движения, т.е. ограничиваются рассмотрением малых отклонений от явно получаемых решений. В двумерных задачах возможно уменьшение количества независимых функций. Так в задаче о всплывании газового пузыря в потенциальной жидкости [5] было использовано конформное отображение круга на поверхности  $S(t)$  пузыря и получены более удобные уравнения, численные расчёты по которым позволили проанализировать качественную картину.

2. Обратимся к задаче об излучении волн цунами локальными источниками возмущения. Вывод линейного приближения (дно океана горизонтально, изменение высоты волны мало по сравнению с уровнем невозмущённой поверхности) приводится в известном курсе гидродинамики Ландау и Лифшица [6]. Высота  $u(x, y, t)$  волны в точке  $M(x, y)$  удовлетворяет волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (14)$$

Решение ищется в бесконечной области изменения декартовых координат  $x, y$  при заданных начальных условиях

$$u|_{t=0} = f(x, y), \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = g(x, y). \quad (15)$$

Предполагается, что  $f$  и  $g$  равны нулю вне ограниченной выпуклой области  $D$ , а внутри ее постоянны.

Решение задачи Коши даётся формулой [7]:

$$u(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{S_{ct}} \frac{f(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{c^2 t^2 - (\xi - x)^2 - (\eta - y)^2}} + \frac{1}{2\pi c} \iint_{S_{ct}} \frac{g(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\sqrt{c^2 t^2 - (\xi - x)^2 - (\eta - y)^2}}, \quad (16)$$

где  $S_{ct}$  – круг радиуса  $ct$  с центром в точке  $(x, y)$ .

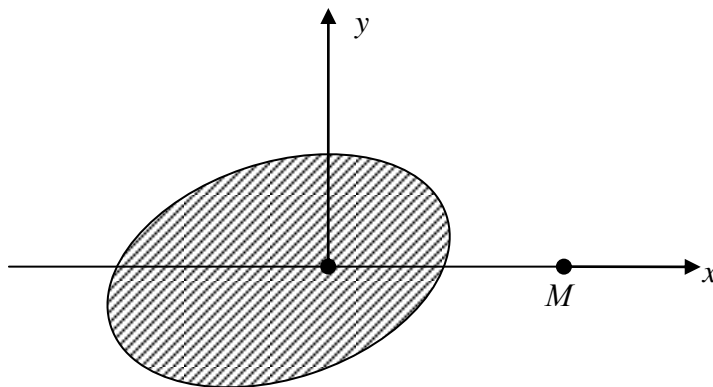


Рис. 1

Второе слагаемое в (16) не представляет особого интереса. Интеграл сходится, равен нулю, если  $S_{ct}$  не пересекается с  $D$  и имеет асимптотику  $\frac{1}{2\pi c^2 t} \iint_D g(\xi, \eta) d\xi d\eta$ . Поведение же первого слагаемого более интересное. Исследуем его сначала для случая круговой области  $D$  с центром в точке  $(0,0)$ . Чтобы уменьшить количество параметров в (16), произведём масштабное преобразование в (14). С его помощью можно добиться выполнения требований:

Радиус  $D=1$ ,  $c=1$ ,  $f = \pi c (= \text{const})$  внутри  $D$ . При  $g = 0$  (16) переходит в

$$u(x, y, t) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{S_{t \cap D}} \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{t^2 - (\xi - x)^2 - (\eta - y)^2}}. \quad (17)$$

Если точку  $M$  выбрать как на рис. 1, то область интегрирования в (17) будет выглядеть, как это показано на рис. 2 и рис. 3 (указана часть области, соответствующая  $y \geq 0$ ).

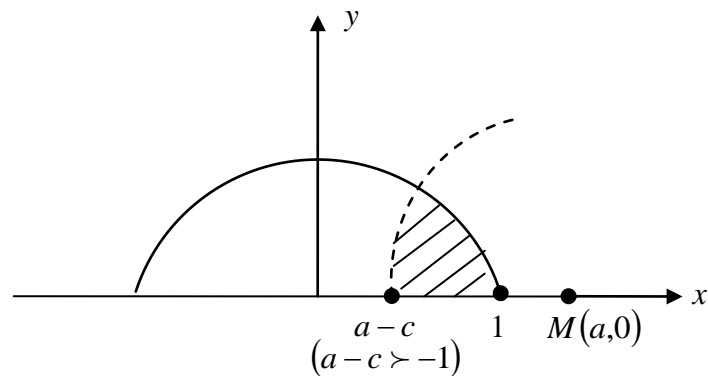


Рис. 2

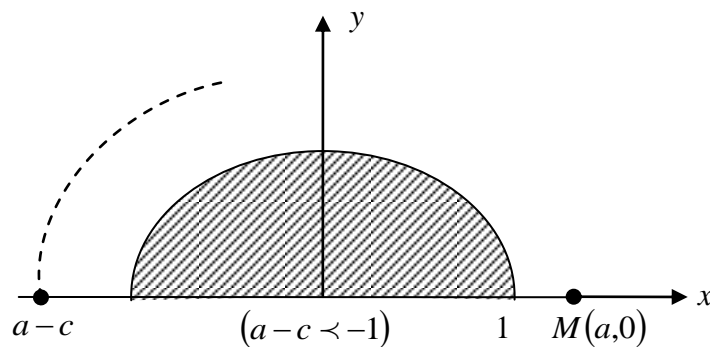


Рис. 3

В (17) можно выполнить интегрирование по  $\eta$ . Для точки  $M(a, 0)$  получается

$$u(a, 0, t) = \frac{\partial}{\partial t} V,$$

где  $V = 0$ , если  $t < a - r$ ,

$$\frac{\pi}{2}(\lambda - a + t) + \int_{\lambda}^1 \arcsin \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{t^2 - (\xi - a)^2}} d\xi, \tag{18}$$

если  $a - r < t < a + r$ ,

$$\int_{-1}^1 \arcsin \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{t^2 - (\xi - a)^2}} d\xi,$$

если  $t > a + r$ .

Здесь  $\lambda = \frac{a^2 + 1 - t^2}{2a}$ .

Дифференцирование по времени дает окончательный ответ

$u = 0$ , если  $t < a - r$ ,

$$\frac{\pi}{2} \left( -\frac{t}{a} + 1 \right) + \frac{t}{a} \arcsin \sqrt{\frac{1 - \lambda^2}{t^2 - (\lambda - a)^2}} - \int_{\lambda}^r \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{t^2 - a^2 - 1 + 2a\xi}} \frac{t}{t^2 - (\xi - a)^2} d\xi, \tag{19}$$



для  $a - r < t < a + r$  и

$$-\int_{-1}^1 \sqrt{\frac{1-\xi^2}{t^2 - a^2 - 1 + 2a\xi}} \frac{t}{t^2 - (\xi - a)^2} d\xi,$$

для  $t > a + r$ .

Более или менее стандартные вычисления для нахождения приближений  $u$  в окрестностях точек  $t = a - 1$  и  $t = a + 1$  приводят к следующим результатам: в точке  $a - 1$   $u$  претерпевает скачок величиной  $\frac{\pi}{2\sqrt{a}}$ . В окрестности же точки  $a + 1$  имеет асимптотику

$$\frac{t}{2a\sqrt{a}} \ln|t - a - 1|.$$

Для области, отличной от круга, ситуацию проясняет следующее соображение. Точкам  $t = a \pm 1$  в общем случае соответствуют наиболее далекая и наиболее близкая к  $M$  точки границы  $D$ . Их окрестности можно аппроксимировать кругами, соприкасающимися с границей  $D$ , и поведение  $u$  в окрестностях моментов времени, когда  $ct$  достигает наименьшего и наибольшего расстояний  $M$  до  $D$ , аналогично тому, что имеет место для круговой области.

#### Библиографический список

1. **Galkin, V.M.** Propagation of Tsunami waves generated by elliptical sources / V.M. Galkin [et al.] // Sci Tsunami Hazards, 1986. 4. №3. P. 149–152.
2. **Галкин, В.М.** Формирование излучения волн цунами эллиптическими очагами / В.М. Галкин [и др.] // Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе курильских островов / Институт морской геологии и геофизики. Владивосток. 1984. С. 19–29.
3. **Абловиц, М.** Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур. – М.: Мир, 1987.
4. **Galkin, V.M.** The structure of rational solutions to the Boussinesq equation / V.M. Galkin, D.E. Pelinovsky, Yu.A. Stepanyants // Phisika D 80 91995). P. 246–255.
5. **Галкин, В.М.** Потенциальное обтекание газовой полости идеальной жидкостью. / В.М. Галкин, В.И. Голинько, Ю.А. Степанянц / Горьк. политехн. ин-т // Колебания и волны в жидкости. Горький 1988. С. 106–113.
6. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика. Т. VI, Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1986.
7. **Кошляков, Н.С.** Основные дифференциальные уравнения математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Изд. Физ.-мат лит., 1962.

Дата поступления  
в редакцию 25.01.2012

**V.M.Galkin<sup>1</sup>, E.N.Pelinovsky<sup>2</sup>**

#### On the evolution equations in the soliton theory and in the tsunami waves propagation

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev<sup>1</sup>  
Institute of Applied Physics AIN<sup>2</sup>

In this paper the peculiarities of the non initial conditions using for evolution equations are discussed. As the examples Maxwell, Boussinesq, KdV and ideal fluid equations are considered. The calculations for the «breakdown» effect that the authors had found for the linearised problem of the tsunami waves propagation are given.

*Key words:* evolution equation, soliton, tsunami waves, ideal fluid.

УДК 512.544.2

И.А. Тимофеенко

**ПОРОЖДАЮЩИЕ ТРОЙКИ ИНВОЛЮЦИЙ  
ЛИНЕЙНЫХ ГРУПП РАЗМЕРНОСТИ 2  
НАД КОЛЬЦОМ ЦЕЛЫХ ГАУССОВЫХ ЧИСЕЛ**

Сибирский федеральный университет

Установлено, что группа  $PGL_2(Z + Zi)$  порождается тремя инволюциями и не порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны.

*Ключевые слова:* кольцо целых гауссовых чисел, линейная группа, порождающие тройки инволюций.

**Постановка задачи**

Пусть  $GL_2(Z + Zi)$  — группа всех обратимых матриц размерности 2 над кольцом целых гауссовых чисел  $Z + Zi$ , где  $i$  — корень из  $-1$ ,  $SL_2(Z + Zi)$  — её подгруппа матриц с определителем 1, а  $PGL_2(Z + Zi)$ ,  $PSL_2(Z + Zi)$  — их фактор-группы по центру соответственно. В данной статье для линейных групп размерности 2 над кольцом целых гауссовых чисел рассматриваются следующие задачи:

А. Порождается ли данная группа тремя инволюциями? ((2,2,2) – порождаемость).

Б. Порождается ли данная группа тремя инволюциями, две из которых перестановочны? ((2×2,2) – порождаемость).

**1. Группа  $SL_2(Z + Zi)$**

В группе  $SL_2(Z + Zi)$  единственная инволюция

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

поэтому справедливо

**Предложение 1.1.** *Группа  $SL_2(Z + Zi)$  не порождается никаким множеством инволюций.*

**2. Группа  $GL_2(Z + Zi)$**

В группе  $GL_2(Z + Zi)$  у любой инволюции определитель может быть равен только  $\pm 1$ . Но в  $GL_2(Z + Zi)$  есть матрица, определитель которой равен  $i$ , например,

$$\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Значит, справедливо

**Предложение 2.1.** *Группа  $GL_2(Z + Zi)$  не порождается никаким множеством инволюций.*

### 3. Группа $PGL_2(Z + Zi)$

В следующих предложениях для элементов группы  $PGL_2(Z + Zi)$  используется матричная запись, при этом два элемента считаются равными, если они различаются лишь умножением на скалярную матрицу, (а не скалярная матрица является инволюцией, если её квадрат равен скалярной матрице).

**Предложение 3.1.** *Группа  $PGL_2(Z + Zi)$  порождается тремя инволюциями*

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\beta = \begin{pmatrix} 0 & i \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

*Доказательство.* Элементы

$$\alpha\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix},$$

$$\beta\alpha = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$(\alpha\beta)^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$(\beta\alpha)^2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

порождают диагональную подгруппу  $PGL_2(Z + Zi)$ , а элементы

$$\gamma(\alpha\beta)^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\alpha\gamma(\alpha\beta)^2\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$(\beta\alpha)^{-1}\gamma\beta\alpha(\alpha\beta)^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ i & 1 \end{pmatrix},$$

$$\alpha(\beta\alpha)^{-1}\gamma\beta\alpha(\alpha\beta)^2\alpha = \begin{pmatrix} 1 & i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

порождают все трансвекции. А так как  $PGL_2(Z + Zi)$  порождается всеми своими диагональными элементами и всеми трансвекциями, то взятые три инволюции порождают всю группу. Предложение доказано.

