

# Труды

ISSN 1816-210X

Нижний Новгород (2010)

№ 4 (83)

Нижегородского  
государственного  
технического  
университета  
им. Р.Е. Алексеева

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

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

**№ 4 (83)**

**Нижний Новгород 2010**

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, 2010. № 4 (83). – 334 с.**

*Выходит 4 раза в год*

**Главный редактор В.П. Кириенко**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

А.Б. Лоскутов (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),  
М.В. Ширяев (редактор электронного издания)

**Члены редколлегии:** О.М. Власова, В.Л. Башкатов, В.Г. Баранов,  
В.П. Хранилов, А.А. Куркин, А.Ю. Панов, С.М. Дмитриев, В.К. Майстренко,  
А.М. Грошев, С.Н. Хрунков, С.В. Хватов, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко,  
А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, Е.А. Чернышов, О.С. Кошелев, В.В. Глебов,  
В.Ф. Кулепов, Е.Н. Соснина

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2010

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**STATE 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**

**№4 (83)**

**Nizhni Novgorod 2010**

**Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev**  
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2010. № 4 (83). – 334 p.

*The journal is issued 4 times a year*

**Editor-in-Chief V.P. Kiriyenko**

**EDITORIAL BOARD:**

A.B. Loskutov (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),  
M.V. Shiryaev (Editor of Electronic Edition)

**Members of Editorial Board:** O.M. Vlasova, V.L. Bashkatov, V.G. Baranov,  
V.P. Khranilov, A.A. Kurkin, A.Y. Panov, S.M. Dmitriev, V.K. Maystrenko,  
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhalevko,  
A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, Y.A. Chernyshov, O.S. Koshelev, V.V. Glebov,  
V.F. Kulepov, Y.N. Sosnina

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....</b>	<b>11</b>
<b>Кричигин А.В., Маврычев Е.А.</b> Алгоритмы многообзорного обнаружения траектории движущейся цели.....	11
<b>Плужников А.Д., Приблудова Е.Н.</b> Ускорение гидролокационного обзора при действии мешающих ревербераций.....	19
<b>Милов В.Р., Баранов В.Г., Новиков Н.В., Алексеев В.В., Севрюков А.А.</b> Расчёт зон радиопокрытия сети технологической подвижной радиосвязи с использованием геоинформационной системы Mapinfo Professional.....	23
<b>МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....</b>	<b>30</b>
<b>Рувинская Е.А., Куркина О.Е., Куркин А.А.</b> Уточненное нелинейное эволюционное уравнение для внутренних гравитационных волн в трехслойной симметричной жидкости.....	30
<b>Громов Е.М., Тютин В.В., Морозов В.П.</b> Взаимодействие коротких однокомпонентных векторных солитонов в средах со смещенной дисперсией (адиабатическое приближение).....	40
<b>Хвостова О.Е.</b> Оценка запаса устойчивости склонов береговой линии Горьковского водохранилища.....	50
<b>ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>62</b>
<b>Утробин В.А.</b> Модели организации поля рецепторов сетчатки глазного яблока.....	62
<b>Преображенский А.В., Поселенов Е.Н.</b> Компьютерный преобразователь «угол-код» на сельсине.....	70
<b>Мордвинов А. В.</b> Методика автоматической категоризации текстов.....	75
<b>Фейгин М.И.</b> Приближенный расчет диаграммы управляемости судна при ветре.....	81
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....</b>	<b>85</b>
<b>Глебов В.В., Игнатьев Д.А., Егоров М.Е.</b> Управление колебательным поведением инструмента при шлифовании хрупких неметаллических материалов.....	85
<b>Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Хрипунов А.В.</b> Влияние способа изготовления инструмента из кубического нитрида бора на надежность его работы.....	93
<b>Пилипосян С.Е.</b> Измерение момента инерции произвольного твердого тела.....	100
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>111</b>
<b>Самойлов О.Б., Фальков А.А., Морозкин О.Н., Лукьянов В.Е.</b> Уточнение методики учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны из ТВСА ВВЭР-1000.....	111
<b>Дмитриев С.М., Самойлов О.Б., Лукьянов В.Е., Морозкин О.Н.</b> Анализ эффективности применения перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции реакторов ВВЭР-1000.....	120
<b>Лапшин Р.М.</b> О предельной мощности испарительных термосифонов.....	132

<b>НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>138</b>
<b>Жирный Р.И., Горелов В.А., Котиев Г.О.</b> Математическая модель прямолинейного движения автопоезда с жесткой и гибкой связью между звеньями.....	138
<b>Аникин А.А., Барахтанов Л.В., Донато И.О., Шапкин В.А.</b> Геометрические параметры снежного покрова как полотна пути для движения машин.....	145
<b>Котляренко В.И., Манянин С.Е., Соколов, И.А.</b> Математическая модель колесного транспортного средства.....	151
<b>ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....</b>	<b>157</b>
<b>Сергеева А.М., Марченко О.В.</b> Деформация ледяного покрова под действием атмосферного давления и собственного веса льда .....	157
<b>Кочнев Ю.А.</b> Оптимизация элементов танкера на ранней стадии проектирования...	166
<b>Немировский Ю.В., Романова Т.П.</b> Исследование поведения произвольных пластических полигональных пластин со свободным отверстием при их динамическом деформировании.....	174
<b>Захаров Л.А., Хрунков С.Н., Лимонов А.К.</b> Методика выбора рациональных технических характеристик газораспределительного механизма поршневого двигателя внутреннего сгорания.....	181
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....</b>	<b>190</b>
<b>Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В.</b> Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока.....	190
<b>Анишев Е.Ю.</b> Опыт применения бесконтактных датчиков крутящего момента на испытательных стендах.....	205
<b>Анишев Е.Ю., Рощин Е.В.</b> Проблемы электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов АЭС.....	211
<b>Алтунин Б.Ю., Карнавский И.А.</b> Математическая модель компенсатора неактивной мощности на базе многоуровневого инвертора с зонной шим на высокой частоте.....	219
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>226</b>
<b>Болдырев Д.А.</b> Исследование комплексного влияния технологических параметров модифицирования конструкционных чугунов на показатели их структуры и свойств.....	226
<b>Невский С.Е., Горохов А.Ю.</b> Определение дефекта модуля упругости материалов при усталостном воздействии.....	240
<b>Мишаков Г.А., Родионов А.И.</b> Лазерная обработка конструкционных сталей после диффузионного борирования .....	247
<b>ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>252</b>
<b>Востоков В.М., Смирнова В.М., Дегтяренко Г.Л.</b> Определение нуклеотидов в кормовых дрожжах микробиологического производства.....	252
<b>Родионов А.С., Сидягин А.А.</b> Расчет газожидкостного равновесия на стадии дистиляции в производстве карбамида.....	258
<b>Никандров М.И., Никандров И.С.</b> Получение соляной кислоты из печных газов обезвреживания отходящих газов и отходов производства хлорорганических веществ.....	267

---

<b>ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....</b>	<b>272</b>
<b>Пальцев В.В.</b> Совершенствование механизмов создания промышленных кластеров как проблема современного менеджмента.....	272
<b>Юрлов Ф.Ф., Плеханова А.Ф., Плеханов Н.А.</b> Сравнительная оценка методов портфельного анализа при стратегическом планировании и управлении и обоснование необходимости много- критериального выбора принимаемых решений.....	279
<b>Морозова Г.А.</b> Инновационный маркетинг в регионе.....	284
<b>СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>290</b>
<b>Федосеева Н.Н.</b> Доступ общественности к информации о деятельности судов в российской федерации.....	290
<b>Саркисян Ю.В.</b> Компетентностный подход как основа модернизации высшей школы России.....	297
<b>Бардинская Т.Р., Колденкова А.Т.</b> Коммуникативная компетентность как основной компонент профессиональной подготовки студентов специальности «Туризм»...	303
<b>МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>309</b>
<b>Ожиганов А.А., Прибыткин П.А.</b> Кодовые шкалы на основе композиции нелинейных рекуррентных последовательностей.....	309
<b>Медунецкий В.В.</b> Поиск и исследование новых свойств микрогеометрии поверхностей деталей.....	316
<b>Китаев И.В., Обухов В.И.</b> Расчет оптимальных режимов соединения системы «Si - Si - Si» с минимальными остаточными внутренними напряжениями.....	321
<b>Корнилов А.В.</b> Система ориентации летательного аппарата на интегральных датчиках...	327

## CONTENTS

<b>RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....</b>	<b>11</b>
<b>Krichigin A.V., Mavrychev E.A.</b> Multi-scanning detection algorithms of moving targettrac.....	11
<b>Pluzhnikov A.D., Pribludova E.N.</b> Sonar scanning rate increase with interfering reverberations...	19
<b>Milov V.R., Baranov V.G., Novikov N.V., Alekseev V.V., Sevryukov A.A.</b> Calculation of radio coverage zones of mobile radio network using mapinfo professional geoinformation system.....	23
<b>MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA .....</b>	<b>30</b>
<b>Rouvinskaya E.A., Kurkina O.E., Kurkin A.A.</b> Improved nonlinear evolutionary equation for interfacial gravity waves in a symmetric three-layer fluid.....	30
<b>Gromov E.M., Tyutin V.V., Morozov V.P.</b> Short single-component vector solitons interaction in dispersion-shifted media (adiabatic approximation).....	40
<b>Khvostova O.E.</b> Slope stability assessment of Gorkovskoe reservoir shoreline.....	50
<b>INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....</b>	<b>62</b>
<b>Utrobin V.A.</b> Organisation models of the eyeball retina field of receptors.....	62
<b>Preobrazhensky A.V., Poselenov E.N.</b> Angle-code converter with selsyn and computer.....	70
<b>Mordvinov A.V.</b> Automated texts categorization method.....	75
<b>Feigin M.I.</b> Computation of the controllability diagram for a ship subject to the action of a wind...	81
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION .....</b>	<b>85</b>
<b>Glebov V.V., Ignatyev D.A., Yegorov M.E.</b> The management of vibratory conduct of the for grinding of fragile non-metallic materials.....	85
<b>Kabaldin Y.G., Laptev I.L., Khripunov A.V.</b> The influence of manufacturing method for cubic boron nitride tool's on its work reliability.....	93
<b>Piliposian S.E.</b> Measurement of random solid body moment of inertia.....	100
<b>NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS .....</b>	<b>111</b>
<b>Samoylov O.B., Falkov A.A., Morozkin O.N., Lukyanov V.E.</b> The revision of the method taking into account of the deviations of local parameter for substantiation of reliability of core VVER-1000 with TVSA.....	111
<b>Dmitriev S.M., Samoylov O.B., Lukyanov V.E., Morozkin O.N.</b> Analysis of the efficiency of using of the mixing spacer grids in alternative design fuel assemblies in reactors VVER-1000.....	120
<b>Lapshin R.M.</b> Heat tranfer in vertycal turbular heat exchanger of npp cooling system.....	132
<b>LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS .....</b>	<b>138</b>
<b>Zhirnyu R.I., Gorelov V.A., Kotiev G.O.</b> Mathematical model of rectilinear dynamics of the articulated lorry with elastic and flexible connection between sections.....	138

<b>Anikin A.A., Barakhtanov L.V., Donato I.O., Shapkin V.A.</b> Geometrical parameters of the snow cover as cloths of the way for movement of machines.....	145
<b>Kotlyarenko V.I., Manyanin S.E., Sokolov I.A.</b> Mathematical model of a wheeled vehicle.....	151
<b>PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....</b>	157
<b>Sergeeva A.M., Marchenco O.V.</b> Deformation of an ice sheet under the action of atmospheric pressure and the weight of ice.....	157
<b>Kochnev U.A.</b> Optimization elements of tanker on initial design stage.....	166
<b>Nemirovsky Y.V., Romanova T.P.</b> Physical modeling of vessel motion in broken ice.....	174
<b>Zakharov L.A., Khrunkov S.N., Limonov A.K.</b> Method of rational valve timing choice in the internal combustion engine.....	181
<b>ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY .....</b>	190
<b>Tikhomirov V.A., Titov V.G., Hvatov S.V.</b> Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current.....	190
<b>Anishev E.Y., Roschin E.V.</b> Problems of electromagnetic compatibility of variable electric drives of the main circulating pumps of the atomic power station.....	205
<b>Anishev E.Y.</b> Experience of application of contactless a torque transducer on test bench.....	211
<b>Altunin B.U., Karnavskiy I.A.</b> Mathematical model of the compensator of inactive power on base of multilevel inverter with zonal pwm at the high frequency.....	219
<b>METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS .....</b>	226
<b>Boldyrev D. A.</b> Scientific-technological bases of modern methods of modifying constructional cast irons.....	226
<b>Nevsky S.E., Gorohov A.U.</b> Determination of materials coefficient of elasticity flaw under fatigue load.....	240
<b>Mishakov G.A., Rodionov A.I.</b> Laser treatment of structural steels after diffusion boronizing.....	247
<b>CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES .....</b>	252
<b>Vostokov V.M. Smirnova B.M., Degtjarenko G.L.</b> Definition nucleinic acids in fodder yeast of microbiological manufacture.....	252
<b>Rodionov A.S., Sidiagin A.A.</b> Calculation of gas-liquid equilibria at the distillation stage in urea production.....	258
<b>Nikandrov M.I., Nikandrov I.S.</b> Getting the hydrochloric acid from the furnace gases neutralization of waste gases and waste production of organochlorine compounds.....	262
<b>ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT .....</b>	272
<b>Paltsev V.V.</b> Improvement of mechanisms for creation of industrial clusters as the problem of modern management.....	272
<b>Yurlov F.F., Plekhanova A.F., Plekhanov N.A.</b> comparative assessment of the portfolio analysis methods in the strategical planning and management and substantiation of the multi-objective approach to the decision making.....	279
<b>Morozova G.A.</b> Competitiveness of the region.....	284

---

<b>SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....</b>	290
<b>Fedoseeva N.N.</b> Public access to information about the activities of courts.....	290
<b>Sarkisan U.V.</b> Competence approach modernization basis of higher school in Russia.....	297
<b>Bardinskaya T.R., Koldenkova A.T.</b> Communicative competence as a basis for training students of the specialization "Tourism".....	303
<b>MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....</b>	309
<b>Ozhiganov A.A., Pribytkin P.A.</b> Code scales based on the composition of non-linear recurrent sequences.....	309
<b>Meduneckiy V.V.</b> Searching for and study new characteristic mikrogeometrii surfaces of the details.....	316
<b>Kitaev I.V., Obuchov V.I.</b> 3-layer structure (Si-Si-Si) batch bonding method optimization to minimize residual internal stresses.....	321
<b>Kornilov A.V.</b> The navigation system of the aircraft based on integrated sensors.....	327

# РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.396.96

А.В. Кричигин<sup>1</sup>, Е.А. Маврычев<sup>2</sup>

## АЛГОРИТМЫ МНОГООБЗОРНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского<sup>1</sup>,  
ОАО НПО «ЛЭМЗ»<sup>2</sup>

Предложены алгоритмы обнаружения траектории цели, основанные на межобзорном накоплении сигналов. Получены статистические характеристики данных методов: вероятность появления ложной трассы и вероятность правильного обнаружения трассы цели. Представлены численные результаты, показывающие высокую эффективность рассмотренных алгоритмов.

*Ключевые слова:* обнаружение траектории, накопление сигналов, вероятность ложной тревоги, вероятность правильного обнаружения

### Введение

Многообзорная обработка информации является одним из способов улучшения качества обнаружения в РЛС, осуществляющей последовательный обзор пространства. Алгоритмы, в которых не выносятся решение о наличии цели в каждом отдельно взятом обзоре, получили название «сопровождение до обнаружения» (track-before-detect) [1]. Современные алгоритмы в [1–3] основаны на процедурах динамического программирования (ДП). Метод, использующий ДП, представленный в работе [1], заключается в анализе на каждом обзоре всех элементов разрешения, в которых может находиться цель, и выборе только одного из них с максимальной амплитудой принятого сигнала. Затем происходит накопление информации и сравнение полученной суммы с порогом для принятия решения о наличии траектории цели.

В настоящей работе рассмотрены метод обнаружения траектории путем некогерентного многообзорного накопления и метод двухэтапного многообзорного обнаружения траектории движущейся цели с некогерентным накоплением в [4]. Особенностью предлагаемых способов обнаружения трассы цели является то, что сигналы накапливаются за время нескольких обзоров наблюдения. В первом алгоритме происходит накопление сигналов с учетом всех возможных перемещений цели от обзора к обзору. Во втором методе на первом этапе отсеиваются маловероятные гипотезы о возможных траекториях цели. Решение о наличии трассы в обоих случаях принимается лишь на последнем шаге. В работе исследуются характеристики обнаружения данных алгоритмов в случае флюктуирующих целей. Проводится сравнение представленных методов многообзорного накопления с алгоритмами ДП [1–3].

### Постановка задачи

Рассмотрим задачу обнаружения траектории движущейся в пространстве цели за  $K$  обзоров. В каждом обзоре цель может находиться в определенном элементе разрешения  $n_k$ , где  $k$  – номер текущего обзора.

Таким образом, траектория цели представляет собой набор элементов разрешения, в которых цель находится в соответствующих обзорах, т.е.  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$ .

Пусть  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_K$  – векторы комплексных амплитуд принятых сигналов за  $K$  обзоров, содержащих компоненты полезного сигнала и шума. Шумовые компоненты принятого сигнала задаются векторами комплексных амплитуд:  $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_K$ . Шум полагается белым и подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Обнаружение траектории цели сводится к проверке гипотезы  $H_0(n_1, n_2, \dots, n_K)$  о том, что в  $K$  обзорах наблюдения в элементах разрешения  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$  цель отсутствовала против альтернативы  $H_1(n_1, n_2, \dots, n_K)$  о наличии цели в элементах разрешения  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$ :

$$\begin{aligned} H_0(n_1, n_2, \dots, n_K): \quad x_k(n_k) &= z_k(n_k), k = 1 \dots K, \\ H_1(n_1, n_2, \dots, n_K): \quad x_k(n_k) &= a_k + z_k(n_k), k = 1 \dots K, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_k$  – случайная комплексная амплитуда сигнала, отраженного от цели в  $k$ -й обзор.

Будем полагать, что амплитуда сигнала, отраженного от цели, флуктуирует по закону Релея, флуктуации амплитуды статистически независимы в разных обзорах и среднее отношение сигнал/шум  $q$  не меняется от обзора к обзору.