**Лемма 3.1.** Для любых трёх нецентральных элементов  $\alpha, \beta, \gamma$  из  $GL_2(C)$ , удовлетворяющих следующему условию:

- 1)  $\alpha\beta = \beta\alpha$ ,
- 2) элементы  $\alpha^2, \beta^2, \gamma^2$  лежат в центре  $GL_2(C)$ ,

справедливо равенство

$$\alpha^{-1}\gamma\alpha = \beta^{-1}\gamma\beta. \tag{1}$$

**Доказательство.** Из теоремы о жордановой нормальной форме следует, что любой элемент из группы  $GL_2(C)$  с точностью до сопряжения имеет вид

$$\begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & u \end{pmatrix},$$

либо

$$\begin{pmatrix} t & 1 \\ 0 & t \end{pmatrix},$$

где  $t, u \in C$ . Заметим, что элемент

$$\begin{pmatrix} t & 1 \\ 0 & t \end{pmatrix}$$

имеет бесконечный порядок, а это невозможно в силу того, что любой элемент из центра  $GL_2(Z + Zi)$  имеет конечный порядок. Так же  $t \neq u$  в силу нецентральности элементов. С точностью до сопряжения в  $GL_2(C)$  можно считать, что

$$\alpha = \begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & u \end{pmatrix},$$

$$\beta = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix},$$

где  $a, b, c, d \in C$ . Причем в силу перестановочности первых двух элементов,

$$\alpha\beta = \begin{pmatrix} at & bt \\ cu & du \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} at & bu \\ ct & du \end{pmatrix} = \beta\alpha.$$

то есть

$$\begin{cases} bt = bu, \\ cu = ct \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} b(t-u) = 0, \\ c(t-u) = 0 \end{cases}.$$

Возможны два варианта: 1)  $t = u$ , 2)  $b = c = 0$ . Вариант 1) не подходит, так как элемент  $\alpha$  не-центральный ( $t \neq u$ ). Следовательно,

$$\beta = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix}, \quad a \neq d.$$

Из условия 2) леммы следует, что

$$\alpha^2 = \begin{pmatrix} t^2 & 0 \\ 0 & u^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v & 0 \\ 0 & v \end{pmatrix},$$

для некоторого  $v \in C$ . Отсюда  $t^2 = u^2$ , следовательно,  $t = -u$ , а значит,

$$\alpha = \begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & -t \end{pmatrix}.$$

Аналогично

$$\beta = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & -a \end{pmatrix}.$$

Далее, пусть

$$\gamma = \begin{pmatrix} w & x \\ y & z \end{pmatrix},$$

тогда

$$\alpha^{-1}\gamma\alpha = \begin{pmatrix} t^{-1} & 0 \\ 0 & (-t)^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w & x \\ y & z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t & 0 \\ 0 & -t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w & -x \\ -y & z \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} a^{-1} & 0 \\ 0 & (-a)^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w & x \\ y & z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & -a \end{pmatrix} = \beta^{-1}\gamma\beta.$$

Лемма доказана.

**Лемма 3.2.** Любая подгруппа  $M$ , порожденная тремя нецентральными инволюциями из группы  $PGL_2(Z + Zi)$  над кольцом целых гауссовых чисел  $Z + Zi$ , две из которых перестановочны, имеет следующую структуру:

$$M = \langle \gamma, \delta \rangle \cdot \langle \alpha, \beta \rangle, \quad (2)$$

где

$$\alpha^2 = \beta^2 = \gamma^2 = \delta^2 = (\alpha\beta)^2 = \alpha\gamma\alpha\delta = \beta\gamma\beta\delta = 1. \quad (3)$$

Более того, подгруппа  $\langle \gamma, \delta \rangle \triangleleft M$  и группа  $M$  либо конечна, либо  $M = \langle \gamma, \delta \rangle \square \langle \alpha, \beta \rangle$ , где " $\square$ " - полупрямое произведение групп, группа слева от " $\square$ " является ядром полупрямого произведения.

**Доказательство.** Рассмотрим три нецентральные инволюции  $\alpha, \beta, \gamma$  группы  $PGL_2(Z + Zi)$ , первые две из которых перестановочны. Тогда их прообразы при гомоморфизме  $GL_2(Z + Zi) \rightarrow PGL_2(Z + Zi)$  удовлетворяют условиям из леммы 3.1. Следовательно, верно равенство (1), которое гомоморфизм преобразует в  $\alpha\gamma\alpha = \beta\gamma\beta = \delta$ . Поэтому равенства (3) верны.

В силу равенств:  $\alpha\gamma = \delta\alpha$ ,  $\beta\gamma = \delta\beta$ ,  $\beta\delta = \gamma\beta$  любое слово из подгруппы  $M$  имеет один из следующих четырех видов:

$$\begin{aligned} &\gamma\delta \dots \gamma\delta\varepsilon, \\ &\gamma\delta \dots \gamma\delta\gamma\varepsilon, \\ &\delta\gamma\delta \dots \gamma\delta\varepsilon, \\ &\delta\gamma\delta \dots \gamma\delta\gamma\varepsilon, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon = 1, \alpha, \beta, \alpha\beta$ .

Следовательно, выполняется и равенство (2) и, более того, подгруппа

$$\langle \gamma, \delta \rangle = \langle \gamma\delta \rangle \square \langle \gamma \rangle$$

нормальна в  $M$ . Покажем, что группа  $M$  либо конечна, либо  $M = \langle \gamma, \delta \rangle \square \langle \alpha, \beta \rangle$ .

Любой элемент из подгруппы  $\langle \gamma, \delta \rangle$  имеет вид  $(\gamma\delta)^k$  или  $(\gamma\delta)^k \gamma$ .

Если  $(\gamma\delta)^k \in \langle \alpha, \beta \rangle$ , то  $(\gamma\delta)^{2k} = 1$  и, следовательно, группа  $M$  конечна.

Пусть  $(\gamma\delta)^k \gamma \in \langle \alpha, \beta \rangle$ . Тогда  $(\gamma\delta)^k \gamma = \alpha, \beta, \alpha\beta$  или 1. Если  $(\gamma\delta)^k \gamma = \alpha$ , то в силу тождества  $\delta = \alpha\gamma\alpha$  получаем равенство  $(\delta\gamma)^k \delta = \alpha(\gamma\delta)^k \gamma\alpha = \alpha$ . Отсюда  $(\gamma\delta)^{2k+1} = (\gamma\delta)^k \gamma (\delta\gamma)^k \delta = \alpha\alpha = 1$  и, следовательно, группа  $M$  конечна. Случай  $(\gamma\delta)^k \gamma = \beta$  подобен. Если  $(\gamma\delta)^k \gamma = \alpha\beta$ , то  $(\gamma\delta)^k = \alpha\beta\gamma$ . Отсюда

$$(\gamma\delta)^{2k} = \alpha\beta\gamma\alpha\beta\gamma = \beta\alpha\gamma\alpha\beta\gamma = \beta\delta\beta\gamma = \beta\beta\gamma\beta\beta\gamma = \gamma\gamma = 1$$

и, следовательно, группа  $M$  конечна. Лемма доказана.

**Предложение 3.2.** *Группа  $PGL_2(Z + Zi)$  не порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны.*

**Доказательство.** В любой порождающей тройке инволюций группы  $PGL_2(Z + Zi)$  не может быть центральной инволюции, в силу простоты группы  $A_6$ , которая является гомоморфным образом группы  $PGL_2(Z + Zi)$ . С другой стороны, группа  $A_6$  не может быть гомоморфным образом группы  $M$  из леммы 3.3. Следовательно, группа  $PGL_2(Z + Zi)$  не может порождаться тремя инволюциями, две из которых перестановочны. Предложение доказано.

#### 4. Группа $PSL_2(Z + Zi)$

**Предложение 4.1.** *Группа  $PSL_2(Z + Zi)$  не порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны.*

**Доказательство.** Известно [2], что  $PSL_2(9)$  не порождается тремя инволюциями две

из которых перестановочны. А так как существует гомоморфизм  $PSL_2(Z + Zi) \rightarrow PSL_2(9)$ , то  $PSL_2(Z + Zi)$  не порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны. Предложение доказано.

### 5. Группа $SL_2^\pm(Z + Zi)$

Через  $SL_2^\pm(Z + Zi)$  обозначим подгруппу матриц из  $GL_2(Z + Zi)$ , определитель которых равен  $\pm 1$ .

**Предложение 5.1.** *Группа  $SL_2^\pm(Z + Zi)$  порождается тремя следующими инволюциями:*

$$\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\beta = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1+i & 1 \end{pmatrix},$$

$$\gamma = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ i & 1 \end{pmatrix}.$$

**Доказательство.** Так как

$$\gamma\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\alpha\gamma\beta\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

и  $\det(\alpha) = -1$ , то  $\langle \alpha, \beta, \gamma \rangle \langle \alpha, \gamma\beta, \alpha\gamma\beta\alpha \rangle = GL_2(Z)$ . Следовательно,

$$\langle \alpha, \beta, \gamma \rangle \ni \delta = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а так как

$$\delta\gamma = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ i & 1 \end{pmatrix}$$

и

$$\alpha\delta\gamma\alpha = \begin{pmatrix} 1 & i \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

то  $\langle \alpha, \beta, \gamma \rangle = SL_2^\pm(Z + Zi)$ .

### Выводы

Пусть  $G$  – одна из следующих групп:

$$GL_2(Z + Zi), PGL_2(Z + Zi), SL_2(Z + Zi), PSL_2(Z + Zi).$$

Тогда ответы на приведенные ранее задачи для группы  $G$  указаны в табл. 1, где "+" означает положительное решение, "-" - отрицательное решение, "?" - ответ неизвестен.

Таблица 1

Задача	$GL_2(Z + Zi)$	$PGL_2(Z + Zi)$	$SL_2(Z + Zi)$	$PSL_2(Z + Zi)$
(2, 2, 2)	–	+	–	?
$(2 \times 2, 2)$	–	–	–	–

### Библиографический список

1. **Нужин, Я.Н.** Порождающие тройки инволюций линейных групп размерности 2 над кольцом целых чисел / Я.Н. Нужин, И.А. Тимофеев // Владикавказский матем. журнал. 2009. С. 59–62.
2. **Нужин, Я.Н.** Порождающие элементы групп лиева типа над конечным полем нечетной характеристики  $\Pi$  // Алгебра и логика. 1997. № 4. С. 422–440.

Дата поступления  
в редакцию 31.01.2012

**I.A. Timofeenko**

### GENERATING TRIPLES INVOLUTIONS OF LINEAR GROUPS OF DIMANTION 2 OVER GAUSSIAN INTEGER

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

It is proved that the group  $PGL_2(Z + Zi)$  is generated by three involution and it is not generated by three involutions, two of which commute.

*Key words:* gaussian integers, special linear group, generating triples.



УДК: 519.81/.83

Е.И. Верещагина

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ $3 \times 3$ ИГРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЛАТЁЖНОЙ МАТРИЦЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается обратная задача для  $3 \times 3$  – антагонистической игры двух игроков. Предполагается, что платёжная матрица имеет различные элементы. Также предполагается, что вероятности выигрышей известны. Показывается, что все решения обратной задачи получаются из одного из них перестановкой строк, столбцов и перестановкой выигрышей, имеющих одинаковую вероятность.

*Ключевые слова:* антагонистическая игра, обратная задача, платёжная матрица, вероятности выигрышей.

Под обратной задачей в теории  $m \times n$  - игр двух лиц, автор, как и в [1], понимает задачу восстановления платёжной матрицы  $A = (a_{ij})$  по известному множеству  $\{b_{ij} \mid b_{ij} \in B\}$ , где  $b_{ij}$  - частота (вероятность) появления выигрыша  $a_{ij}$ . Если  $p_i$  (соответственно  $q_j$ ) вероятность выбора первым игроком  $i$ -й стратегии (соответственно  $j$ -й вторым), то  $b_{ij} = p_i q_j$ . Предполагается, что игроки применяют смешанные стратегии, и все чистые стратегии используются с положительными вероятностями ( $b_{ij} \neq 0$ ). Однако последнее ограничение не существенно, так как стратегии с нулевыми вероятностями (т.е. не используемые игроками) можно исключить из рассмотрения и игра сведётся к меньшим значениям  $m$  и  $n$ .

Эта задача моделирует следующую ситуацию. Проводится достаточно длинная серия игр, в которой сторонний наблюдатель имеет возможность получить информацию об исходе каждой игры. Будем предполагать, что все выигрыши различны. В этом случае статистика позволяет найти вероятности  $b_{ij}$  каждого из них. Таким образом, становятся известными вероятности появления выигрышей, а также сами выигрыши.

Основные вопросы при изучении обратной задачи являются стандартными. Это вопросы существования решений (I), их единственности (II) и методов нахождения решений (III).

I. Поскольку речь идёт о восстановлении платёжной матрицы  $A$ , то мы заранее предполагаем, что решение существует.

Итак, мы исходим из какого-либо решения  $m \times n$  - игры

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdots \\ p_m \end{matrix}$$

$$q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n$$

с известной матрицей вероятностей  $B = (b_{ij})$ . Конечно, по матрице  $B$  вероятности выбора стратегий  $p_i$  и  $q_j$  легко определяются:  $p_i = \sum_j b_{ij}$ ,  $q_j = \sum_i b_{ij}$  ( $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, n}$ ).

Любое другое решение задачи о восстановлении платёжной матрицы  $A' = (a'_{ij})$  от-

личается от исходного перестановкой элементов матрицы  $A$ :  $a'_{i',j'} = a_{ij}$  где  $(i, j) \rightarrow (i', j')$  - биекция.

В матрице вероятностей  $B' = (b'_{ij}) = (P_i Q_j)$ , конечно же  $b'_{i',j'} = b_{ij} = p_i q_j$ .

Следовательно, можно записать

$$P_i Q_j = p_i q_j. \tag{1}$$

Данное уравнение будем называть *основным уравнением обратной задачи*.

Логарифмирование обеих частей уравнения (1) даёт

$$x_i + y_j = X_{i'} + Y_{j'}, \tag{2}$$

где  $x_i = \ln p_i, y_j = \ln q_j, X_{i'} = \ln P_{i'}$  и  $Y_{j'} = \ln Q_{j'}$ .

Это соотношение можно рассматривать как однородную систему уравнений относительно  $x, y, X$  и  $Y$ , если временно не обращать внимания на условия нормировки  $\sum p_i = \sum q_j = \sum P_{i'} = \sum Q_{j'} = 1$ . Их выполнения можно добиться после решения (2), вводя подходящий нормирующий множитель в экспоненты.

Запись  $B = (b_{ij})$ , где  $b_{ij} = p_i q_j$  будем называть *мультипликативной*. Имея в виду работу с (2) представляется более удобным использовать аддитивную форму записи:  $B = (\ln p_i q_j) = (x_i + y_j)$ . Заметим, что использование одной и той же буквы  $B$  в аддитивной и мультипликативной записи вряд ли послужит причиной недоразумения.

Сделаем одно важное замечание относительно решений системы (2).

**Теорема 1:** Основное уравнение обратной задачи инвариантно относительно преобразования  $x_i \rightarrow x_i + a, y_j \rightarrow y_j + b, X_{i'} \rightarrow X_{i'} + c, Y_{j'} \rightarrow Y_{j'} + d$ , где  $a, b, c, d$  подчинены единственному ограничению  $a + b = c + d$ .