### Многообзорное накопление

Для сигналов с независимыми флуктуациями амплитуды и случайными фазами оптимальной обработкой является некогерентное накопление принятой последовательности [4]. Это эквивалентно вычислению следующего логарифма отношения правдоподобия:

$$L(n_1, n_2, \dots, n_K) = \sum_{k=1}^K L_k(n_k), \quad (2)$$

где  $L_k(n_k)$  – логарифм отношения правдоподобия для  $n_k$ -го элемента разрешения в  $k$ -м обзоре наблюдения [4]:

$$L_k(n_k) = |x_k(n_k)|^2. \quad (3)$$

Полагаем, что поиск цели производится в заданном секторе пространства, состоящем из  $N_1$  элементов разрешения. Множество элементов разрешения заданного сектора обозначим  $S_1$ , имеющее размерность  $N_1$ . В первый момент времени цель находится в элементе разрешения  $n_1 \in S_1$ . Для любого элемента разрешения  $n_1 \in S_1$  на второй обзор формируется некоторый строб, состоящий из элементов множества  $S_2(n_1)$  размерностью  $N_2$ , который в общем случае зависит от  $n_1$ . Строб на второй обзор соответствует всевозможным гипотетическим перемещениям цели, находящейся в первый момент времени в элементе  $n_1$ . Это означает, что объект из элемента  $n_1$  ко второму обзору может переместиться по  $N_2$  предполагаемым траекториям.

Следовательно, для первых двух обзоров рассматриваются гипотезы о траекториях  $(n_1, n_2)$ , удовлетворяющих следующим условиям:

$$(n_1, n_2): \quad n_1 \in S_1, n_2 \in S_2(n_1). \quad (4)$$

В третьем обзоре для каждой гипотетически возможной трассы  $(n_1, n_2)$ , построенной по первым двум обзорам, формируется строб, состоящий из элементов  $S_3(n_1, n_2)$  размерностью  $N_3$ . Аналогично на  $k$ -й обзор для каждой возможной трассы  $(n_1, n_2, \dots, n_{k-1})$ , построенной по предыдущим  $(k-1)$  обзорам, формируется строб  $S_k(n_1, n_2, \dots, n_{k-1})$  размерностью  $N_k$ , т.е. предполагаемая траектория должна удовлетворять следующим условиям:

$$(n_1, n_2, \dots, n_K): \quad n_1 \in S_1, n_2 \in S_2(n_1), \dots, n_K \in S_K(n_1, n_2, \dots, n_{K-1}). \quad (5)$$

Таким образом, на последнем этапе происходит сравнение для каждой возможной трассы отношения правдоподобия, которое является решающей статистикой, с порогом. Решение о наличии трассы принимается в случае превышения этого порога. Алгоритм принятия решения о наличии или отсутствии траектории цели  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$  для многообзорного накопления:

$$\begin{aligned} H_0(n_1, n_2, \dots, n_K) : L(n_1, n_2, \dots, n_K) < L_K, \\ H_1(n_1, n_2, \dots, n_K) : L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K. \end{aligned} \quad (6)$$

Общее число гипотез, которое необходимо проверить, определяется количеством всех возможных траекторий движения цели, т.е. произведением размеров стробов  $N_2, N_3, \dots, N_K$ .

Найдем характеристики обнаружения траектории цели (вероятность ложной тревоги и вероятность правильного обнаружения) для рассматриваемого метода многообзорного накопления. При однообзорном наблюдении вероятность ложной тревоги равна  $F_1 = f/N_1$ , где  $f$  – частота появления ложной трассы за один цикл выдачи информации. Вероятность ложного обнаружения трассы по  $K$  обзорам будет равна  $F_K = f/(N_1 N_2 \dots N_K)$ .

При отсутствии сигнала (событие  $H_0$ ) найдем вероятность ложной тревоги, которая является вероятностью превышения порога  $L_K$  на последнем  $K$ -м шаге, то есть

$$F_K = P\{L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K | H_0\}. \quad (7)$$

Так как шум полагается белым с нормальным законом распределения с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, то случайная величина (3) подчиняется экспоненциальному закону [5]. Тогда при отсутствии сигнала решающая статистика (2) распределена по закону  $\chi^2$  с  $2K$  степенями свободы [6]:

$$W_{L(n_1, \dots, n_K)}(\xi | H_0) = \frac{\xi^{K-1}}{2^K \cdot \Gamma(K)} \cdot \exp\left[-\frac{\xi}{2}\right], \quad (8)$$

где  $\Gamma(\xi)$  – гамма-функция, которая в случае целочисленного аргумента может быть выражена через факториал  $\Gamma(\xi) = (\xi-1)!$

Тогда вероятность ложной тревоги (7) выглядит следующим образом:

$$F_K = \frac{\Gamma\left(K, \frac{L_K}{2}\right)}{(K-1)!}, \quad (9)$$

где  $\Gamma(\xi, \zeta)$  – неполная гамма-функция [7].

Таким образом, по заданной частоте появления ложной трассы  $f$  за один цикл выдачи информации может быть получена вероятность ложной тревоги, зная которую с помощью выражения (9) можно получить значения порога  $L_K$ .

Теперь определим вероятность правильного обнаружения флюктуирующих целей, которая является вероятностью превышения порога  $L_K$  на последнем  $K$ -м шаге при наличии цели:

$$D_K = P\{L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K | H_1\}. \quad (10)$$

Плотность распределения случайной величины (3) для любого обзора имеет экспоненциальный вид [5]. В этом случае решающая статистика (2) подчиняется распределению  $\chi^2$  с  $2K$  степенями свободы [6]:

$$W_{L(n_1, \dots, n_K)}(\xi | H_1) = \frac{\xi^{K-1}}{2^K (1+q^2)^K \Gamma(K)} \cdot \exp\left[-\frac{\xi}{2(1+q^2)}\right]. \quad (11)$$

Тогда вероятность правильного обнаружения цели выглядит следующим образом:

$$D_K = \frac{\Gamma\left(K, \frac{L_K}{2 \cdot (1+q^2)}\right)}{(K-1)!}. \quad (12)$$

### Двухэтапное многообзорное накопление

Как было показано ранее, количество проверяемых гипотез в методе многообзорного накопления (6) экспоненциально возрастает с ростом числа обзоров, что резко ограничивает возможность практической реализации данного алгоритма. Однако число гипотез можно существенно уменьшить, используя двухэтапный метод обнаружения:

- на первом этапе в каждом обзоре реализуется первичное обнаружение сигналов с достаточно высокой вероятностью ложной тревоги ( $p_k \approx 10^{-1} \div 10^{-3}$ ,  $k = 1 \dots K$ );
- на втором этапе в элементах разрешения, в которых сигналы превысили первичные пороги, осуществляется межобзорное накопление с учетом всевозможных перемещений цели.

Обозначим  $G_1, G_2, \dots, G_K$  – множества элементов разрешения, в которых превышен порог на первом этапе, в соответствующих обзорах наблюдения, т.е.

$$L_k(n_k) > l_k \Rightarrow n_k \in G_k, \quad (13)$$

где  $l_k$  – порог обнаружения на первом этапе в  $k$ -м обзоре (первичное обнаружение).

При этом для каждого  $n_1 \in G_1$  на второй обзор формируется строб  $S_2(n_1)$ , соответствующий всем возможным способам перемещения цели из элемента разрешения  $n_1$ . Однако рассматриваются только те элементы разрешения, в которых произошло первичное превышение порогов.

Следовательно, для первых двух обзоров рассматриваются гипотезы о траекториях  $(n_1, n_2)$ , удовлетворяющих следующим условиям:

$$(n_1, n_2): n_1 \in S_1 \cap G_1, n_2 \in S_2(n_1) \cap G_2. \quad (14)$$

Аналогичным образом для произвольного числа обзоров  $K$  рассматриваются гипотезы о траекториях  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$ , удовлетворяющих условиям:

$$(n_1, n_2, \dots, n_K): n_1 \in S_1 \cap G_1, n_2 \in S_2(n_1) \cap G_2, \dots, n_K \in S_K(n_1, n_2, \dots, n_{K-1}) \cap G_K. \quad (15)$$

В этом случае алгоритм принятия решения о наличии траектории цели  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$  заключается в следующем:

$$\begin{aligned} H_0(n_1, n_2, \dots, n_K) &: \bigcup_{k=1}^K (L_k(n_k) < l_k) \bigcup (L(n_1, n_2, \dots, n_K) < L_K), \\ H_1(n_1, n_2, \dots, n_K) &: \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k) \bigcap (L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K). \end{aligned} \quad (16)$$

Общее число гипотез, которое необходимо проверить, определяется количеством всех возможных траекторий движения цели  $N_1 N_2 \dots N_K$  и значениями порогов на первом этапе ( $p_k$ ,  $k = 1 \dots K$ ). Количество проверяемых гипотез является случайной величиной, среднее значение которой будет

$$N_\Sigma = \prod_{k=1}^K N_k \cdot p_k. \quad (17)$$

Отметим, что количество проверяемых гипотез можно менять в зависимости от конкретной задачи, изменяя вероятности обнаружения на первом этапе. При этом если  $p_k = 1$ , что соответствует  $l_k = 0$ ,  $k = 1 \dots K$ , приходим к алгоритму многообзорного накопления без первичных порогов (6).