Доказательство:

Рассмотрим аддитивную  $B = (x_i + y_j)$  и мультипликативную  $B = (e^{x_i + y_j})$  форму записи матрицы вероятностей  $B$ .

При преобразовании  $x_i \rightarrow x_i + a, y_j \rightarrow y_j + b$  матрица вероятностей  $B$  примет вид: для аддитивной записи  $B = (x_i + y_j + a + b)$ , для мультипликативной записи  $B = (e^{x_i + y_j} \cdot e^{a+b})$ .

Учитывая условие нормировки  $\sum p_i = \sum q_j = \sum P_{i'} = \sum Q_{j'} = 1$ , введём нормирующий множитель, знаменатель которого есть сумма всех элементов матрицы:

$$B = \frac{1}{\sum e^{x_i + y_j}} (e^{x_i + y_j}) \rightarrow \frac{1}{\sum e^{x_i + y_j} \cdot e^{a+b}} (e^{x_i + y_j} \cdot e^{a+b}) = \frac{1}{\sum e^{x_i + y_j}} (e^{x_i + y_j}).$$

Доказательство для матрицы вероятностей  $B'$  содержит аналогичные рассуждения. Таким образом, нетрудно видеть, что решение обратной задачи останется тем же самым.

**Замечание:** При решении системы (2) теорема позволяет уменьшить количество параметров системы на три.

II. Вопрос о том, с какой точностью определяется решение, представляется гораздо более интересным. Сразу же надо отметить, что решение обратной задачи не единственно. Так, например, перестановки строк (столбцов) в  $A$  дают другие решения обратной задачи.

Любое решение задачи о восстановлении платёжной матрицы  $A' = (a'_{ij})$  можно описать подстановками:  $a_{ij} \rightarrow a'_{ij}$ . Свяжем с каждой игрой  $G$  некоторое множество  $\text{Sub}(G)$  подстановок, соответствующих всем решениям обратной задачи. Множество  $\text{Sub}(G)$  есть неко-

торое подмножество симметрической группы  $S_N$ , где  $N = mn$  для  $m \times n$  - игры.

Особо отметим некоторые решения, получаемые из исходного. *Во-первых*, это решения, где  $A'$  получается из  $A$  перестановкой строк и столбцов, это равносильно изменению нумераций стратегий игроков. Кроме того, в случае  $n \times n$  - игр, когда нам неизвестно, какого игрока считать первым, допустимо транспонирование платёжной матрицы  $A$  (замена первого игрока вторым и наоборот) и, *во-вторых*, в  $A$  возможна перестановка равновозможных выигрышей.

Отдельно выделим во множестве  $\text{Sub}(G)$  множество стандартных преобразований  $\Gamma$ , состоящее из решений получаемых из исходного таким образом ( $\Gamma \subset \text{Sub}(G)$ ). Описанные ранее стандартные преобразования образуют подгруппу в  $S_N$  и подмножество в  $\text{Sub}(G)$ .

*Предложение 1.* Множество  $\text{Sub}(G)$  есть объединение некоторого числа правых смежных классов группы  $S_N$  по подгруппе стандартных преобразований  $\Gamma$ .

*Доказательство:*

Если  $A \xrightarrow{\alpha} A'$ , а  $A' \xrightarrow{\beta} A''$ , где  $\beta$  – стандартные преобразования, то  $\beta\alpha: A \xrightarrow{\alpha} A' \xrightarrow{\beta} A''$  даёт решение  $A''$ , т.е. получаем из  $A \xrightarrow{\alpha} A'$  целый класс решений, соответствующий правому смежному классу по подгруппе преобразований  $\Gamma$ .

Обратимся к случаю  $3 \times 3$  – игры, когда все выигрыши различны. Основным результатом, после обширных вычислений, проведённых автором, есть следующая теорема.

**Теорема 2:** Каждое решение обратной задачи получается из фиксированного стандартными преобразованиями, т.е.  $\text{Sub}(G) = \Gamma$ .

Доказательство вычислительное. В основе вычислений лежит основное уравнение обратной задачи.

$$x_i + y_j = X_{\alpha(i,j)} + Y_{\beta(i,j)}, \quad (2)$$

где  $x_i = \ln p_i$ ,  $y_j = \ln q_j$ ,  $X_{\alpha(i,j)} = \ln P'_i$ ,  $Y_{\beta(i,j)} = \ln Q'_j$ .

А priori для  $A'$  возможны 9! случаев. Однако, пользуясь стандартными преобразованиями, их можно свести к меньшему количеству вариантов. Это варианты, входящие ниже в п.1, 2 и 3.

Так как величины выигрышей особого значения не имеют, а потому обозначим их символами: 1,2,3 и т.д.

1. Элементы какой-либо строки (столбца) матрицы  $A$  остаются на одной линии в матрице  $A'$ .

Без ограничения общности можно считать, что элементы первой строки: 1,2 и 3 остаются на месте. Если элементы второй строки: 4,5 и 6 обозначить  $\circ$ , а элементы третьей строки: 7, 8 и 9 -  $*$ , то матрица  $A'$  распадается на следующие подтипы:

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \circ & \circ & \circ \\ * & * & * \end{pmatrix}, 2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \circ & \circ & * \\ \circ & * & * \end{pmatrix} \text{ и } 3) \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \circ & \circ & * \\ * & * & \circ \end{pmatrix}$$

с точностью до перестановки строк в  $A'$  и переобозначения  $\circ \leftrightarrow *$ .

2. Два элемента какой-либо строки (столбца) матрицы  $A$  остаются на одной линии в матрице  $A'$ .

Без ограничения общности можно считать, что элементы 1 и 2 неподвижны, а элемент 3 перешёл во вторую строку:

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 3 \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \text{ и } 2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdot \\ \cdot & 3 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}.$$

Как и в предыдущем случае, введём обозначения: элементы 4,5 и 6 обозначим  $\circ$ , а элементы 7,8 и 9 -  $*$ , таким образом, матрица  $A'$  распадается на следующие подтипы:

$$1.1) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ \circ & * & 3 \\ \circ & * & * \end{pmatrix}, 1.2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ \circ & * & 3 \\ * & \circ & * \end{pmatrix}, 1.3) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ \circ & * & 3 \\ * & * & \circ \end{pmatrix}, 1.4) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ * & * & 3 \\ \circ & * & \circ \end{pmatrix}; 1.5) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ * & * & 3 \\ \circ & \circ & * \end{pmatrix}.$$

$$2.1) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ \circ & 3 & * \\ * & \circ & * \end{pmatrix}, 2.2) \begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ * & 3 & * \\ * & \circ & \circ \end{pmatrix}.$$

3. Никакие два элемента какой-либо строки (столбца) матрицы  $A$  не остаются на одной

линии в матрице  $A'$ :  $\begin{pmatrix} 1 & \circ & * \\ * & 2 & \circ \\ \circ & * & 3 \end{pmatrix}$ , где  $\circ$  - элементы 4,5 и 6, а  $*$  - 7,8 и 9.

Отдельно рассмотрим первый подтип, в случае, когда элементы какой-либо строки

(столбца) матрицы  $A$  остаются на одной линии в матрице  $A'$ :  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \circ & \circ & \circ \\ * & * & * \end{pmatrix}$ .

Он содержит 36 вариантов. Основное уравнение запишется в виде:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1 \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2 \\ x_1 + y_3 = X_1 + Y_3 \end{cases}, \begin{cases} x_2 + y_1 = X_2 + Y_{\alpha(1)} \\ x_2 + y_2 = X_2 + Y_{\alpha(2)} \\ x_2 + y_3 = X_2 + Y_{\alpha(3)} \end{cases}, \begin{cases} x_3 + y_1 = X_3 + Y_{\beta(1)} \\ x_3 + y_2 = X_3 + Y_{\beta(2)} \\ x_3 + y_3 = X_3 + Y_{\beta(3)} \end{cases},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  некоторые подстановки элементов 1,2 и 3.

Складывая уравнения по столбцам, получим

$$3x_1 + y = 3X_1 + Y, \quad 3x_2 + y = 3X_2 + Y, \quad 3x_3 + y = 3X_3 + Y, \quad \text{где } y = \sum_{j=1}^3 y_j, \quad Y = \sum_{j=1}^3 Y_j.$$

Выразим  $X_i = x_i + \frac{y-Y}{3}, \forall i = \overline{1,3}$ . Учитывая замечание о решениях системы (2), мы

можем считать, что  $\frac{y-Y}{3} = 0$ .

Отсюда  $X_i = x_i$  или  $y_i = Y_i = Y_{\alpha(i)} = Y_{\beta(i)}$ . Следовательно,  $A$  и  $A'$  эквивалентны.

Все остальные варианты разбираются единообразно. Продемонстрируем это на слу-

чае, когда матрица имеет вид  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & \circ \\ * & * & 3 \\ \circ & * & \circ \end{pmatrix}$ .

Основное уравнение даёт нам систему:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1 \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2 \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_3 \end{cases}, \begin{cases} x_2 + y_{\alpha(1)} = X_1 + Y_3 \\ x_2 + y_{\alpha(2)} = X_3 + Y_1 \\ x_2 + y_{\alpha(3)} = X_3 + Y_3 \end{cases}, \begin{cases} x_3 + y_{\beta(1)} = X_2 + Y_1 \\ x_3 + y_{\beta(2)} = X_2 + Y_2 \\ x_3 + y_{\beta(3)} = X_3 + Y_2 \end{cases}.$$

Имеется  $3!=6$  вариантов расположения 4,5 и 6 на месте  $\circ$  в  $A'$ , следовательно, возможны следующие подстановки:

	$\alpha(1)$	$\alpha(2)$	$\alpha(3)$
1)	1	2	3
2)	3	1	2
3)	2	3	1

4)	2	1	3
5)	3	2	1
6)	1	3	2

Ограничимся двумя из них:

Вычитая уравнения по столбцам, получим

$$\begin{cases} y_1 - y_2 = Y_1 - Y_2 \\ y_1 - y_3 = X_1 - X_2 + Y_1 - Y_3 \end{cases}, \quad \begin{cases} y_{\alpha(1)} - y_{\alpha(3)} = X_1 - X_3 \\ y_{\alpha(2)} - y_{\alpha(3)} = Y_1 - Y_3 \end{cases}.$$

Учитывая замечание теоремы 1, полагаем  $X_3 = Y_3 = y_3 = 0$ . Отсюда найдём для первой подстановки  $X_1 = y_1$ ,  $Y_1 = y_2$ ,  $Y_2 = 2y_2 - y_1$ ,  $X_2 = y_2$ .

$$\text{Матрица } B' \text{ в аддитивной записи примет вид: } B' = \begin{pmatrix} y_1 + y_2 & 2y_2 & y_1 \\ 2y_2 & 3y_2 - y_1 & y_2 \\ y_2 & 2y_2 - y_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Учитывая условие нормировки  $\sum p_i = \sum q_j = \sum P_i = \sum Q_j = 1$ , введём нормирующий множитель ( $\mu$ ), знаменатель которого есть сумма всех элементов матрицы.

Итак, матрица вероятностей в мультипликативной записи равна

$$B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} e^{y_1+y_2} & e^{2y_2} & e^{y_1} \\ e^{2y_2} & e^{3y_2-y_1} & e^{y_2} \\ e^{y_2} & e^{2y_2-y_1} & 1 \end{pmatrix}.$$

Так как вероятность элементов  $a_{12}$  и  $a_{21}$ ,  $a_{23}$  и  $a_{31}$  в  $A'$  совпадает, следовательно,  $A'$  получается из  $A$  посредством стандартных преобразований. Отсюда  $A$  и  $A'$  эквивалентны.

При рассмотрении случая 3), согласно теореме 1, мы можем положить  $X_3 = Y_3 = y_3 = 0$ , тогда  $X_1 = y_2 - y_1$ ,  $Y_1 = -y_1$ ,  $Y_2 = y_2 - 2y_1$ ,  $X_2 = y_2 - 3y_1$ .

Отсюда, матрица  $B'$  в аддитивной записи примет вид:

$$B' = \begin{pmatrix} y_2 - 2y_1 & 2y_2 - 3y_1 & y_2 - y_1 \\ y_2 - 4y_1 & 2y_2 - 5y_1 & y_2 - 3y_1 \\ -y_1 & y_2 - 2y_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Найдём матрицу вероятностей для одного из шести вариантов расположения 7,8 и 9

на месте \*, например:  $A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 7 & 8 & 3 \\ 6 & 9 & 4 \end{pmatrix}$ . Вычитая уравнения по столбцам в третьей системе

основного уравнения, получим

$$\begin{cases} y_{\beta(1)} - y_{\beta(3)} = X_2 - X_3 + Y_1 - Y_2 \\ y_{\beta(2)} - y_{\beta(3)} = X_2 - X_3 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} y_1 - y_3 = X_2 - X_3 + Y_1 - Y_2 \\ y_2 - y_3 = X_2 - X_3 \end{cases}.$$

Полагая  $X_3 = Y_3 = y_3 = 0$ , из основного уравнения найдём  $y_1 = 0$ . Отсюда  $X_1 = y_2$ ,  $Y_1 = 0$ ,  $Y_2 = y_2$ ,  $X_2 = y_2$ .

Итак, матрица вероятностей в мультипликативной записи равна

$$B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} e^{y_2} & e^{2y_2} & e^{y_2} \\ e^{y_2} & e^{2y_2} & e^{y_2} \\ 1 & e^{y_2} & 1 \end{pmatrix}, \text{ где знаменатель нормирующего множителя } (\mu) \text{ есть сумма всех}$$

элементов матрицы. Исходная матрица вероятностей тогда примет вид:

$$B = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} e^{y_2} & e^{2y_2} & e^{y_2} \\ 1 & e^{y_2} & 1 \\ e^{y_2} & e^{2y_2} & e^{y_2} \end{pmatrix}.$$

Так как вероятность элементов  $a_{13}$ ,  $a_{23}$  и  $a_{32}$ ,  $a_{31}$  и  $a_{33}$  в  $A'$  совпадает, следовательно,  $A'$  получается из  $A$  перестановкой равновозможных выигрышей. Поэтому  $A$  и  $A'$  эквивалентны.