Рассмотрим характеристики обнаружения для предлагаемого метода двухэтапного многообзорного обнаружения. При отсутствии сигнала вероятность ложной тревоги является вероятностью превышения на первом этапе порогов  $l_k$ ,  $k = 1 \dots K$  в каждом обзоре и на втором этапе превышения порога  $L_K$ , т.е.

$$F_K = P \left\{ \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k) \bigcap (L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K) \middle| H_0 \right\}. \quad (18)$$

Преобразуем выражение для вероятности ложной тревоги, используя условную плотность вероятности. Учтем, что превышения первичных порогов в каждом обзоре являются независимыми событиями, поэтому выражение для совместной вероятности может быть представлено в виде произведения вероятностей [5, 6]:

$$F_K = \prod_{k=1}^K P\{L_k(n_k) > l_k | H_0\} \int_{L_K}^{\infty} W_{L(n_1, \dots, n_K)} \left( \xi \left| \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k), H_0 \right. \right) d\xi. \quad (19)$$

В случае ложной тревоги на первом этапе в каждом обзоре происходит превышение первичных порогов. Плотность распределения случайной величины (3) при условии превышения порога  $l_k$

$$W_{L(n)}(\xi | \xi \geq l, H_0) = \begin{cases} \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{\xi - l_k}{2} \right\}, & \xi \geq l_k, \\ 0, & \xi < l_k. \end{cases} \quad (20)$$

Вероятность превышения порога на первом этапе в  $k$ -м обзоре

$$P\{L_k(n_k) > l_k | H_0\} = p_k = \exp \left\{ -\frac{l_k}{2} \right\}. \quad (21)$$

Распределение решающей статистики (2) при условии превышения первичных порогов может быть получено как свертка выражения (20):

$$W_{L(n_1, \dots, n_K)} \left( \xi \left| \bigcap_{k=1}^K L_k(n_k) > l_k, H_0 \right. \right) = \begin{cases} \frac{\left( \xi - \sum_{k=1}^K l_k \right)^{K-1}}{2^K \cdot \Gamma(K)} \exp \left\{ -\frac{\xi - \sum_{k=1}^K l_k}{2} \right\}, & \xi \geq \sum_{k=1}^K l_k; \\ 0, & \xi < \sum_{k=1}^K l_k. \end{cases} \quad (22)$$

Заметим, что условная решающая статистика подчиняется «усеченному» закону  $\chi^2$  с  $2K$  степенями свободы. Тогда вероятность ложной тревоги

$$F_K = \frac{\Gamma \left( K, \frac{L_K - l_1 - \dots - l_K}{2} \right)}{(K-1)!} \exp \left\{ -\frac{l_1 + \dots + l_K}{2} \right\}. \quad (23)$$

Таким образом, по заданной частоте появления ложной трассы  $f$  за один цикл выдачи информации может быть получена вероятность ложной тревоги, зная которую с помощью выражения (23) можно получить значения порога  $L_K$ .

Теперь определим вероятность правильного обнаружения флюктуирующих целей, для чего рассмотрим случай наличия сигнала и шума (событие  $H_1$ ). Вероятность правильного обнаружения цели является вероятностью превышения на первом этапе порогов  $l_k$ ,  $k = 1 \dots K$  в каждом обзоре и на втором этапе превышения порога  $L_K$  при наличии цели:

$$D_K = P \left\{ \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k) \cap (L(n_1, n_2, \dots, n_K) > L_K) \middle| H_1 \right\}. \quad (24)$$

Как и в случае вычисления вероятности ложной тревоги, преобразуем выражение (24), используя условную плотность вероятности. Тогда, учитывая независимость превышения порогов на первом этапе в каждом обзоре, вероятность правильного обнаружения

$$D_K = \prod_{k=1}^K \exp \left\{ -\frac{l_k}{2(1+q^2)} \right\} \int_{L_K}^{\infty} W_{L(n_1, \dots, n_K)} \left( \xi \left| \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k), H_1 \right. \right) d\xi. \quad (25)$$

Условное распределение решающей статистики (2) подчиняется «усеченному» закону  $\chi^2$  с  $2K$  степенями свободы

$$W_{L(n_1, \dots, n_K)} \left( \xi \mid \bigcap_{k=1}^K (L_k(n_k) > l_k), H_1 \right) = \begin{cases} \frac{\left( \xi - \sum_{k=1}^K l_k \right)^{K-1}}{2^K \Gamma(K) (1+q^2)} \cdot \exp \left\{ -\frac{\xi - \sum_{k=1}^K l_k}{2(1+q^2)} \right\}, & \xi \geq \sum_{k=1}^K l_k; \\ 0, & \xi < \sum_{k=1}^K l_k. \end{cases} \quad (26)$$

В результате

$$D_K = \frac{\Gamma \left( K, \frac{L_K - l_1 - \dots - l_K}{2(1+q^2)} \right)}{(K-1)!} \cdot \exp \left\{ -\frac{l_1 + \dots + l_K}{2(1+q^2)} \right\}. \quad (27)$$

Отметим, что вероятность ложной тревоги (23) и вероятность правильного обнаружения (27) зависят от суммы порогов на первом этапе, поэтому, не уменьшая общности, можно рассматривать случай двухэтапного некогерентного накопления при равенстве вероятностей ложной тревоги на первом этапе, т.е. случай, когда  $p_1 = p_2 = \dots = p_K = p$ . Тогда пороги на первом этапе в каждом обзоре будут одинаковы  $l_1 = l_2 = \dots = l_K = l$ .

### Динамическое программирование

В методе, основанном на ДП, на каждом этапе происходит сравнение отношений правдоподобия (мощностей принятых сигналов) и выбор максимума из них. После первого обзора для каждого элемента разрешения  $n_1 \in S_1$  формируется строб на второй обзор  $S_2(n_1)$  размерностью  $N_2$ , по аналогии с ранее рассмотренными методами. На втором обзоре в каждом стробе  $S_2(n_1)$  выбирается элемент разрешения с максимальным отношением правдоподобия:

$$n_2 = \arg \max_{n \in S_2(n_1)} L_2(n), \quad n_1 = 1 \dots N_1. \quad (28)$$

Далее для возможной трассы  $(n_1, n_2)$  формируется строб на следующий обзор, состоящий из элементов  $S_3(n_1, n_2)$  размерностью  $N_3$ , и в этом стробе производится выбор элемента с максимальным отношением правдоподобия. Аналогично на  $k$ -й обзор для трассы  $(n_1, n_2, \dots, n_{k-1})$ , построенной по предыдущим  $(k-1)$  обзорам, формируется строб  $S_k(n_1, n_2, \dots, n_{k-1})$  размерностью  $N_k$  с выбором максимума:

$$n_k = \arg \max_{n \in S_k(n_1, \dots, n_{k-1})} L_k(n). \quad (29)$$

Таким образом, на последнем этапе проводится проверка  $N_1$  гипотезы о наличии трассы цели, каждая из которых начинается в соответствующем элементе разрешения  $n_1 \in S_1$ . Для каждой гипотезы накопленное отношение правдоподобия сравнивается с порогом и принимается решение о наличии или отсутствии траектории цели  $(n_1, n_2, \dots, n_K)$  в соответствии с правилом (6). При этом значение отношения правдоподобия максимально среди всех возможных трасс, начинающихся в элементе  $n_1$ .

### Численные результаты

Рассмотрим пример, в котором общее число элементов разрешения  $N_1 = 10^5$ , число элементов разрешения в стробах  $N_2 = 10^3$ ,  $N_3 = 10^2$ . Зафиксируем частоту появления ложной трассы за один обзор  $f = 10^{-2}$ . На рис. 1 приведены графики вероятности правильного обнаружения трассы цели в зависимости от отношения сигнал/шум для различных алгоритмов. Как видно из рис. 1, наилучшим из предложенных вариантов является метод многообзорного накопления за три обзора. Его выигрыш, по сравнению с двумя обзорами, составляет 1 дБ для вероятности правильного обнаружения 0,5 и 1,6 дБ – для вероятности правильного обнаруже-

ния 0,8. Кроме этого, отметим, что выигрыш двухэтапного алгоритма, по сравнению с методом, основанным на ДП, для трех обзоров составляет 2,2 дБ для вероятности 0,5 и 3 дБ – для вероятности 0,8. Данные закономерности вполне объяснимы, так как улучшение характеристик происходит в основном за счет увеличения числа проверяемых гипотез. В этом смысле наиболее удобным является алгоритм двухэтапного многообзорного накопления, позволяющий находить компромисс между числом проверяемых гипотез и вероятностью правильного обнаружения.

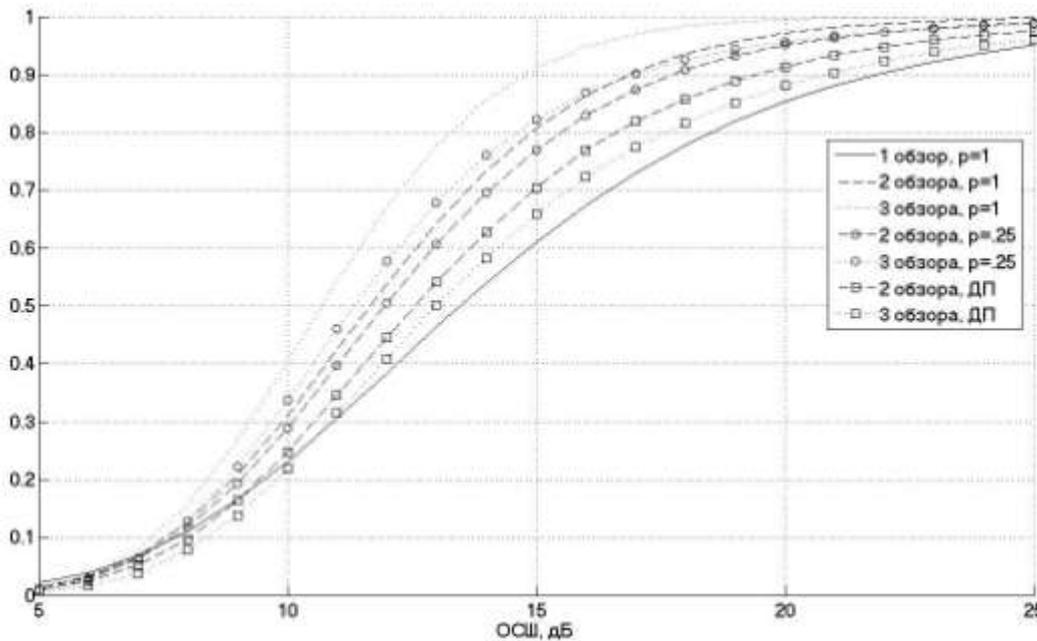


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум

### Выводы

В данной работе предложены алгоритмы обнаружения траектории цели, основанные на некогерентном накоплении. Первый алгоритм реализует проверку всех возможных траекторий движения цели. Для уменьшения числа проверяемых гипотез предложен двухэтапный метод обнаружения. Аналитически найдены статистические характеристики данных алгоритмов. Численный пример демонстрирует высокую эффективность предложенных методов. Сравнение проводилось с известным алгоритмом, основанным на ДП. В результате проведения анализа существующего и предложенных алгоритмов многообзорного обнаружения траектории показано, что улучшение статистических характеристик может быть достигнуто путем увеличения числа возможных гипотез. Таким образом, наиболее предпочтительными являются комбинированные методы, совмещающие в себе высокие показатели и малые вычислительные сложности.

### Библиографический список

1. **Tonissen, S.M.** Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect / S.M.Tonissen, R.J.Evans // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996. V. 32. № 4. P. 1440–1451.
2. **Johnston, L.A.** Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm / L.A.Johnston, V.Krishnamurthy // IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems, 2002. V. 38. № 1. P. 228–242.
3. **Buzzi, S.** Track-before-detect procedures for early detection of moving target from airborne radars/ S.Buzzi, M.Lops, L.Venturino// IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems, 2005. V. 41. No. 3. P. 937–954.

4. **Кричигин, А.В.** Метод двухэтапного многообзорного обнаружения траектории движущейся цели с некогерентным накоплением / А.В. Кричигин, Е.А. Маврычев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2007. № 4. С. 43–51.
5. **Ширман, Я.Д.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
6. **Левин, Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
7. **Тихонов, В.И.** Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Сов. радио, 1966. – 681 с.
8. **Янке, Е.** Специальные функции / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1964. – 344 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**A.V. Krichigin, E.A. Mavrychev**

### **MULTI-SCANNING DETECTION ALGORITHMS OF MOVING TARGET TRACK**

Detection algorithms of target track based on multi-scanning incoherent signal integration are proposed. Statistical characteristics of these methods such as probability of false track detection and probability of true track detection are obtained. Numerical results demonstrated high efficiency of proposed algorithms are presented.

*Key words:* trace detection, signal integration, false alarm probability, detection probability.

УДК 621.391.82

А.Д. Плужников, Е.Н. Приблудова

**УСКОРЕНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННОГО ОБЗОРА  
ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕШАЮЩИХ РЕВЕРБЕРАЦИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что ускоренное сканирование обеспечивает пространственное разрешение гидролокационных сигналов по дальности (в частности, при совпадении угловых координат объектов-переизлучателей) и пространственное подавление мешающих ревербераций.

*Ключевые слова:* малая скважность, сканирование по угловой координате, пассивные помехи, пространственно-временные сигналы, селекция сигналов на фоне помех, дальностно-угловая конверсия, постоянная Вудворда, апертура антенны, диаграмма направленности.

При исследованиях гидрофизических характеристик водной толщи океана посредством активной акустической локации чрезвычайно малые значения силы цели звукорассеивающих слоев и ограничения на пиковую мощность излучения обуславливают необходимость увеличения энергии зондирующих сигналов путем уменьшения их скважности. По аналогичным причинам необходимость уменьшения скважности зондирующих сигналов возникает при использовании акустической локации для решения задач морской картографии, когда поиск путей повышения производительности средств извлечения и обработки информации о природных подводных объектах (участках морского дна) приводит к необходимости их обнаружения и обследования на максимально возможных дальностях. Та же необходимость возникает и при гидролокационном обнаружении, а также идентификации подводных объектов искусственного происхождения. Среди таковых можно назвать, в частности, затонувшие объекты с экологически вредным содержанием (например, затонувшие контейнеры с отравляющими веществами, объекты с радиоактивными материалами).

Во всех указанных случаях уменьшение скважности зондирования ведет к тому, что слабые полезные сигналы (реверберации) от максимально удаленных рассеивающих слоев или подводных объектов действуют на судовую приемную аппаратуру одновременно с мощными пассивными помехами (мешающими реверберациями) от близко расположенных (на малых глубинах или малых наклонных дальностях) звукорассеивающих слоев водной толщи или участков морского дна. В итоге падает отношение сигнал-помеха на входе средств обработки гидроакустических сигналов, что препятствует достижению целей, преследуемых при уменьшении скважности зондирования.

В рассматриваемых условиях желательно было бы осуществить подавление мешающих ревербераций посредством пространственной обработки сигналов (с помощью приемной антенны). Однако такое подавление не осуществимо при отсутствии принципиальных возможностей пространственного разрешения ревербераций, возникающих на различных дальностях. Причем известная теория [1] не упоминает о подобных возможностях применительно к однопозиционным системам и в качестве единственного пути пространственного подавления пассивных помех предлагает расширение апертуры и сужение диаграммы направленности (ДН).

В итоге развития теории разрешения пространственно-временных сигналов традиционно формулируется, например, следующий вывод, обусловленный влиянием качества разрешения на эффективность селекции полезных сигналов, маскируемых пассивными помехами [1]: в случае равномерного пространственного распределения большого числа мешающих отражателей с широким разбросом их радиальных скоростей (делающим невозможным доп-

леровскую селекцию полезных сигналов) единственным средством борьбы с пассивными помехами является увеличение апертуры антенны (сужение ДН, т.е. уменьшение элемента разрешения, благодаря чему понижается мощность пассивных помех). Вместе с тем, согласно результатам [2, 3], возможно дополнительное пространственное (реализуемой антенной) подавление пассивных помех за счет увеличения скорости сканирования (обзора по угловой координате). Причем такое подавление, как и требуется, основано на различиях дальностей до мешающих отражателей и объекта, подлежащего обнаружению и наблюдению. Противоречие упомянутых результатов [1] и [2, 3] является кажущимся и обусловлено тем, что известная теория [1] разработана без учета сканирования. Далее приведены итоги ее развития и обобщения на режим сканирования. В частности, описаны новые возможности разрешения ревербераций и селекции сигналов с малой скважностью на фоне пассивных помех.

Согласно рекомендациям [4], рассмотрим линейную антенную систему, размещенную в плоскости обзора  $(\alpha, R)$ , который реализуется благодаря вращению системы в этой плоскости со скоростью  $\Omega$ , рад/с вокруг своего фазового центра. Здесь  $\alpha$  - угловая координата,  $R$  - радиальная координата (дальность), отсчитываемая от центра вращения. Начала отсчета текущего времени  $t$  и угла  $\alpha$  выбираем так, чтобы значение  $\Omega t$  данного угла определяло нормаль к раскрытию приемной антенны, перемещающуюся в плоскости обзора вследствие вращения антенны. Режим излучения локатора зададим рабочей длиной волны  $\lambda$ , нормированной комплексной огибающей  $v(t)$  зондирующего сигнала и нормированной ДН на излучение  $G_{b0}\{\varepsilon\}$  с главным максимумом на направлении  $\varepsilon = \varepsilon_{b0}$ , где  $\varepsilon = \alpha - \Omega t$  - угол, отсчитываемый в плоскости обзора от упомянутой нормали. Предположим, что  $x$  - координата вдоль раскрытия приемной антенны с апертурой  $\Pi$  и значение  $x = 0$  соответствует середине раскрытия (фазовому центру антенны).

Совокупность подходов [1] и [2, 5] позволяет определить пространственно-временной сигнал (значение комплексной огибающей напряженности поля в точке с координатой  $x$  в момент  $t$ ), переизлученный объектом с координатами  $\alpha + \dot{\alpha}t$  и  $R + \dot{R}t$ , а также со скоростями  $\dot{\alpha}$  и  $\dot{R}$  углового и радиального перемещений, соотношением

$$\begin{aligned}
 y_x(t) &= \mu' w(x) (R + \dot{R}t)^{-1} R_x^{-1} v\left(t - \frac{R + \dot{R}t + R_x}{c}\right) G_{b0}\left\{\left(\alpha + \dot{\alpha}t\right) - \right. \\
 &\quad \left. - \Omega\left(t - \frac{R + \dot{R}t + R_x}{c}\right)\right\} \exp\left\{-j2\pi \frac{R + \dot{R}t + R_x}{\lambda}\right\} \approx \\
 &\approx \mu'' R^{-2} w(x) \exp(j\omega t) v(t - t_R) G_{b0}\{\alpha - \Omega(t - t_R)\} \exp\left\{j2\pi \frac{x}{\lambda} (\alpha - \Omega t)\right\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где модуль правой части максимизируется в момент

$$t = t_{\max} \approx t_R + (\alpha - \varepsilon_{b0}) / \Omega; \quad (2)$$

$$t_R = 2R / c; \quad (3)$$

$\mu'$  и  $\mu''$  - комплексные константы;  $w(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x| \leq \Pi/2, \\ 0 & \text{при } |x| > \Pi/2; \end{cases}$

$R_x$  - расстояние от переизлучающего объекта до точки раскрытия с координатой  $x$ ;  $c$  - ско-

рость распространения акустической волны;  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\pi = 3,14\dots$ ,  $\omega = -4\pi\dot{R}/\lambda$  - доплеровское смещение частоты.