III. Проблема нахождения решений заключается в расстановке элементов множества  $\{b_{ij} | b_{ij} \in B\}$  по строкам и столбцам матрицы так, чтобы ранг последней оказался равным 1 (поскольку строки в матрице вероятностей (B) пропорциональны). Простой перебор требует для  $m \times n$  - игры рассмотрения  $(mn)!$  случаев, что совершенно неприемлемо даже при сравнительно небольших значениях  $m$  и  $n$ . Однако число случаев, подлежащих перебору, можно значительно уменьшить. Для этого надо образовать всевозможные частные элементов  $b_{ij}$  (достаточно, впрочем, взять отношения, большие или равные 1). Среди них должны быть достаточно длинные серии одинаковых, которые встречаются не менее трёх раз, например, отношения соответственных элементов каких-либо строк (столбцов) в предполагаемом решении. В качестве иллюстрации приведём следующий пример для  $3 \times 3$  - игры.

Пусть известны вероятности появления выигрышей, а также сами выигрыши.

Таблица

Выигрыши и частоты появления выигрыша

Выигрыши	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Частота появления выигрыша	0,3125	0,0625	0,0833	0,04167	0,02083	0,10417	0,04167	0,2083	0,125

Составим всевозможные частные, среди них достаточно взять отношения, большие или равные 1, которые встречаются не менее трёх раз.

- 1)  $\frac{0,3125}{0,0625} = \frac{0,10417}{0,02083} = \frac{0,2083}{0,04167} = 5;$
- 2)  $\frac{0,3125}{0,10417} = \frac{0,0625}{0,02083} = \frac{0,125}{0,04167} = 3;$
- 3)  $\frac{0,3125}{0,2083} = \frac{0,0625}{0,04167} = \frac{0,125}{0,0833} = 1,5;$
- 4)  $\frac{0,3125}{0,125} = \frac{0,10417}{0,04167} = \frac{0,2083}{0,0833} = 2,5;$
- 5)  $\frac{0,0833}{0,04167} = \frac{0,04167}{0,02083} = \frac{0,2083}{0,10417} = \frac{0,125}{0,0625} = 2.$

Выберем одно из них, допустим отношение 1)  $\frac{0,3125}{0,0625} = \frac{0,10417}{0,02083} = \frac{0,2083}{0,04167} = 5$ . Есте-

ственно предположить, что числители данных отношений есть вероятности появления выигрышей, стоящие в первой строке матрицы вероятностей  $B$ , тогда знаменатели можно считать за элементы второй строки:

$$B = \begin{pmatrix} 0,3125 & 0,10417 & 0,2083 \\ 0,0625 & 0,02083 & 0,04167 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Для восстановления третьей строки надо выявить отношения, в которых либо числитель, либо знаменатель совпадает с элементами первой или второй строки. Это отношение 5). Отсюда элементами третьей строки будут числители этих отношений и матрица вероятностей  $B$  примет вид:

$$B = \begin{pmatrix} 0,3125 & 0,10417 & 0,2083 \\ 0,0625 & 0,02083 & 0,04167 \\ 0,125 & 0,04167 & 0,0833 \end{pmatrix}.$$

По матрице  $B$  восстановим вероятности выбора стратегий соответственно первым и вторым игроком  $P = \left\{ \frac{5}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4} \right\}$  и  $Q = \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{6}, \frac{1}{3} \right\}$ , и соответствующие ей платёжные матрицы:

$$A = \begin{pmatrix} -2 & 3 & 5 \\ -1 & 2 & 1 \\ 6 & 4 & 0 \end{pmatrix} \text{ и } A' = \begin{pmatrix} -2 & 3 & 5 \\ -1 & 2 & 4 \\ 6 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из данного примера видно, что матрицы  $A$  и  $A'$  эквивалентны, так как  $A'$  получается из  $A$  перестановкой равновозможных выигрышей

В заключение отметим, что автором были также проведены вычисления (хотя и неполные для антагонистической  $n \times n$ - игры с  $n > 3$ ). Оказалось, что и там решения получаются из фиксированного стандартными преобразованиями. Поэтому можно выдвинуть следующую гипотезу, что аналогичный результат верен в общем случае  $n \times n$  при  $n > 3$  игры (выигрыши по-прежнему предполагаются различными).

#### Библиографический список

1. **Верещагина, Е.И.** О единственности решения обратной задачи антагонистической игры с различными элементами платёжной матрицы // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ. – Н. Новгород, 2010. №1 (86). С. 346–352.
2. **Петросян, Л.А.** Теория игр / Л.А. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.А. Семина. – М.: Высш. шк., 1998. – 304 с.

Дата поступления  
в редакцию 25. 01.2012

**E.I. Vereshagina**

#### THE INVERSE PROBLEM TWO PLAYERS ANTAGONISTIC 3×3 – GAME WITH DIFFERENT ELEMENTS OF PAYOFF MATRIX

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

In this paper the inverse problem two players antagonistic - game is considered. The inverse problem consists in the reconstruction of the payoff matrix and the probabilities of the mixed-strategies of players if it is known the win probabilities. It is suggested that the payoff matrix has different elements. It is not necessary for the game to be optimal. The case two player antagonistic - game is analyzed. The method of the all solutions finding is given. It is shown that all solutions of the inverse problem can be received from one of them by means of substitutions of rows and columns. Also it is possible to receive solutions of the inverse problem by substitution of payoffs that have equal probabilities. In conclusion the conjecture is declared that the all solutions for  $n=m$  ( $n>3$ ) can be find as in the case  $n=3$ . In the case  $n \neq m$  conjecture is not corrected.

*Key words:* antagonistic game, inverse problem, payoff matrix, win probability.

УДК 519.3

В.А. Игошин

## КЛЕТочНАЯ СТРУКТУРА ПСЕВДОРИМАНОВА ПРОСТРАНСТВА С ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ОДНОМЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследуются псевдоримановы пространства, допускающие геодезические поля одномерных направлений с особыми точками. При некоторых предположениях доказано, что такие многообразия имеют клеточную структуру, сложность которой – в отличие от топологических клеток – сосредоточена уже в самой клетке. Глобальное строение изучаемых пространств напоминает, в частности, двойную спираль ДНК; при других условиях возможно глобальное устройство пространства в виде «параллельных» Вселенных.

*Ключевые слова:* псевдориманово пространство, геодезическое поле, особые точки, клетки, тороидные и цилиндрические пространства.

Геодезическое поле  $m$ -мерных направлений, или – на более современном языке – геодезическое распределение  $\Delta$  размерности  $m$  на аффинно-связном многообразии  $A^n$  введено в работах [1 и 2] следующим образом. Предположим, что  $\Delta$  полностью интегрируемо и  $\gamma$  – произвольная геодезическая (не лежащая на каком-либо интегральном многообразии распределения  $\Delta$ ). Если подмногообразие, полученное объединением интегральных многообразий распределения  $\Delta$ , пересекающих  $\gamma$ , вполне геодезично, то распределение  $\Delta$  называется *геодезическим*. Заметим: 1) наличие особенностей распределения  $\Delta$  не исключено; 2) определение имеет смысл лишь при  $n > m + 1$ . В [1, 2] получен ряд условий, необходимых и достаточных для геодезичности распределения. В частности, в случае (псевдо)риманова многообразия  $(M, dS^2)$  дополнительное по ортогональности к (невыврожденному) геодезическому распределению  $\Delta$  распределение  $\Delta^\perp$  также вполне интегрируемо, и в классе «адаптированных» координатных систем:

$$dS^2 = q_{ab}(x^c) dx^a dx^b + e^{2T(x^c)} \Pi_{ij}(x^k) dx^i dx^j, \quad (1)$$

где  $a, b, c = 1, \dots, m$ ;  $i, j, k = m+1, \dots, n$ ;  $x^c$  и  $x^k$  – координаты на интегральных многообразиях распределения  $\Delta$  и  $\Delta^\perp$  соответственно;  $T$  – некоторая функция, а  $dS_0^2 = \Pi_{ij} dx^i dx^j$  – некоторая  $(n - m)$ -мерная метрика. Наоборот, касательные пространства к координатным многообразиям  $x^i = \text{const}$  в случае (1) образуют геодезическое распределение. Метрика (1) названа в [3] *полуприводимой*. Если  $dS_0^2$  постоянной кривизны, то мы получаем обобщенные субпроективные пространства В.Ф. Кагана [4].

Трудно перечислить геометрические построения, которые так или иначе приводят к геодезическому распределению. Наиболее значительным примером подобного рода является тот факт, что проблема геодезического отображения Т. Леви-Чивиты [5] в случае отображения на пространство меньшей размерности полностью решается в аффинно-связном и римановом случае теорией геодезического поля направлений (см. [6], где это доказано неявно – т.е. без указания на связь с проблемой Т. Леви-Чивиты). Другой пример: пространство-время Шварцшильда в общей теории относительности (ОТО) допускает двухмерное геодезическое распределение, и метрика имеет вид (1) при  $m = 2$  и  $dS_0^2$  – постоянной положительной кривизны.

В случае одномерного геодезического распределения метрика принимает вид (1) при  $m = 1$ . Если к тому же  $dS_0^2$  постоянной кривизны, то этот случай известен в ОТО под назва-



нием метрики Робертсона-Уокера. К нему принадлежит, в частности, метрика Фридмана расширяющейся Вселенной.

Назовем далее точку  $p$  пространства  $(M, dS^2)$  *точкой Шура*, если любая двумерная поверхность, геодезическая в  $p$  (см. [7]), является вполне геодезической. Э. Картан приводит «замечательную теорему» Ф. Шура, относящуюся к свойствам таких точек [7, с. 117 и 8]. Вполне очевидно, что геодезические, проходящие через точку Шура, являются при  $\dim M > 2$  траекториями одномерного геодезического распределения, причем сама точка Шура является его особой точкой. Можно показать [7], что точка Шура совпадает с точкой свободной подвижности – точкой, которую оставляет неподвижной группа движений (в некоторой ее окрестности), зависящая от  $n(n-1)/2$  параметров ( $n = \dim M$ ). Если эта группа является подгруппой группы движений (аналитического) пространства  $M$  в целом, то такая точка названа в [9, 10] *полюсом* (риманова  $M$ ). При этом предположено, что полная группа движений  $M$  также зависит от  $n(n-1)/2$  параметров. Таким образом, «полюсное» многообразие допускает одномерное геодезическое распределение (см. также лемму 2 из [10]).

Обозначим через  $\nabla$  связность Т. Леви-Чивиты метрики  $dS^2$ . Поле одномерных направлений на  $M$  будет (см. [1, 2]) геодезическим (коротко –  $\Gamma$ -полем), если и только если произвольная точка  $p \in M$  обладает окрестностью  $V$ , в пределах которой это поле может быть задано векторным полем  $A$ , удовлетворяющим условию

$$\nabla_X A = \Phi X \quad (2)$$

при любом векторном поле  $X$  и некоторой функции  $\Phi$  на  $V$ .

Все рассматриваемые в работе объекты предполагаются гладкими.

Заметим, что при  $\dim M = 2$ , когда геометрическое определение  $\Gamma$ -поля теряет смысл, под  $\Gamma$ -полем мы понимаем поле, удовлетворяющее условию (2).

Из (2) в случае односвязности  $V$  следует, что  $A = \text{grad } \rho$  для некоторой функции  $\rho : V \rightarrow R$ , и (2) принимает вид

$$\nabla_X \text{grad } \rho = \Phi X. \quad (3)$$

Особые точки  $\Gamma$ -поля  $A$ , определяемого градиентом функции  $\rho : M \rightarrow R$ , в собственно римановом случае исследовались в [11, 13], где такое скалярное поле  $\rho$  и векторное  $A = \text{grad } \rho$  названы в связи с [14] *конциркулярными*. Особенности оказались точками Шура – точками свободной подвижности – полюсами. При  $\Phi = -k\rho + c$  ( $k$  и  $c$  – константы) уравнение (3) исследовалось Вейнгартеном (см., например, [15]).

Предположим далее: 1)  $\Gamma$ -поле глобально (на всем  $M$ ) определено векторным полем, которое, как и само  $\Gamma$ -поле, договоримся обозначать буквой  $A$ ; 2)  $\Gamma$ -поле  $A$  в целом (на всем  $M$ ) удовлетворяет условию

$$\nabla_X A = \Phi X. \quad (4)$$

Таким образом, мы будем иметь дело с многозначным скалярным конциркулярным полем.

Настоящее исследование представляет собой достаточно подробное изложение результатов, анонсированных в кратких сообщениях [16, 17]. Доказательства ряда результатов не приводятся из-за ограничений на объем статьи.

В целом работа наиболее близка к исследованиям А.С. Солодовникова и Н.Р. Камышанского по аналитическим псевдоримановым пространствам с полюсами (см. [9, 10]). При наличии  $\Gamma$ -поля с особыми точками и некоторых дополнительных предположений – наиболее существенным из которых является полюсный характер особенностей – далее исследуется глобальное строение (гладких) псевдоримановых пространств. Доказано, что такие пространства составлены из конгруэнтных «клеток». В отличие от известной топологической конструкции сложность структуры, включая и топологию, сосредоточена здесь и в самой клетке. Получена частичная классификация клеточных многообразий.

### 1. Особые точки геодезического поля

#### 1.1. Полярные координаты. Метрика псевдориманова пространства с $\Gamma$ -полем (в нормальной окрестности особой точки)

Пусть  $(M, dS^2)$  – псевдориманово пространство. Фиксируем ортонормированный репер  $e_i$  касательного пространства  $M_p$  в какой-либо точке  $p \in M$  ( $\langle e_i, e_j \rangle = \varepsilon_i \delta_{ij}$ , где  $\varepsilon_i = 1$  при  $i = 1, \dots, d$ ;  $\varepsilon_i = -1$  при  $i = d + 1, \dots, n = \dim M$ ). Этот репер индуцирует нормальные координаты  $a^i$  в любой нормальной окрестности  $V(p)$  точки  $p$ . Будем далее отождествлять  $V(p)$  с соответствующей ей по диффеоморфизму  $\exp|$  нормальной окрестностью из  $M_p$ . «Изотропный конус»  $\text{Conp} \stackrel{\text{def}}{=} \{a \equiv (a^i) \in V(p) : \langle a, a \rangle = 0\}$  точки  $p$  вместе с двумя открытыми множествами  $V_\varepsilon(p) \stackrel{\text{def}}{=} \{a \in V(p) : \varepsilon \langle a, a \rangle = 0\}$  образует разбиение окрестности  $V(p)$ :  $V(p) = V_{+1}(p) \cup \text{Conp} \cup V_{-1}(p)$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ).