Последний экспоненциальный множитель (1) с учетом (2) и (3) показывает, что сканирование (при  $\Omega \neq 0$ ) обеспечивает дальностно-угловую конверсию, т.е. преобразование дальностных различий объектов в такие пространственные различия переизлученных сигналов, какие в отсутствие сканирования возникли бы лишь вследствие различий угловых координат объектов. Благодаря этому эффекту, не отмечавшемуся в известных работах, появляется возможность пространственного (основанного на различиях фазовых распределений поля по раскрытию антенны) разрешения сигналов, переизлученных с различных дальностей, даже при совпадении угловых координат объектов - переизлучателей. Заметим, что к аналогичным результатам приводит и анализ электронного сканирования при определении пространственно-временного сигнала, соответствующего выходам управляемых приемных фазовращателей антенной решетки.

Количественную характеристику выявленного ранее пространственного разрешения по дальности определим, обобщая на данный случай понятие постоянной разрешения Вудворда [5]:

$$\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} |\chi_0(0, t'_R, 0)|^2 dt'_R, \quad (4)$$

где интегрируется сечение тела, ограниченного в 4-мерном гиперпространстве квадратом модуля нормированной обобщенной [1] пространственно-временной функции корреляции

$$\chi_0(\alpha', t'_R, \omega') = \frac{\chi(\alpha', t'_R, \omega')}{\chi(0, 0, 0)}, \quad (5)$$

$$\chi(\alpha', t'_R, \omega') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y_x^*(t+t') y_x^0(t) dx dt, \quad (6)$$

где \* - знак комплексного сопряжения; опорный сигнал

$$y_x^0(t) = y_x(t) \Big|_{\text{при } \alpha=\alpha^0, R=R^0, \omega=\omega^0}, \quad (7)$$

$$\alpha' = \alpha - \alpha^0, t'_R = t_R - t_R^0, \omega' = \omega - \omega^0, t_R^0 = 2R^0/c; \quad (8)$$

$t'$  выбирается так, чтобы обеспечить временное совмещение пространственно-временных сигналов - сомножителей подынтегрального выражения (6), после чего их разрешение при  $\alpha' = 0$  и  $\omega' = 0$  реализуется лишь благодаря упомянутой дальностно-угловой конверсии. При сделанных допущениях соотношения (1)-(8) позволяют найти

$$\delta = \lambda \Pi^{-1} \Omega^{-1} \approx \theta_w \Omega^{-1}, \quad (9)$$

где  $\theta_w \approx \lambda \Pi^{-1}$  - ширина приемной ДН.

Для решения возникающей при малой скважности зондирования (см. ранее) или при непрерывном излучении задачи пространственной селекции сигнала с дальности  $R_s$  в усло-

виях временного наложения на него пассивных помех с дальностей  $R \ll R_s$  целесообразно потребовать

$$\delta \leq t_s = 2R_s / c. \quad (10)$$

Тогда из (9) следует необходимость повышенной скорости обзора, при которой

$$\Omega t_s \geq \theta, \quad (11)$$

т.е. угол смещения сканирующей ДН за время запаздывания сигнала превышает ширину ДН. Физический смысл такого результата пояснен в [2].

Таким образом, ускорение обзора по угловой координате обеспечивает дальностно-угловую конверсию, при которой реализуется пространственное разрешение сигналов, переизлученных с различных дальностей, даже при совпадении угловых координат объектов - переизлучателей, а также селекцию сигналов на фоне мешающих ревербераций при малой скважности зондирования или при непрерывном излучении. Согласно (9)–(11), качество пространственного разрешения и селекции сигналов на фоне мешающих ревербераций повышается не только при увеличении апертуры антенны или сужении ДН, что является известным результатом [1], но и при ускорении обзора. В этом смысле ускорение обзора эквивалентно увеличению апертуры и сужению ее диаграммы направленности.

#### Библиографический список

1. **Коростелев, А.А.** Пространственно-временная теория радиосистем: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
2. **Плужников, А.Д.** Пространственная обработка локационных сигналов на фоне пассивных помех / А.Д. Плужников, А.Г. Рындык // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 10. С. 2220–2223.
3. **Плужников А.Д.** Аналитическая оптимизация возбуждения антенной решетки при обнаружении радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех // Радиотехника и электроника.- 1991. Т. 36. № 12. С. 2412–2415.
4. **Гуткин, Л.С.** Проектирование радиосистем и радиоустройств: учеб. пособие для вузов / Л.С. Гуткин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
5. **Кук, Ч.** Радиолокационные сигналы. Теория и применение: пер. с англ. / Ч. Кук, М. Бернфельд; под ред. В.С. Кельзона. – М.: Советское радио, 1971. – 567 с.

Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010

**A.D. Pluzhnikov, E.N. Pribludova**

#### SONAR SCANNING RATE INCREASE WITH INTERFERING REVERBERATIONS

It is shown that an increased scanning rate provides the range resolution of sonar signals by spatial processing (in particular, with the equality of angular coordinates of the echo reflectors) and the spatial suppression of interfering reverberations.

*Key words:* small on-off time ratio, angular coordinate scanning, clutter, spatial-temporal signals, signal selection on the interference background, range-to-angle conversion, Woodward constant, antenna aperture, antenna pattern.

УДК 621.396.9

В.Р. Милов, В.Г. Баранов, Н.В. Новиков, В.В. Алексеев, А.А. Севрюков

**РАСЧЁТ ЗОН РАДИОПОКРЫТИЯ СЕТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ MAPINFO PROFESSIONAL**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, предназначенное для автоматизированного расчёта зон радиопокрытия базовых станций в системе профессиональной подвижной радиосвязи. Расчет основан на статистической модели напряженности поля принимаемого сигнала и включает два способа определения зон радиопокрытия. Исходными данными для расчета является информация, полученная с цифровых карт формата MapInfo, с их использованием также отображаются результаты расчета.

*Ключевые слова:* подвижная радиосвязь, зона радиопокрытия, геоинформационная система.

Один из основных этапов частотно-территориального планирования сетей подвижной, в том числе технологической, радиосвязи представляет расчёт зон радиопокрытия базовых станций. При планировании сетей подвижной связи зона радиопокрытия сети определяется как область географического района развертывания сети, в которой обеспечивается связь с заданным качеством обслуживания. Таким образом, зона радиопокрытия сети определяется как совокупность (объединение) зон радиопокрытия базовых станций.

При определении зон радиопокрытия базовых станций рассматриваются радиолинии от базовой станции (БС) к абонентской (АС) – «линия вниз» (нисходящая) и обратная радиолиния от абонентской станции к базовой – «линия вверх» (восходящая). Для этих радиолиний направления передачи информации и соответственно распространения радиоволн противоположно. Поскольку параметры приемников и передатчиков (такие, как высоты подвеса и диаграммы направленности антенн, мощности передатчиков и чувствительности приемников и др.) различны, то отличаются и зоны радиопокрытия, определяемые для этих направлений. При этом в качестве результирующих зон радиопокрытия принимаются области, в пределах которых обеспечивается требуемое качество связи для обоих направлений. Таким образом, результирующая зона радиопокрытия базовых станций представляет собой пересечение зон радиопокрытия, определенных для «линии вниз» и «линии вверх».

Разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение основывается на подходе [1, 3, 4], которой позволяет учитывать влияние рельефа местности на качество связи. При определении зоны радиопокрытия базовой станции рассматривается совокупность азимутальных направлений, каждое из которых образовано лучом, исходящим из точки, соответствующей местоположению БС. Совокупность точек рельефа на каждом из направлений определяет профиль местности. При этом описание каждой точки, наряду с информацией о местоположении (удалении точки от БС) и высоте местности, включает и дополнительные характеристики: наличие и тип лесного покрова, строения, суша или вода. Информация о рельефе может быть получена на основе бумажных либо электронных карт и представляет собой отдельную процедуру. В результате для каждого азимутального направления формируется совокупность точек, количество которых определяется пользователем. Характеристики промежуточных точек профиля местности при необходимости могут быть получены с помощью процедуры интерполяции.

Развиваются два способа определения зон радиопокрытия. Первый способ основан на использовании статистического подхода, предусматривающего определение для каждого азимутального направления граничной точки зоны радиопокрытия, в которой еще

обеспечивается заданная надежность связи. Границы зон радиопокрытия определяются посредством плавного соединения точек, соответствующих границам зон по каждому азимутальному направлению, в результате чего образуется замкнутая гладкая линия. При этом зоны радиопокрытия для больших значений надежности включаются в зоны, соответствующие меньшим значениям надежности.

Данный подход позволяет за счет учета специфики рельефа местности получить более точное представление зон радиопокрытия по сравнению с методом «средних радиусов», при котором зона радиопокрытия базовой станции представляется в виде круга, радиус которого соответствует заданному проценту глобальных зон с качественной связью на его границе. В то же время различия в качестве связи внутри найденной зоны радиопокрытия не определяются и не доступны для анализа, а надежность связи характеризует глобальную область местности.

Второй способ определения зон радиопокрытия основан на расчете надежности связи для каждой из точек (в пределах заданного расстояния) всех азимутальных направлений. В результате надежность связи определяется как функция от полярных координат, связанных с базовой станцией. При этом зона радиопокрытия находится как объединение элементарных локальных областей, для которых рассчитанная надежность связи превышает требуемую величину. В результате обнаруживаются локальные области с низкой надежностью связи, вызванные особенностями рельефа для отдельных трасс.

Формирование зоны радиопокрытия основано на указании требуемого значения надежности связи. В свою очередь, надежность связи, представляет собой вероятность обеспечения связи с заданными параметрами качества обслуживания. Абоненты системы подвижной радиосвязи могут перемещаться и занимать различное положение в пространстве. При этом условия распространения радиоволн и соответственно качества связи могут изменяться как во времени, так и в пространстве. Напряженность поля сигнала является случайной величиной как по местоположению, так и во времени, и приближенно описывается логарифмически нормальным законом. В качестве параметров распределения вероятностей напряженности поля сигнала используют [1, 3, 4] медианное значение напряженности поля сигнала и стандартное отклонение (дБ относительно медианы).

Для определения надежности связи находится вероятность того, что уровень полезного сигнала на входе приемника абонентской станции превышает минимальный уровень сигнала, необходимый для обеспечения требуемого качества связи (например, разборчивости речи). Другой аналогичный подход [3] основан на определении вероятности того, что напряженность поля сигнала в точке расположения приемника превышает минимальное значение напряженности поля сигнала, необходимое для обеспечения требуемого качества связи.

Минимальное значение напряженности поля либо минимальный уровень сигнала, необходимые для обеспечения требуемого качества связи, определяются параметрами приемника и для конкретного типа оборудования являются константами. Напряженность поля принимаемого сигнала, создаваемая источником мощностью 1 кВт при излучении полуволновым диполем, которая превышает в 50 % мест (в пределах любой зоны, приблизительно 200 x 200 м) для различного процента времени (50, 10, 5, 1 %) определяется «кривыми распространения» [4]:

$$E_0 = f_{50\%}(R, F_B, h_1, T_{\%}), \quad (1)$$

где  $R$  — длина трассы, км;  $F_B$  — рабочий диапазон частот, МГц;  $h_1$  — эффективная высота передающей антенны, м;  $T_{\%}$  — процент времени, в течение которого напряженность поля превышает прогнозируемый уровень.

Кривые распространения заданы для высоты приемной антенны 10 м и эффективных высот передающей антенны от 37,5 до 1200 м, где каждое последующее значение *эффективной высоты* равно удвоенному предыдущему. Для значений эффективной высоты, отличных от рассмотренных, рекомендуется применение линейной интерполяции двух кривых, соответствующих эффективным высотам непосредственно выше и ниже рассматриваемых.

мого значения. Кривые распространения для трасс, проходящих над поверхностью Земли, относятся к значению неравномерности рельефа  $\Delta h = 50$  м, которое обычно приближенно соответствует холмистой территории, имеющей место в Европе и Северной Америке. Часть кривых относятся к наземным трассам, другие — к трассам над морем (холодным или теплым). Кривые распространения [4] построены на основе данных, полученных в результате долгосрочных наблюдений, и могут рассматриваться как репрезентативные данные для усредненных климатических условий.

Напряженность поля для конкретной трассы определяется выражением

$$E_E = f_{50\%}(R, F_B, h_1, T_\%) + K_{L\%} + P_{EBS} + K_\Sigma, \quad (2)$$

где  $P_{EBS}$  — эффективная излучаемая мощность, дБкВт, определяемая суммой мощности передатчика, потерь в антенно-фидерном тракте и коэффициента усиления передающей антенны вдоль заданного направления;  $K_{L\%}$  — коэффициент, зависящий от процента пунктов (точек приема), для которых напряженность поля превысит прогнозируемый уровень, дБ;  $K_\Sigma$  — суммарный поправочный коэффициент, определяемый выражением

$$K_\Sigma = K_{\Delta h} + K_{h_2} + K_\theta + K_{\Delta N}, \quad (3)$$

где  $K_{\Delta h}$  — коэффициент, зависящий от степени неравномерности рельефа местности, дБ;  $K_{h_2}$  — коэффициент, зависящий от высоты приемной антенны и характера местности в зоне приема, дБ;  $K_\theta$  — коэффициент, зависящий от угла  $\vartheta$  просвета местности [дБ];  $K_{\Delta N}$  — коэффициент, учитывающий климатические зоны, дБ.

С учетом поправочных коэффициентов выражение (2) для напряженности поля, превышаемой в течении  $T_\%$  процентов времени и в  $L_\%$  пунктов приема, перепишем в виде

$$E_E = f_K(\mathbf{V}, \mathbf{C}, L_\%, T_\%), \quad (4)$$

где  $\mathbf{C}$  — вектор параметров, значения которых являются постоянными для конкретной базовой и абонентской станций (мощность передатчика, чувствительность приемника и др.);  $\mathbf{V}$  — вектор величин, значения которых изменяются в зависимости от местоположения АС. К этим величинам относятся длина трассы  $R$ , эффективная высота передающей антенны  $h_1$ , параметр неравномерности рельефа  $\Delta h$ .

После того, как в зависимости от характеристик приемника найдено минимальное значение напряженности поля сигнала  $E_{AS}$ , необходимое для обеспечения требуемого качества связи, можно записать уравнение

$$f_K(\mathbf{V}, \mathbf{C}, L_\%, T_\%) = E_{AS}. \quad (5)$$

При определении зон радиопокрытия на основе статистического подхода для каждого азимутального направления, определяемого углом  $\alpha$ , находится граничная точка зоны радиопокрытия, в которой еще обеспечивается заданная надежность связи. Для этого, задаваясь значениями  $L_\%$  и  $T_\%$ , из решения уравнения (5) для каждого  $\alpha_j$  находится дальность связи  $R_{грj}$  как граничное значение величины  $R$ , входящей в состав вектора  $\mathbf{V}$ .

При определении *секторных* зон радиопокрытия для каждой из точек (в пределах заданного расстояния) всех азимутальных направлений могут быть найдены величины  $L_\%$  и  $T_\%$ , которые удовлетворяют уравнению (5). При этом обычно задаются величиной  $L_\%$  и находят  $T_\%$ . Однако решение этого уравнения в общем случае затруднено, что связано с зада-

нием кривых распространения и соответственно функции  $f_K(\bullet)$  для конечного набора значений ряда аргументов (в том числе  $T\%$ ).

В связи с этим, для определения надежности связи предлагается подход [3], основанный на использовании кривых распространения для медианного значения напряженности поля сигнала, превышаемой в 50 % по месту и в 50 % по времени. Для определения квантилей распределения напряженности поля на основе медианного значения напряженности и стандартного отклонения (дБ относительно медианы) используются коэффициенты логарифмически нормального распределения  $K_0$ . В этом случае выражение (2) можно представить в виде

$$E_E = f_{50\%}(R, F, h_1, 50\%) + P_{EBS} + K_\Sigma - K_0(P_{nc})\sigma, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение сигнала, определяемое через стандартные отклонения сигнала по времени и месту. Коэффициент  $K_0$  связан табулированной функциональной зависимостью с надежностью связи  $P_{nc}$  по времени и месту.

С учетом (6) уравнение (5) примет вид

$$f_{50\%}(R, F, h_1, 50\%) + P_{EBS} + K_\Sigma - K_0(P_{nc})\sigma = E_{AS}. \quad (7)$$

Из решения этого уравнения для заданной надежности связи  $P_{nc}$  и каждого значения азимутального угла  $\alpha_j$ ,  $j = \overline{1, M}$  находятся граничные точки зоны радиопокрытия. Посредством плавного соединения этих точек определяется граница зоны радиопокрытия, рассчитанная на основе статистического подхода (первый способ).

При расчете характеристик связи для каждой из точек, находящихся на расстоянии  $R_i$ , всех азимутальных направлений  $\alpha_j$  из уравнения (7) находятся соответствующие значения надежности связи  $P_{ncij}$ . При этом зона радиопокрытия образуется объединением элементарных локальных областей, для которых рассчитанная надежность связи  $P_{ncij}$  превышает заданную величину (второй способ).

Программное обеспечение расчета и отображения зон радиопокрытия состоит:

- из подпрограммы расчета зон радиопокрытия базовых станций;
- подпрограммы отображения результатов расчета зон радиопокрытия базовых станций на цифровых картах формата MapInfo;
- подпрограммы оформления проектной документации, обеспечивающей автоматизацию отдельных промежуточных документов.

К основным функциональным возможностям подпрограммы расчета зон радиопокрытия базовых станций относятся установка параметров базовой станции, параметров абонентской станции, параметров расчета, формирование высотных отметок земли для заданных радионаправлений на основе обработки картографических данных, полученных с электронных карт, формирование данных о препятствиях для заданных радионаправлений на основе обработки информации о препятствиях, полученной с электронных карт, расчет зон радиопокрытия отдельной БС на основе статистической модели распространения радиоволн, расчет зон радиопокрытия отдельной БС на основе комбинирования статистической и детерминированной моделей распространения радиоволн, расчет зон радиопокрытия для линии вверх и линии вниз, отображение непрерывных и секторных зон радиопокрытия БС, сохранение результатов расчета зон радиопокрытия БС в файлы, создание и коррекция проекта, содержащего оглавление результатов расчетов для отдельных БС.

К основным функциональным возможностям подпрограммы отображения результатов расчета зон радиопокрытия базовых станций на цифровых картах формата MapInfo относятся экспорт данных о рельефе с электронных карт в формате MapInfo, экспорт данных о пре-

препятствиях с электронных карт в формате MapInfo, выбор цветовой палитры для отображения рассчитанных зон радиопокрытия, настройка градаций надежности для отображения, комбинирование зон радиопокрытия отдельных БС и формирование зоны радиопокрытия сети подвижной радиосвязи, отображение на цифровых картах MapInfo сплошных и секторных зон радиопокрытия, установка заданных масштабов цифровой карты, сохранение изображения зон с электронных карт.