Пусть  $Q$  – (открытое) множество точек  $(a^* = (a^{*i}), t) \in R^{n+1}$  ( $a^* \in R^n \equiv M_p, t \in R$ ), для которых  $E(a^*, t) \stackrel{\text{def}}{=} a^* t \in V(p)$ . Обозначим через  $\Xi_\varepsilon$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ) « $\varepsilon$ -псевдосферу» в  $M_p$ , т.е. подмногообразие, определенное уравнением  $\langle a^*, a^* \rangle = \varepsilon$ . Положим  $Q_\varepsilon \stackrel{\text{def}}{=} \{(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon) \in Q : a_\varepsilon^* \in \Xi_\varepsilon, t_\varepsilon > 0\}$ . Сужение отображения  $E$  на  $Q_\varepsilon$  является диффеоморфизмом  $Q_\varepsilon$  на  $V_\varepsilon(p)$ . В связи с этим координаты  $a_\varepsilon^{*i}, t_\varepsilon$  точки  $(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon) \in Q_\varepsilon$  называются далее *полярными координатами точки*  $a_\varepsilon = (a_\varepsilon^i) = \Xi_\varepsilon(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon) \in V_\varepsilon(p)$ .

Пусть  $p$  – особая точка  $\Gamma$ -поля  $A$  и  $a_\varepsilon^* \in \Xi_\varepsilon$ . Обозначим через  $x_\varepsilon(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon)$  отнесенную к лонгальному параметру  $t_\varepsilon$  геодезическую с начальным значением  $(p, a_\varepsilon^*)$ ;  $a_\varepsilon^i = a^{*i} t_\varepsilon$  – ее уравнение в пределах  $V_\varepsilon(p)$ . Равенство

$$\rho_\varepsilon(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon) = \int_0^{t_\varepsilon} \langle A(x_\varepsilon(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon)), dx_\varepsilon/dt_\varepsilon \rangle dt_\varepsilon + c \tag{5}$$

определяет некоторую функцию переменных  $a_\varepsilon^*$  и  $t_\varepsilon$ , которая при надлежащем выборе константы  $c$  является выражением в полярных координатах на  $V_\varepsilon(p)$  функции  $\rho$  из соотношения (3), заданной на односвязной области  $V(p)$  ( $\text{grad} \rho = A|_{V(p)}$ ):

$$\rho_\varepsilon(a_\varepsilon^i) = p(a^i)|_{V_\varepsilon(p)} = p_\varepsilon(a_\varepsilon^*, t_\varepsilon). \tag{6}$$

Кривую в псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$  назовем (см. также [9, 10]): *плюс-кривой*, если вдоль нее  $dS^2 > 0$ ; *минус-кривой*, если  $dS^2 < 0$ ; *изотропной*, если  $dS^2 = 0$ .

Вдоль любой кривой  $x(t)$  на  $V(p)$  имеем:

$$dp/dt = \langle \text{grad} \rho, dx/dt \rangle. \tag{7}$$

Для траектории  $x(t)$  поля  $\text{grad} \rho$ , отнесенной к лонгальному параметру  $t$ , отсюда получаем:

$$d^2 \rho/dt^2 = \varepsilon \Phi, \tag{8}$$

где  $\varepsilon = 1$  для плюс-траекторий;  $\varepsilon = -1$  для минус-траекторий и  $\varepsilon = 0$  для изотропных.

Точку  $p$  псевдориманова пространства  $(M, dS^2)$  мы называем *полюсом*, если любое движение псевдоевклидова пространства  $(M_p, dS_p^2)$  является дифференциалом некоторой изометрии пространства  $(M, dS^2)$ .

Это определение полностью согласуется с определением из [9, 10].

Всюду далее считаем выполненным следующее условие:

**S<sub>1</sub>.** Каждая особая точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  в пространстве  $(M, dS^2)$  является полюсом; причем в пределах любой нормальной окрестности  $V(p)$  своей особой точки  $p$   $\Gamma$ -поле  $A$  совпадает с  $\Gamma$ -полем, ортогональным орбитам группы движений  $(M, dS^2)$ , оставляющих точку  $p$  на месте.

**Замечание.** На  $V_\varepsilon(p)$  орбиты упомянутой группы определяются уравнением  $t_\varepsilon = \text{const}$ .

Из  $S_1$  следует, что сужение  $dS_\varepsilon^2$  метрики  $dS^2$  на  $V_\varepsilon(p)$  имеет в полярных координатах вид:

$$dS_\varepsilon^2 = \varepsilon dt_\varepsilon^2 + f_\varepsilon(t_\varepsilon) d\theta_\varepsilon^2, \quad (9)$$

где  $f_\varepsilon$  – четная функция,  $d\theta_\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i (da_\varepsilon^{*i})^2$  – метрика на « $\varepsilon$ -псевдосфере»  $\Xi_\varepsilon$ . Сопоставляя кристоффели, полученные, с одной стороны, через тензор формы  $dS_\varepsilon^2$  и, с другой, из условия (3), находим, что  $f_\varepsilon = c^2 (dp_\varepsilon/dt_\varepsilon)^2$  ( $c = \text{const}$ ). Далее, сравнивая коэффициенты Тейлора функций  $f_\varepsilon = c^2 (dp_\varepsilon/dt_\varepsilon)^2$  и замечая (аналогично тому, как это сделано, например, в [9, 10]), что коэффициент при  $t^2$  в формуле Тейлора для  $f_\varepsilon$  равен 1, мы приходим, учитывая (8), к выводу:  $c^2 \Phi^2(p) = 1$ . Таким образом,

$$dS_\varepsilon^2 = \varepsilon dt_\varepsilon^2 + \frac{1}{\Phi^2(p)} (dp_\varepsilon/dt_\varepsilon)^2 d\theta_\varepsilon^2. \quad (10)$$

Попутно установлено, что

$$\Phi(p) \neq 0 \quad (11)$$

для каждой особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля.

## 1.2. Зона особой точки $\Gamma$ -поля

Если  $\delta^i$  ( $i=1, \dots, n = \dim M$ ) – локальные координаты в окрестности особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$ , то из (4) следует:  $\partial A^i / \partial x_p^j = \Phi(p) \delta_j^i$ , что делает очевидным (см. (11))

**Предложение 1.** *Особые точки  $\Gamma$ -поля изолированы.*

Линеаризованное в окрестности своей особой точки  $p$  уравнение  $dx/dt = A(x)$  имеет вид  $dx^i/dt = \Phi(p)x^i$ . С помощью теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости доказывается предложение 2.

**Предложение 2.** *Каждая особая точка  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  является асимптотически устойчивым положением равновесия (при  $\tau \rightarrow +(-)\infty$ , если  $\Phi(p) < (>)0$ ).*

Рассматривая (4) вдоль траекторий  $x(\tau)$  поля  $A$ , т.е. полагая  $X = A(x(\tau)) = dx/d\tau$ , получаем третье предложение.

**Предложение 3.** *Каждая траектория  $x(\tau)$   $\Gamma$ -поля  $A$  в пространстве  $(M, dS^2)$  является также геодезической метрики  $dS^2$ .*

Это делает понятным определение: пространство  $(M, dS^2)$  с  $\Gamma$ -полем  $A$  назовем  $A$ -полным, если неограниченно продолжаются геодезические, определяемые траекториями  $A$ .

Предложения 2 и 3 приводят к теореме 1.

**Теорема 1.** Пусть  $p$  – особая точка  $\Gamma$ -поля  $A$  в псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$ . Тогда система траекторий  $A$ , заполняющих произвольную проколотую (без  $p$ ) нормальную окрестность  $V$  точки  $p$  совпадает с совокупностью лежащих в  $V$  геодезических метрики  $dS^2$ , входящих в  $p$ .

Назовем зоной особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  в пространстве  $(M, dS^2)$  и обозначим через  $Z(p)$  множество точек всех тех траекторий  $A$ , для каждой из которых  $p$  является предельной точкой.

Из предложения 2, теоремы 1 и гладкости  $\Gamma$ -поля  $A$  выводится лемма 1.

**Лемма 1.** Зона  $Z(p)$  особой точки  $p$  является открытым и линейно связным в  $M$  множеством, содержащим любую нормальную окрестность точки  $p$ .

Имеет место также лемма 2.

**Лемма 2.** В зоне  $Z(p)$  особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  в псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$  экспоненциальное отображение  $\exp_p$  метрики  $dS^2$  не имеет критических значений.

Непосредственным следствием лемм 1 и 2 является теорема 2.

**Теорема 2.** Зона  $Z(p)$  особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  на многообразии  $(M, dS^2)$  является максимальной нормальной окрестностью точки  $p$ .

Эта теорема позволяет все относящиеся к окрестности  $V(p)$  переформулировать для  $Z(p)$  простой заменой  $V$  на  $Z$ .

Далее из условия (3) следует, что  $\text{grad } \Phi = \sigma \text{ grad } \rho$ , и теорема 1 (вместе с (7)) показывает, что имеет место лемма 3.

**Лемма 3.** Каждая гиперповерхность, ортогональная  $\Gamma$ -полю  $A = \text{grad } \rho$ , является множеством уровня функции  $\Phi$  (и, равным образом,  $\rho$ ). В частности, «изотропный конус»  $\text{Соп } p$  произвольной особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  является связной частью некоторого множества уровня функции  $\Phi$ .

Лемма 3 приводит к предложениям 4 и 5.

**Предложение 4.** На изотропных геодезических, проходящих через особую точку  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$ , нет других особых точек.

**Предложение 5.** «Изотропный конус»  $\text{Соп } p$  особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  в  $A$ -полном псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$  является гомеоморфным образом при экспоненциальном отображении изотропного конуса касательного псевдоевклидова пространства  $(M_p, dS_p^2)$ .

### 1.3. Необходимые условия особой точки $\Gamma$ -поля

Функция  $\rho_\varepsilon$  из (5) в пределах связной компоненты « $\varepsilon$ -псевдосферы»  $\Xi_\varepsilon$  от  $a_\varepsilon^* \in \Xi_\varepsilon$  не зависит, поскольку  $t_\varepsilon = \text{const}$  – уравнение поверхностей уровня для  $\rho_\varepsilon$ . Ясно, что  $d\rho_\varepsilon / dt_\varepsilon$  – нечетная функция лонгального параметра  $t_\varepsilon$ , так как  $(d\rho_\varepsilon / dt_\varepsilon) = 0$  и  $(d\rho_\varepsilon^2 / dt_\varepsilon^2)|_0 = \varepsilon\Phi(p) \neq 0$ .

Согласуя нашу терминологию с [9, 10], назовем особые точки  $p$  и  $q$   $\Gamma$ -поля  $A$  (плюс- или минус-) соседними, если они соединены (плюс-, или минус-) геодезическим отрезком, не содержащим других особенностей. Будем различать также четыре типа особых точек  $p$   $\Gamma$ -поля: (I)  $p$  не имеет соседних особенностей; (II)  $p$  имеет плюс-соседнюю особенность, но не имеет

минус-соседней; (II')  $p$  имеет минус-соседнюю особенность, но не имеет плюс-соседней; (III)  $p$  имеет и плюс- и минус-соседнюю особенности.

Обозначая через  $c_\varepsilon$  ближайший справа к  $t_\varepsilon = 0$  нуль функции  $dp_\varepsilon/dt_\varepsilon$ , заметим, что точки  $\pm p_\varepsilon = \tilde{\alpha}_\varepsilon(t_\varepsilon = \pm c_\varepsilon)$  являются особыми точками  $\Gamma$ -поля,  $\varepsilon$ -соседними с  $p = \tilde{\alpha}_\varepsilon(t_\varepsilon = 0)$ . При этом  $c_\varepsilon$  не зависит от геодезической  $\tilde{\alpha}_\varepsilon$  при изменении ее начального вектора  $a_\varepsilon^*$  в пределах  $\Xi_\varepsilon$ . Из  $S_1$  следует, что функция  $\rho_\varepsilon$  четна относительно значений  $t_\varepsilon$ , кратных  $c_\varepsilon$ . Отсюда вытекает, что  $\rho_\varepsilon$  – четная периодическая с периодом  $2c_\varepsilon$  функция, определенная на всей числовой прямой (предполагается, что  $(M, dS^2)$   $A$ -полно).

**Лемма 4.** Пусть  $\rho_\varepsilon(t_\varepsilon) = \sum_{\alpha=0}^k b_{2\alpha}^{(\varepsilon)} t_\varepsilon^{2\alpha} + 0_\varepsilon(t_\varepsilon^{2k})$  – формула Тейлора для гладкой четной функции  $\rho_\varepsilon$  ( $k$  – произвольным образом фиксированное натуральное число). Тогда условия  $b_{2\alpha+1}^{(\varepsilon)} = 0$ ,  $b_{2\alpha}^{(\varepsilon)} = \varepsilon^\alpha b_{2\alpha}$  ( $\alpha = 0, 1, 2, \dots$ ;  $b_{2\alpha}$  – константы, от  $\varepsilon$  не зависящие) необходимы и достаточны для того, чтобы  $\rho_\varepsilon(t_\varepsilon)$  при  $t_\varepsilon^2 = \varepsilon \sum_{i=1}^n \varepsilon_i (a_\varepsilon^i)^2$  сужением на  $Z_\varepsilon(p)$  гладкой функции  $\rho(a^i)$ , заданной на  $Z(p)$ .

Доказательство необходимости проводится индукцией по  $k$ . Достаточность очевидна. Заметим, что в нашем случае ( $\Gamma$ -поле  $A|_{Z(p)} = \text{grad } \rho$ ; см. также (8)):  $b_2^{(\varepsilon)} = \varepsilon b_2 = \frac{1}{2}(d^2\rho_\varepsilon/dt_\varepsilon^2 = (\varepsilon/2)\Phi(p))$ . Таким образом, доказана одна из основных теорем.

**Теорема 3.** Для каждой особой точки  $p$   $\Gamma$ -поля  $A$  в  $A$ -полном псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$  равенством (5) определены на всей числовой прямой такие две функции  $\rho_\varepsilon(t_\varepsilon)$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ), что:

1)  $\rho_\varepsilon$  четные функции;  $dp_\varepsilon/dt_\varepsilon$  обращаются в нуль при тех и лишь при тех значениях  $t_\varepsilon$ , при которых точка  $x_\varepsilon(t_\varepsilon)$  геодезической  $x_\varepsilon$  из (5) является особой точкой  $A$ ;

2) если  $p$  – особая точка типа (i), то  $dp_\varepsilon/dt_\varepsilon = 0$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ) лишь при  $t_\varepsilon = 0$ ; если  $p$  – точка типа (II) (или (II')), то  $dp_\varepsilon/dt_\varepsilon = 0$  также лишь при  $t_\varepsilon = 0$ , а  $p_{-\varepsilon}$  – периодическая функция с некоторым периодом  $2c_{-\varepsilon}$  и  $dp_{-\varepsilon}/dt_{-\varepsilon} = 0$  лишь при  $t_{-\varepsilon} = mc_{-\varepsilon}$  ( $m$  – любое целое), где  $\varepsilon = -1$  в случае типа (II) (или  $\varepsilon = 1$  в случае типа (II')); если  $p$  – точка типа (III), то  $\rho_\varepsilon$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ) – периодическая функция с некоторым периодом  $2c_\varepsilon$  и  $dp_\varepsilon/dt_\varepsilon = 0$  лишь при  $t_\varepsilon = mc_\varepsilon$  ( $m$  – любое целое);

3) коэффициенты Тейлора  $b_\alpha^{(\varepsilon)}$  функции  $\rho_\varepsilon$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ) таковы, что  $b_{2\alpha+1}^{(\varepsilon)} = 0$ , а  $b_{2\alpha}^{(\varepsilon)}$  ( $\alpha = 0, 1, \dots$ ) связаны соотношением  $b_{2\alpha}^{(\varepsilon)} = \varepsilon^\alpha b_{2\alpha}$  (константы  $b_{2\alpha}$  от  $\varepsilon$  не зависят), при этом  $b_0 = \rho_\varepsilon(0)$ ,  $b_2^{(\varepsilon)} = (\varepsilon/2)\Phi(p)$ ;

4) метрика  $dS^2$  в пределах подзоны  $Z_\varepsilon(p)$  имеет вид:

$$dS_\varepsilon^2 = \varepsilon dt_\varepsilon^2 + [(dp_\varepsilon/dt_\varepsilon)^2 / \Phi^2(p)] d\theta_\varepsilon^2,$$

где  $d\theta_\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon (da^{*i})^2$  метрика на « $\varepsilon$ -псевдосфере»  $\Xi_\varepsilon$ .

Эта теорема является собирательным аналогом ряда теорем из [9] и [10].

**Теорема 4.** Пусть  $\rho_\varepsilon : R \rightarrow R$  ( $\varepsilon = \pm 1$ ) – две функции, обладающие указанными в пунктах 1)-3) теоремы 3 свойствами. Тогда существует псевдориманово пространство  $(M, dS^2)$  наперед заданной размерности  $n$  и сигнатуры  $(d, n-d)$  и такая функция  $\rho$  на  $M$ ,

что  $A = \text{grad } \rho$  –  $\Gamma$ -поле на  $M$  с одной особой точкой  $p \in M$ , причем:

- 1)  $M = Z(p)$ ;
- 2)  $\rho_\varepsilon$  совпадает с функциями, определенными равенством (5);
- 3)  $\Gamma$ -поле  $A$  удовлетворяет требованию  $S_1$ .

**Замечание 1.** Речь, разумеется, идет о свойствах, сохраняющих свой смысл в отсутствии  $\Gamma$ -поля  $A$  вместе с пространством  $(M, dS^2)$ .

**Замечание 2.** Говорят, что  $(M, dS^2)$  имеет сигнатуру  $(d, n - d)$ , если в любой точке  $p \in M$  форма  $dS^2$  приводится к нормальному виду, в котором  $d$  коэффициентов равны 1 и  $n - d$  равны  $-1$ .

Псевдориманово пространство  $(M, dS^2)$  теоремы 4 с  $\Gamma$ -полем  $A = \text{grad } \rho$  назовем абстрактной зоной (соответствующей набору однозначно ее определяющих данных).

## 2. Клетка. Клеточное многообразие. Шифр клетки

### 2.1. Соседние особые точки. Формулы стыковки

Пусть  $A$  –  $\Gamma$ -поле в  $A$ -полном псевдоримановом пространстве  $(M, dS^2)$ , удовлетворяющее условию  $S_1$  (см. п. 1). В особой точке  $p_0$   $\Gamma$ -поля  $A$  фиксируем ортонормированный репер  $e_i^0 (i = 1, \dots, n = \dim M)$ , причем  $d$  векторов, включая  $e_i^0$ , единичных, и  $n - d$  векторов, включая  $e_2^0$ , мнимоеединичных:  $\langle e_i^0, e_j^0 \rangle = \varepsilon_i \delta_{ij}$  ( $\varepsilon_i = 1$  для  $d$  значений  $i$ , включая  $i = 1$ ;  $\varepsilon_i = -1$  для  $n - d$  значений  $i$ , включая  $i = 2$ ).

Введем обозначения:  $\rho_{(0,\varepsilon)}(t_{(0,\varepsilon)})$  – периодическая функция из теоремы 3 §1,  $c_{(0,\varepsilon)}$  – ее полупериод,  $\gamma_{e_1^0}(t_{(0,\varepsilon)})$  – отнесенная к лонгальному параметру  $t_{(0,\varepsilon)}$  геодезическая с начальным значением  $(p_0, e_1^0)$ . Плюс-соседнюю для  $p_0$  особенность  $p_{+1} \stackrel{\text{def}}{=} \gamma_{e_1^0}(c_{(0,+1)})$  назовем особенностью справа от  $p_0$ ; аналогично:  $p_{-1} \stackrel{\text{def}}{=} \gamma_{e_2^0}(c_{(0,-1)})$  – особенностью сверху от  $p_0$ .

Обозначая далее через  $e_i^1$  результат параллельного переноса вектора  $e_i^0$  в точку  $p_{+1}$  вдоль геодезической  $\gamma_{e_1^0}$ , будем писать:  $e_i^1 \parallel \gamma_{e_1^0} p_{+1} e_i^0$ . Согласно результатам п. 1, определены зоны  $Z(p_0)$  и  $Z(p_{+1})$ , нормальные координаты  $a^i$  на  $Z(p_0)$  и  $a^{i'}$  на  $Z(p_{+1})$  соответствующие реперам  $e_i^0$  и  $e_i^1$ . Метрика  $dS^2$  в пределах  $Z_\varepsilon(p_0)$  и  $Z_\varepsilon(p_{+1})$  имеет (в понятных обозначениях) вид:

$$dS_{(0,\varepsilon)}^2 = \varepsilon dt_{(0,\varepsilon)}^2 + \frac{1}{\Phi^2(p_0)} (dp_{(0,\varepsilon)} / dt_{(0,\varepsilon)})^2 d\theta_{(0,\varepsilon)}^2 \quad (\text{на } Z_\varepsilon(p_0)),$$

$$dS_{(+1,\varepsilon)}^2 = \varepsilon dt_{(+1,\varepsilon)}^2 + \frac{1}{\Phi^2(p_{+1})} (dp_{(+1,\varepsilon)} / dt_{(+1,\varepsilon)})^2 d\theta_{(0,\varepsilon)}^2 \quad (\text{на } Z_\varepsilon(p_{+1})).$$

Для полярных  $t_{(0,+1)}$  и  $t_{(+1,+1)}$  одной и той же точки  $p \in Z_{+1}(p_0) \cap Z_{+1}(p_{+1})$  имеем:

$$t_{(0,+1)} + t_{(+1,+1)} = c_{(0,+1)} = c_{(+1,+1)}. \text{ Отсюда: } (dp_{(0,+1)} / dt_{(0,+1)})(t) = (dp_{(+1,+1)} / dt_{(+1,+1)})(c_{(0,+1)} - t).$$

Следовательно,  $\frac{1}{\Phi^2(p_0)} d\theta_{(0,+1)}^2 = \frac{1}{\Phi^2(p_{+1})} d\theta_{(+1,+1)}^2$  для  $p \in Z_{+1}(p_0) \cap Z_{+1}(p_{+1})$ . Та-

ким образом, имеем диффеоморфизм  $\psi^+ : \Xi_{(0,+1)} \rightarrow \Xi_{(+1,+1)} : a^* \rightarrow a_1^* = \psi^+(a^*) \stackrel{def}{=} \frac{d}{dt_{(0,+1)}} \gamma_{a^*|_{p_{+1}}}$ , который является гомотетией:  $d\theta_{(+1,+1)}^2 = \lambda^2 d\theta_{(+1,0)}^2$  ( $\lambda = \Phi(p_{+1})/\Phi(p_0)$ ).

Гомотетия  $\psi^+$  переводит геодезические в геодезические. С другой стороны, геодезическими на  $\Xi_{+1}$  являются сечения  $\Xi_{+1}$  двумерными плоскостями (проходящими через нулевые элементы). Итак,  $\psi^+$  «переводит» двумерные плоскости (лежащие в  $Z_{+1}(p_0)$ ) в двумерные плоскости (лежащие в  $Z_{+1}(p_{+1})$ ).

Векторы  $e_1^0$  и  $e_2^0$  определяют вполне геодезический двумерный «листок» ( $e_1^0, e_2^0$ ), лежащий в  $Z(p_0)$ . В  $Z(p_{+1})$  также имеем вполне геодезический «листок» ( $e_1^1, e_2^1$ ). Эти два листка совпадают на  $Z_{+1}(p_0) \cap Z_{+1}(p_{+1})$ .

Пусть  $a^* \in \Xi_{(0,+1)}$  и точка  $p(t_{(0,+1)}) \stackrel{def}{=} \gamma_{a^*}(t_{(0,+1)}) \in Z_{+1}(p_0) \cap Z_{+1}(p_{+1})$  ( $0 < t_{(0,+1)} < c_{(0,+1)}$ ). Тогда  $p(t_{(0,+1)})$  обладает двумя наборами нормальных координат:  $a^i$  – относительно репера  $e_i^0$  и  $a^{i'}$  относительно  $e_i^1$ . Если  $a^*$  лежит, например, в плоскости  $e_1^0, e_2^0$  и  $p(t_{(0,+1)}) = \exp_{p_0} a$ , то  $a = t_{(0,+1)} a^*$ . Если же  $p(t_{(0,+1)}) = \exp_{p_{+1}} a'$  и  $a_1^* = \psi^+(a^*)$ , то  $a' = t_{(+1,+1)} a_1$  ( $t_{(+1,+1)} > 0$ ). Нужно далее различать два случая:  $1^0$ .  $\lambda (= \Phi(p_{+1})/\Phi(p_0)) = -1$ ,  $2^0$ .  $\lambda \neq -1$ . Первый всегда имеет место при  $d > 1$ , второй же возможен лишь при  $d = 1$  ( $d$  – число единичных векторов репера  $e_i^0$ ).

Рассмотрим сначала  $1^0$ . Обозначим нормальные координаты на  $Z(p_{+1})$ , соответствующие реперу  $(-e_1^1, e_2^1, \dots, e_n^1)$  через  $a^{i''}$  ( $a^{1''} = a^{1'}$ ,  $a^{i''} = a^{i'}$  для  $i = 2, \dots, n$ ). Тогда  $a_1^{*i} = a^{*i}$ , где  $a_1^{*i}$  – компоненты  $a_1^*$  относительно  $(-e_1^1, e_2^1, \dots, e_n^1)$ . Получаем:

$$a^{i''} = \frac{t_{(+1,+1)}}{t_{(0,+1)}} a^i = \left( \frac{c_{(0,+1)}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j (a^j)^2}} - 1 \right) a^i \quad (A_I^+)$$

Таковы переходные функции на пересечении  $Z_{+1}(p_0) \cap Z_{+1}(p_{+1})$  для построенных ранее карт  $(Z(p_0), a^i)$  и  $(Z(p_{+1}), a^{i''})$  в случае  $1^0$ .

Аналогично выглядят функции перехода на пересечении  $Z_{-1}(p_0) \cap Z_{-1}(p_{-1})$  для очевидным образом строящихся карт  $(Z(p_0), a^i)$  и  $(Z(p_{-1}), a^{i'})$  в случае  $1^0$  (т.е. при  $\Phi(p_0) = -\Phi(p_{-1})$ ). Это всегда имеет место при  $n - d > 1$ . Их мы не выписываем, но присваиваем им обозначение  $(A_I^-)$ . Формулы  $(A_I^+)$  и  $(A_I^-)$  мы называем формулами стыковки (в случае  $1^0$ ). В случае  $2^0$  функции перехода задаются (формулами стыковки):

$$\left. \begin{aligned} a^{1''} &= \left( c_{(0,+1)} - t_{(0,+1)} \right) ch\lambda\alpha \\ a^{i''} &= \left( \frac{c_{(0,+1)}}{t_{(0,+1)}} - 1 \right) \frac{a^i}{sha} sh\lambda\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (A_2^+)$$

где  $i'' = 2, \dots, n$ ;  $t_{(0,+1)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i (a^i)^2}$ ,  $\alpha = \text{Arch} \frac{a^1}{t_{(0,+1)}}$ .

Для минус-соседних особенностей  $p_0$  и  $(p_{-1})$  в случае  $2^0$  ( $\lambda = \Phi(p_0)/\Phi(p_{-1}) \neq -1$ ) функции перехода задаются аналогичными формулами ( $A_{-2}$ ). Этот случай возможен только при  $n - d = 1$ .

### 2.2. S-многообразие. S-движения

Пусть  $p_0$  и  $p^*$  – особенности  $\Gamma$ -поля  $A$ . Если  $Z(p_0) \cap Z(p^*) \neq \emptyset$ , то, как следует из изложенного,  $p_0$  и  $p^*$  – (плюс- или минус-) соседние особенности.

Рассмотрим множество, являющееся объединением зон всех особенностей. Связную компоненту этого (открытого) подмногообразия в  $M$  обозначим через  $M_0$  и назовем S-многообразием ( $M_0$  открыто в  $M$ ). Пусть  $p_0 \in M_0$ ; выделим множество  $\{p^*\}$  «достижимых» особенностей  $p^*$  требованием: каждая точка  $p^*$  может быть соединена с  $p_0$  ломаной геодезической  $p_0 p_1 \dots p_{k-1} p^*$  и где  $p_\alpha$  и  $p_{\alpha+1}$  ( $\alpha = 0, 1, \dots, k-1$ ;  $p_k = p^*$ ) – соседние особенности. «Накромем» все  $p^*$  зонами  $Z(p^*)$ . Получим открытое  $M_0^* \subset M_0$ . Пусть  $p \in FrM_0^*$  в  $M_0$ , тогда  $p \in Z(p^{**})$  при некотором  $p^{**} \in M_0$  и  $Z(p^{**}) \cap Z(p^*) \neq \emptyset$  для некоторого  $p^* \in M_0^*$ . Из изложенного следует, что  $p^{**}$  и (вместе с ней)  $p \in M_0^*$ . Итак, доказаны предложения 1 и 2.

**Предложение 1.** Каждая особенность S-многообразия достижима.

**Предложение 2.** Пусть два движения  $\phi$  и  $\phi^*$  S-многообразия  $M_0$  совпадают на открытом множестве некоторой зоны  $Z(p^*)$  ( $p^* \in M_0$ ). Тогда  $\phi = \phi^*$ .

В самом деле,  $\phi(\phi^*)^{-1} = id$  на этом открытом множестве. Соединяя это множество геодезическими с точкой  $p^*$ , мы приходим к выводу, что  $\phi(\phi^*)^{-1} = id$  на всей зоне  $Z(p^*)$ . Из предложения 1 теперь следует, что  $\phi(\phi^*)^{-1} = id$  на всем  $M_0$ .

Определим далее S-движения S-многообразия. Пусть  $p_0, p_{+1}$  и  $q$  – особенности, причем  $p_{+1}$  – справа от  $p_0$ ,  $q$  – справа от  $p_{+1}$ . Если  $\phi_0 = \text{sym}(p_0, e_1^0)$  – симметрия  $M_0$  (как мы будем говорить) относительно  $(p_0, e_1^0): \phi_0(e_1^0) = e_1^0, \phi_0(e_i^0) = e_i^0$  для  $i = 2, \dots, n$ ;  $\phi_1 = \text{sym}(p_{+1}, e_1^1)$  – симметрия относительно  $(p_{+1}, e_1^1)$ , то имеем движение  $S^+ \stackrel{\text{def}}{=} \phi_1 \phi_0: M_0 \rightarrow M_0$ . Ясно, что  $S^+(p_0) = q$ . Как следует из формул стыковки  $A_{1(2)}^+: S_*^+ e_i^0 = e_i^q$ . Поэтому  $S^+$  в соответствующих нормальных координатах  $a^i$  на  $Z(p_0)$  и  $b^i$  на  $Z(q)$  имеет вид:  $b^i = a^i$ .

С другой стороны, если  $e_i^q$  – ортонормированный репер в  $q$ , полученный парал-



лельным переносом вдоль геодезической  $\gamma_{e_i^0}$  репера  $e_i^0$  и  $a^* = a^{*i} e_i^0 \in \Xi_{(0,+1)}$ , причем плюс-геодезическая  $\gamma_{a^*}$  проходит через  $q(\gamma_{a^*}(2c_{(0,+1)}) = q)$ , то  $(b^* \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{dt} \gamma_{a^*}(2c_{(0,+1)})) = (\|\gamma_{a^*}\|_q a$  и  $b^{*i} = a^{*i} (b^* = b^{*i} e_i^q)$

Тем самым (с учетом предложения 2) доказано следующее предложение.

**Предложение 3.** Движение  $S^+$  оставляет инвариантной любую геодезическую  $\gamma_{a^*}$  и, следовательно, не зависит от выбора  $e_i^0$ . Кроме того,  $S^+ = id$  в том и только в том случае, когда  $(q =) S^+(p_0) = p_0$ .

Можно показать, что при  $S^+(p_0) = p_0$  все плюс-геодезические точки  $p_0$  периодические.

В силу предложения 3 движение  $S^+$  однозначно определено упорядоченной парой плюс-соседних особенностей  $p_0$  и  $p_{+1}$ ; таким образом,  $S^+ = S_{p_0 p_{+1}}^+$ . Пара тех же особенностей, но взятая в другом порядке  $(p_{+1} p_0)$ , определяет движение  $S_{p_{+1} p_0}^+ = (S_{p_0 p_{+1}}^+)^{-1}$ .

Таким образом, каждая неупорядоченная пара плюс-соседних особенностей  $p_0, p_{+1}$  определяет пару взаимно обратных движений  $S_{p_0 p_{+1}}^+$  и  $S_{p_{+1} p_0}^+$

Аналогично каждая неупорядоченная пара минус-соседних особенностей  $p_0, p_{-1}$  определяет пару взаимно обратных движений  $(S_{p_0 p_{-1}}^+)$  и  $S_{p_{-1} p_0}$ .

Далее мы примем еще два (наряду с  $S_1$ ) упрощающих предположения:

**S<sub>2</sub>.** Все особые точки  $\Gamma$ -поля  $A$  на  $S$ -многообразии  $M$  относятся либо только к типу II (либо II'), либо к типу III (см. п. 1).

**S<sub>3</sub>.** Пара взаимно обратных движений  $S_{pq}^\pm$  и  $S_{qp}^\pm$ , определяемая (неупорядоченной) парой плюс- (или минус-) соседних особенностей  $p$  и  $q$ , не зависит от выбора последних. Кроме того, если  $p, q$  и  $p', q'$  – такие две пары плюс- (или минус-) соседних особенностей, что  $S_{pq}^\pm = S_{p'q'}^\pm$ , причем  $p$  и  $p'$ , минус- (или плюс-) соседние, то особенности  $q$  и  $q'$  лежат по одну сторону от гиперплоскости (вполне геодезической  $(n-1)$ -мерной поверхности), проходящей через произвольную  $pp'$ -геодезическую в области  $Z(p) \cap Z(p')$ .

**Лемма 1.** Пусть  $p$  и  $q$  – плюс-соседние особенности,  $S_{pq}^+$  и  $S_{qp}^+$  – соответствующая им пара движений. Для каждой особенности  $p^*$  существует такая плюс-соседняя особенность  $q^*$ , что  $S_{p^*q^*}^+ = S_{pq}^+$ .

Аналогичная лемма имеет место для минус-соседних особых точек.

Таким образом, определены движения  $S^+$  и  $(S^+)^{-1}$  (произвольной парой плюс-соседних особенностей), а также  $S^-$  и  $(S^-)^{-1}$  (минус-соседними особенностями).

Лемма 1 приводит к предложению 4.

**Предложение 4.**  $S^+ S^- = S^- S^+$ .

Итак, композиции  $(S^+)^k (S^-)^l$  ( $k, l \in \mathbb{Z}$ ) образуют абелеву группу движений  $S$ -многообразия  $M$ . Элементы этой группы будем называть  $S$ -движениями.

**Замечание 1.** В случае особых точек типа (II) считаем  $S^- = id$ ; типа (II') –  $S^+ = id$ .

**Замечание 2.** Если  $(d, n-d)$  – сигнатура  $S$ -многообразия  $(M, dS^2)$ , то – как следует из предложения 3 – при  $d > 1$  необходимо:  $S^+ = id$  при  $n-d > 1$ ;  $S^- = id$  ( $n = \dim M$ ). Таким образом, при  $n > 3$  и типичном случае (т.е. при  $d > 1$  и  $n-d > 1$ ) группа  $G$   $S$ -движений тривиальна. При

этом все неизотропные геодезические особой точки  $p_0$  являются периодическими.

Итак, при  $n > 3$  («типичное»)  $S$ -многообразие обладает свойством, аналогичным свойству  $SC^m$  из [18].

#### Библиографический список

1. Шапиро, Я.Л. О геодезических полях многомерных направлений // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. № 4. С. 237–239.
2. Шапиро, Я.Л. Геодезические поля направлений и проективные системы // Матем. сб. 1955. Т. 36. Вып. 1. С. 125–148.
3. Кручкович, Г.И. О движениях в полуприводимых римановых пространствах // Успехи матем. наук. 1957. Т. 12. № 6. С. 149–156.
4. Каган, В.Ф. Субпроективные пространства / В.Ф. Каган. – М.: Физматгиз, 1961. – 220 с.
5. Levi-Civita, T. Sulle Trasformazioni delle equazioni dinamiche vita // Ann. Mat. Pura ed appl. – Milano, ser. 2. 1896. V. 24. P. 255–300.
6. Шапиро, Я.Л. Геодезическое поле направлений в целом / Я.Л. Шапиро // Изв. ВУЗов. Матем. 1970. № 4. С. 103–111.
7. Карган, Э. Геометрия римановых пространств / Э. Карган. – М., Л.: ОНТИ, 1930.
8. Schur, F. Uber den Zusammenhang der Raume constanten Krümmungsmasses mit den projectiven Raumen // Math. Ann. 1886. Т. 27. P. 537–567.
9. Солодовников, А.С. Полусы псевдоримановых пространств / А.С. Солодовников, Н.Р. Камышанский // Изв. АН СССР, Сер. Матем. 1975. Т. 39. № 5. С. 1093–1129.
10. Камышанский, Н.Р. Полуприводимые аналитические пространства «в целом» / Н.Р. Камышанский, А.С. Солодовников // Успехи матем. наук. 1980. Т. 35. № 5. С. 3–51.
11. Maebashi, T. Vector fields and space forms // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. 1960. № 15. P. 62–92.
12. Ishihara, S. On Riemannian manifolds admiting a concircular transformation / S. Ishihara, Y. Tashiro // Math. J. Okayama Univ. 1959. № 9. P. 19–47.
13. Tashiro, Y. Complete Riemannian manifolds and some vector fields // Trans. Amer. Math. Soc. 1965. V. 117. № 5. P. 251–275.
14. Yano, K. Concircular geometry. I, II, III, IV, V – Proc. Imp. Acad. Tokyo. 1940. V. 16. PP. 195–200, 354–360, 442–448, 505–511; ibid. 1942. V. 18. P. 446–451.
15. Bianchi, L. Lexioni di Geometrie differentiele. V. II, part II. – Pisa, 1903.
16. Игошин, В.А. Особые точки геодезического поля / В.А. Игошин, Я.Л. Шапиро // Изв. ВУЗов. Матем. 1984. № 9. С. 79–82.
17. Игошин, В.А. Геодезическое поле с особенностями и клеточное многообразие / В.А. Игошин, Я.Л. Шапиро // Изв. ВУЗов. Матем. 1984. № 11. С. 74–77.
18. Бессе, А. Многообразия с замкнутыми геодезическими / А. Бессе. – М.: Мир, 1981. – 315 с.

Дата поступления  
в редакцию 07.02.2012

V.A. Igoshin

### CELLULAR STRUCTURE OF PSEUDORIEMANNIAN SPACE WITH THE GEODESIC FIELD OF ONE-DIMENSIONAL DIRECTIONS

The Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

Are investigated psudoriemannian spaces admitting geodesics fields of one-dimensional directions with singular points. At some assumptions it is proved, that such varieties have the cellular structure, which complexity - unlike topological cages - is concentrated already in the cage. The global structure of studied spaces reminds, in particular, a double spiral of DNA; under other conditions probably global device of space in the form of the "parallel" Universes.

*Key words:* pseudoriemannian space, a geodesic field, singular points, cages, torus-like and cylinder-like spaces.

**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.

## НАШИ АВТОРЫ

### Радиотехника, системы телекоммуникаций и устройства СВЧ

**Мякинков Александр Валерьевич** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: redvillage@mail.ru

**Бураков Сергей Владимирович** – НГТУ, e-mail: SpybreakP-2@yandex.ru

**Смирнова Дарья Михайловна** – НГТУ, аспирант, e-mail: smirnovadarya@gmail.com

**Ковалев Федор Николаевич** - НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: kovalev@nntu.nnov.ru

**Гай Василий Евгеньевич** - НГТУ, канд. техн. наук, e-mail: iamuser@inbox.ru

### Механика жидкости и газа

**Громов Евгений Михайлович** - Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. «Математика», e-mail: egromov@hse.ru

**Тютин Виктор Владимирович**- Национальный исследовательский университет — Высшая школа экономики, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: vtyutin@hse.ru

**Зайцев Андрей Иванович** - СКБ средств автоматизации морских исследований, г. Южно-Сахалинск, e-mail: aizaytsev@mail.ru

**Малашенко Анатолий Емельянович** - СКБ средств автоматизации морских исследований, г. Южно-Сахалинск, e-mail: aemalashenko@skbsami.ru

**Костенко Ирина Сергеевна** - СКБ средств автоматизации морских исследований, г. Южно-Сахалинск, e-mail: irenka\_k@rambler.ru

**Пелиновский Ефим Наумович** - ИПФ РАН, г. Н. Новгород, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий науч. сотрудник, e-mail: enpeli@mail.ru

**Кузнецов Константин Иванович** - СКБ средств автоматизации морских исследований, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, e-mail: konstantin.kouznetsov@gmail.com

**Морозов Евгений Георгиевич** - Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: egmorozov@mail.ru

**Демидова Татьяна Александровна** - Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, тел. (499) 129-19-45

**Нечволодов Леонид Всеволодович** - Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, тел. (499) 129- 19-45

### Информатика и системы управления

**Никулин Евгений Александрович** - НГТУ, профессор каф. «Вычислительные системы и технологии», канд. техн. наук, доцент, e-mail: nea@mail.nnov.ru

**Соколова Элеонора Станиславовна** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ИСУ, e-mail: essokolova@mail.ru

**Пашковский Арсений Игоревич** - НГТУ, e-mail: ars2007@yandex.ru

**Капранов Сергей Николаевич** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: serg.kapranov@gmail.com

**Тимофеева Ольга Павловна** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: optimofeeva@mail.ru

### Машиностроение и автоматизация

**Букин Павел Эдуардович** - ОАО ПКО «Теплообменник», инженер-конструктор 1-й кат., e-mail: fox\_tracks@mail.ru

**Фролова Ирина Николаевна** – ОАО ПКО «Теплообменник», начальник бюро, канд. техн. наук, доцент, e-mail: friririk@mail.ru

**Лаптев Александр Игоревич** - ОАО «Гидромаш», инженер-технолог, email: alxpt@gmail.com

**Тудакова Нина Михайловна** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент каф. ТиОМ, тел. (831)436-23-70

**Кутилова Оксана Игоревна** – НГТУ, ст. преподаватель каф. ТиОМ, аспирант, тел. (831)436-23-70

**Крайнов Вадим Владимирович** – НГТУ, ассистент каф. ТиОМ, аспирант, тел. (831)436-23-70

**Куликов Сергей валентинович** - ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», тел. (832) 436-80-85

**Манцеров Сергей Александрович** - НГТУ, канд. техн. наук, доцент каф. ТиПМ, e-mail: mca\_9@nntu.nnov.ru

**Панов Алексей Юрьевич** - НГТУ, зав. каф. ТиПМ, доктор техн. наук, профессор, тел. 436-80-85, 436-03-01

**Отформатировано:** слева: 2 см, справа: 2 см, сверху: 2,3 см, Начать раздел: на текущей странице, Расстояние от края до верхнего колонтитула: 1,25 см, Расстояние от края до нижнего колонтитула: 1,25 см, Число колонок: 2

## Ядерная энергетика и техническая физика

**Большухин Михаил Александрович** – ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», начальник отделения научно-технического обоснования проектов; e-mail: bolshuhin@okbm.nnov.ru

**Будников Алексей Владимирович** – ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», гл. спец. Подразделения 49; budnikov@okbm.nnov.ru

**Свешников Дмитрий Николаевич** - ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», гл. спец. подразд. 49; alimov@okbm.ru

**Фомичев Владимир Иванович** - ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», начальник подразд. 56; fomichev@okbm.ru

**Крепков Владимир Павлович**- ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», инженер-конструктор 2 кат. подразд. 56; krepkov@okbm.ru

**Варенцов Андрей Владиславович** – НГТУ, магистрант 2-го года обучения, e-mail: vav88@mail.ru

**Доронков Денис Владимирович** – НГТУ, магистрант 2-го года обучения, e-mail: nevid000@mail.ru

**Купричева Елена Сергеевна** – НГТУ, магистрант 2-го года обучения, e-mail: lenok17@inbox.ru

**Солнцев Дмитрий Николаевич** – мнс, аспирант, e-mail: dim-solncev@yandex.ru

**Сорокин Владислав Дмитриевич** – мнс, аспирант, e-mail: vlad.sorokin1987@mail.ru

**Малахов Василий Алексеевич** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, докторант, тел. (831)436-82-33

**Попков Константин Владимирович** – НГТУ, аспирант, тел. (831)436-82-33

**Раевский Алексей Сергеевич** – НГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. (831)436-82-33

**Лапшин Рувим Михайлович** – НГТУ, канд.техн.наук,доцент, e-mail: react@nntu.nnov.ru

**Тарасова Наталья Павловна** – ст. преподаватель, -e-mail: react@nntu.nnov.ru

## Наземные транспортные системы

**Беляков Владимир Викторович** - НГТУ, д-р техн. наук ,нач. УНИИИР, e-mail: belyakov@nntu.nnov.ru

**Вахидов Умар Шахидович** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: umar-vahidov@mail.ru

**Галкин Дмитрий Александрович** – ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва, e-mail: zaitals@mail.ru

**Зайцев Алексей Сергеевич** – ООО «Военно-инженерный центр», ведущ. инженер-конструктор, e-mail: zaitals@mail.ru

**Кудряшов Евгений Михайлович** - ООО «Военно-инженерный центр», управляющий директор, e-mail: zaitals@mail.ru

**Макаров Владимир Сергеевич** - НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: makv: gmail.com

**Вашурин Андрей Сергеевич** – НГТУ, инженер, тел. (831) 2-01-04-15

**Герасин Андрей Владимирович** – НГТУ, инженер, тел.(831) 2-01-04-15

**Орлов Лев Николаевич** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. АиТ, тел. (831) 436-73-63

**Костин Сергей Юрьевич** – НГТУ, инженер, тел. (831) 201-04-15

**Тумасов Антон Владимирович** - НГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (831) 436-73-63

**Колтунов Владимир Андреевич** – НГТУ (Павловский филиал), тел. (831-71)3-52-61

## Проблемы кораблестроения и океанотехники

**Фам Фу Тхань, Фан Ван Ан** – Вьетнамский национальный технический институт

**Химич Владимир Леонидович** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ЭУиТД, тел.(831)436-78-79

**Хрипач Николай Анатольевич** – МГТУ «МАМИ, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. АиТД, e-mail: khripachna@gmail.com

**Лежнев Лев Юрьевич** - МГТУ «МАМИ», директор НТЦ "Силовые агрегаты", канд. техн. наук, e-mail: lev.lezhnev@gmail.com

**Папкин Борис Аркадьевич** - МГТУ «МАМИ», зам директора НТЦ "Силовые агрегаты", канд. техн. наук, E-mail: borispapkin@yandex.ru

**Шустров Федор Андреевич** - МГТУ «МАМИ», зам. директора НТЦ "Силовые агрегаты", e-mail: shustrov@yandex.ru

**Иванов Денис Алексеевич** – МГТУ «МАМИ», вед. инженер НТЦ "Силовые агрегаты", e-mail: stavelot@yandex.ru

**Сонкин Валерий Иосифович** - МГТУ «МАМИ», e-mail: val.sonkin2010@yandex.ru

**Папкин Игорь Аркадьевич** - МГТУ «МАМИ», инженер-исследователь 2-й кат. НТЦ "Силовые агрегаты", e-mail: gary6@yandex.ru

**Миронов Анатолий Алексеевич** – НГТУ, д-р техн.наук, зав. каф. ДПМиСМ, e-mail:smk@nntu.nnov.ru

**Зуев Валерий Андреевич** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. КиАТ, тел.(831)436-78-96

**Семенова Наталья Михайловна** – НГТУ, ассистент, асп. каф. КиАТ, e-mail: [ShaNAMix@yandex.ru](mailto:ShaNAMix@yandex.ru)

### **Электротехника и электроэнергетика**

**Лоскутов Алексей Борисович** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ЭЭиЭС, тел.(831)436-23-04

**Соснина Елена Николаевна** – НГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [asp@nntu.nnov.ru](mailto:asp@nntu.nnov.ru)

**Лоскутов Антон Алексеевич** – НГТУ, аспирант, тел. (831)436-23-04

**Бедретдинов Рустам Шамильевич** – НГТУ, магистрант, тел. (831)436-93-89

**Коробко Григорий Иванович** – ВГАВТ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [tv-out@narod.ru](mailto:tv-out@narod.ru)

**Попов Сергей Васильевич** – ВГАВТ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [popovsev3@yandex.ru](mailto:popovsev3@yandex.ru)

**Лебедев Василий Владимирович** - ВГАВТ, зав. лабораторией, аспирант, e-mail: [valeb1@yandex.ru](mailto:valeb1@yandex.ru)

**Макаев Алексей Сергеевич** – ВГАВТ, аспирант, e-mail: [mrmakay@mail.ru](mailto:mrmakay@mail.ru)

**Плехов А.С.** – ООО «Энергосбережение», канд. техн. наук, e-mail: [plehov@mail.ru](mailto:plehov@mail.ru)

**Титов Владимир Георгиевич** – НГТУ, **Умяров Д.В.** - ОАО «ЦКБ «ВЫМПЕЛ», e-mail: [vympel@mail.ru](mailto:vympel@mail.ru)

### **Металлургия и материаловедение**

**Руцкий Дмитрий Владимирович** - ВолгГТУ, канд. техн. наук, доцент каф. «Технология материалов», e-mail: [techmat@vstu.ru](mailto:techmat@vstu.ru)

**Зюбан Николай Александрович** – ВолгГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ТМ, e-mail: [ftkm@vstu.ru](mailto:ftkm@vstu.ru)

**Гаманюк Сергей Борисович** – ВолгГТУ, аспирант, e-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**Шмаль Валерия Владимировна** - ВолгГТУ, студент, e-mail: [tecmat@vstu.ru](mailto:tecmat@vstu.ru)

**А.Я. Пузиков Артем Яровлавич** – ВолгГТУ, магистр, [tesmat@vstu.ru](mailto:tesmat@vstu.ru)

**Сафронов Николай Николаевич** - КамГИЭА, г. Набережные Челны, д-р техн. наук, профессор каф. ЭиЭ

**Харисов Ленар Рустамович** - КамГИЭА, г. Набережные Челны, канд. техн. наук, доцент каф. МиТЛП, e-mail: [ln271@mail.ru](mailto:ln271@mail.ru)

**Гущин Вячеслав Николаевич** – НГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

**Васильев Виктор Александрович** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ТАЭП, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

**Чернышов Евгений Александрович** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

**Романов Иван Дмитриевич** - НГТУ, аспирант каф. ДВС, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

**Романова Елена Анатольевна** - НГТУ, зав. лабораторией, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

**Романов Алексей Дмитриевич** – НГТУ, ведущий программист, e-mail: [taerp@nntu.nnov.ru](mailto:taerp@nntu.nnov.ru)

### **Химия, химические и биотехнологии**

**Перетрутов Анатолий Анатольевич** – НГТУ (Дзержинский ф-л), канд. техн. наук, доцент, e-mail: [lab202@dfngtu.nnov.ru](mailto:lab202@dfngtu.nnov.ru)

**Чубенко Мария Николаевна** – НГТУ (Дзержинский ф-л), канд. техн. наук, доцент, e-mail: [sekretar@dfngtu.nnov.ru](mailto:sekretar@dfngtu.nnov.ru)

**Ким Павел Павлович** – НГТУ (Дзержинский ф-л), д-р техн. наук, профессор, e-mail: [sekretar@dfngtu.nnov.ru](mailto:sekretar@dfngtu.nnov.ru)

**Челнокова Марина Вадимовна** – НГТУ, ассистент, e-mail: [chelnokova\\_mv@mail.ru](mailto:chelnokova_mv@mail.ru)

**Калинина Александра Александровна** – НГТУ, ассистент, e-mail: [777aleksa777\\_87@mail.ru](mailto:777aleksa777_87@mail.ru)

**Аникина Татьяна Александровна** – НГТУ, аспирант, e-mail: [777aleksa777\\_87@mail.ru](mailto:777aleksa777_87@mail.ru)

**Соколова Татьяна Николаевна** – НГТУ, д-р хим. наук, профессор, (831)436-93-57

**Карташов Виктор Романович** – НГТУ, д-р хим. наук, профессор, зав. каф. БФиФХ, тел.(831)436-93-57

**Наумов Владимир Иванович** – НГТУ, д-р хим. наук, профессор, зав. каф. ОиНХ, тел.(831)436-43-21

### **Экономика, инновации и менеджмент**

**Юрлов Феликс Федорович** – НГТУ, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ЭиП, тел.(831)436-98-74

**Незнахин Михаил Евгеньевич** - НГТУ, аспирант, e-mail: [moiseeva@nntu.nnov.ru](mailto:moiseeva@nntu.nnov.ru)

**Ромашова Ирина Борисовна** – НГАСУ, д-р эконом. наук, зав. каф. ИМ, e-mail: [irina2002@rambler.ru](mailto:irina2002@rambler.ru)

**Шигина Александра Евгеньевна** - НГАСУ, аспирант, e-mail: [xxandra@front.ru](mailto:xxandra@front.ru)

**Яшин Сергей Николаевич** – НГТУ, д-р эконом. наук, профессор, зав. каф. УИД, тел.(831)436-73-74

**Мурашова Наталья Александровна** – НГТУ,  
канд. эконом. наук, доцент, тел. (831)436-73-74

**Зорина Людмила Борисовна** – НГТУ,  
канд. эконом. наук, доцент, тел.(831)245-98-11

### **Социальные науки, инновации в образовании, PR-технологии**

**Егоров Евгений Евгеньевич** – НГПУ,  
канд. эконом. наук, доцент, директор  
Социально-экономического института,  
e-mail: eeegorov@mail.ru

**Лысцев Михаил Сергеевич** – НГТУ, канд.  
полит. наук, ст. преподаватель,  
e-mail: MLystsev@gmail.com

**Гуляев Сергей Васильевич** – ННГУ,  
аспирант, e-mail: filosof6@nntu.nnov.ru

### **Математические методы в технических, математических и социальных науках**

**Галкин Владимир Михайлович** – НГТУ,  
д-р мат. наук, профессор, зав. каф. ВМ,  
тел.(831)257-86-91

**Пелиновский Ефим Наумович** – ИПФ РАН,  
д-р физ.-мат. наук, профессор, внс,  
e-mail: enpeli@mail.ru

**Тимофеев Иван Алексеевич** - Сибирский  
федеральный университет, г. Красноярск,  
студент, e-mail: ivan.timofeenko@gmail.com

**Верещагина Евгения Игоревна** – НГТУ,  
ст. преподаватель,  
e-mail: vereshagina.evgenija@rambler.ru

**Игошин Владимир Александрович** – НГТУ,  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
e-mail: vaigoshin@rambler.ru



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

**№ 1 (94)**

Редакторы: **Е.В. Комарова, Т.В. Третьякова**

*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 15.03.2012. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 45,75. Уч.-изд. л. 43. 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»**