Дополнительные возможности: нанесение на электронные карты MapInfo трассы газопровода, области покрытия вдоль газопровода, обрезка электронной карты, объединение нескольких электронных карт в одну, проверка на принадлежность базовой станции электронной карте, нанесение на электронные карты поясняющей информации.

К основным функциональным возможностям подпрограммы оформления проектной документации относятся загрузка данных о высотных отметках и препятствиях для заданных радионаправлений и автоматическая генерация по загруженным данным отчетного документа с необходимой структурой и форматом.

Расчет зон радиопокрытия начинается с экспорта данных о высотных отметках с электронных карт в формате MapInfo, а также экспорта данных о препятствиях с электронных карт в формате MapInfo. Далее вводятся координаты для установки БС, характеристики БС и АС, параметры и метод расчета, параметры радионаправлений для обработки картографических данных, производится импорт данных о препятствиях и высотных отметках. Далее производится расчет и отображение надежности связи и зон радиопокрытия в окне подпрограммы расчета зон радиопокрытия базовых станций, а также сохранение результатов расчета в файл проекта. Следующими шагами являются: установка настроек цветовой палитры и градаций надежности, выбор карты и проекта для отображения (электронная карта формата MapInfo), отображение зоны радиопокрытия сети подвижной радиосвязи, установка заданных масштабов электронной карты и сохранение изображения зоны радиопокрытия.

Процедура расчета основана на статистической модели напряженности поля сигнала, изложенной в рекомендации Международного союза электросвязи [4]. Расчет зон радиопокрытия базовых станций включает следующие этапы:

- определение эффективной мощности передатчика;
- расчет эффективной высоты антенны базовой станции;
- расчет поправки на снижение антенны абонентской станции;
- определение параметра неравномерности рельефа;
- расчет поправочных коэффициентов, входящих в состав (3);
- определение медианного значения минимальной напряженности поля;
- определение границ зон радиопокрытия.

С использованием алгоритмов расчета зон радиопокрытия разработано программное обеспечение, позволяющее в значительной степени автоматизировать процесс частотно-территориального планирования сетей технологической подвижной радиосвязи.

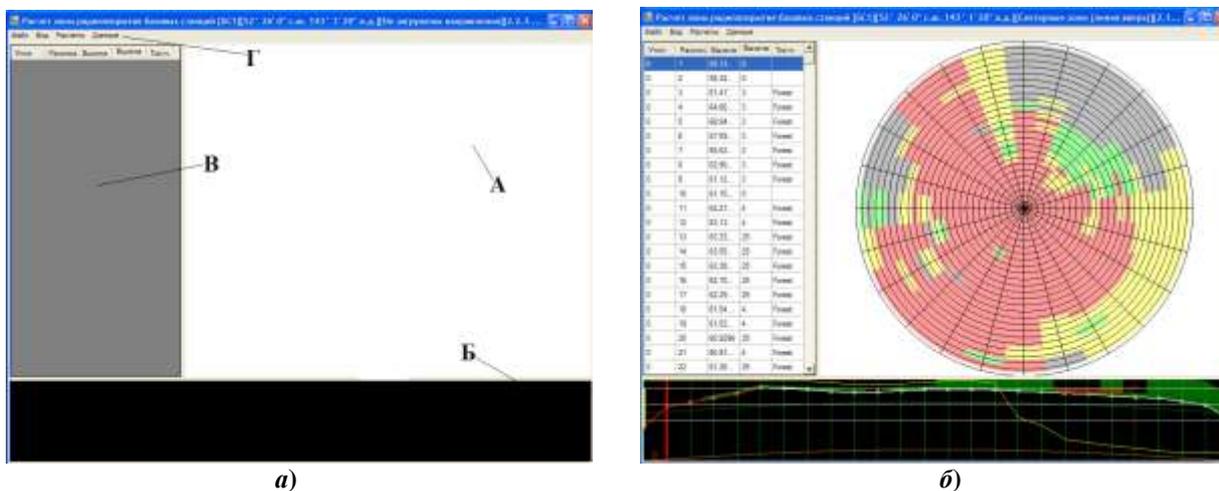
Основное окно (рис. 1, а) графического интерфейса пользователя состоит из четырех областей:

- А – область отображения картографической информации и результатов расчетов;
- Б – область профиля с изображением рельефа вдоль выбранного азимутального направления;
- В – область данных, содержит данные профилей рельефа местности;
- Г – строка меню.

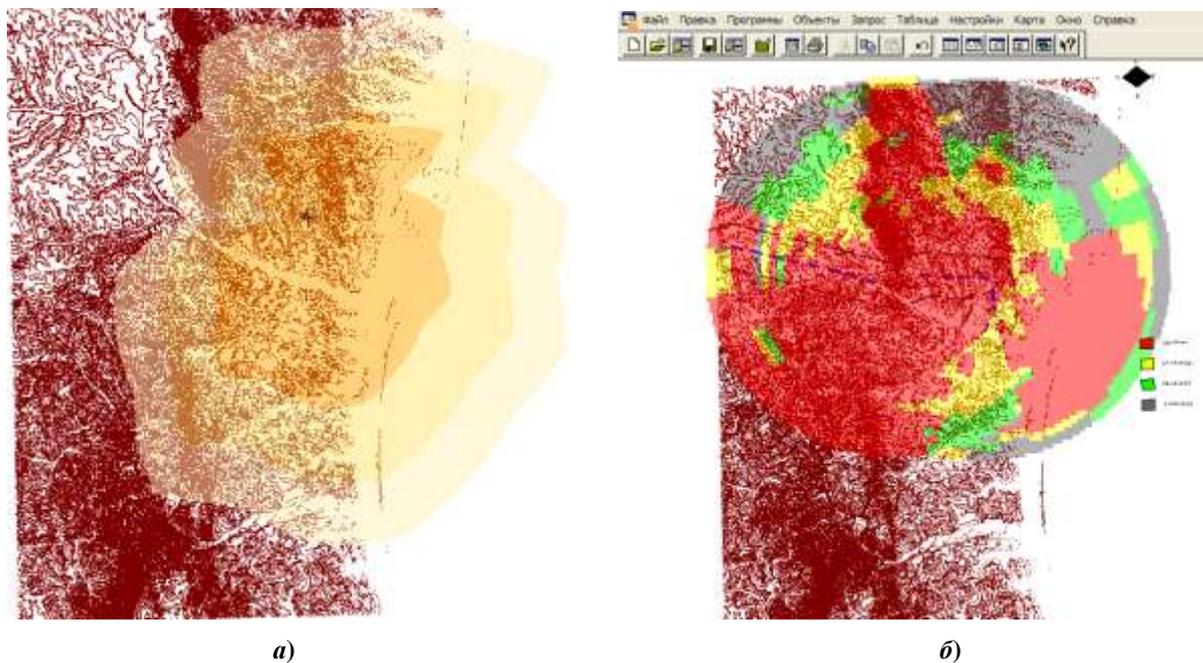
Окно программы расчета зон радиопокрытия с установленной БС и загруженными картографическими данными показано на рис. 1, б. Картографические данные представляются в полярной системе координат с центром в точке, соответствующей местоположению БС. Также при расчете зон радиопокрытия базовых станций учитываются характер и высота препятствий.

Результаты расчета сохраняются в файле проекта для их последующего отображения на электронных картах формата MapInfo.

В качестве примера отображения результатов расчета на электронных картах формата MapInfo на рис. 2, *а* представлены результаты расчета зон радиопокрытия для трех заданных значений надежности связи (способ 1). Результаты расчета секторных зон радиопокрытия (способ 2) представлены на рис. 2, *б*.



**Рис. 1. Интерфейс пользователя программы расчета зон радиопокрытия:**  
*а* – области основного окна; *б* – расчет зон радиопокрытия



**Рис. 2. Отображение зон радиопокрытия в MapInfo:**  
*а* – для заданных значений надежности связи; *б* – секторных зон радиопокрытия

Формирование достаточно эффективных технических решений по частотно-территориальному планированию систем подвижной радиосвязи возможно с использованием автоматизированных информационных систем, при этом достигаются уменьшение роли человеческого фактора, значительное сокращение трудоемкости и сроков выполнения проектов.

Разработанное программное обеспечение прошло тестирование и находит практическое применение. Использование программного продукта для расчётов зон радиопокрытия базовых станций обеспечивает повышение степени автоматизации процесса проектирования сетей технологической подвижной радиосвязи; способствует сокращению сроков выполнения проектов; экономии ресурсов за счет эффективного размещения базовых станций сети подвижной радиосвязи и выбора параметров технических средств. Отображение результатов расчета зон радиопокрытия базовых станций на цифровых картах MapInfo обеспечивает их эффективную визуализацию в процессе частотно-территориального проектирования, а также позволяет автоматизировать процесс подготовки проектной документации.

#### Библиографический список

1. **Бабков, В.Ю.** Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
2. **Бабков, В.Ю.** Качество услуг мобильной связи. Оценка, контроль и управление / В.Ю. Бабков, П.В. Полынцев, В.И. Устюжанин; под ред. А.А. Гоголя. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
3. **Тамаркин, В.М.** Транкинговые системы радиосвязи / В.М. Тамаркин [и др.] // Связь и бизнес. – М.: МЦНТИ, ООО "Мобильные коммуникации", 1997.
4. RECOMMENDATION ITU-R P. 370–7.
5. **Овчинников, А. М.** Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи / А. М. Овчинников, С. В. Воробьев, С. И. Сергеев // Связь и бизнес. – М.: МЦНТИ, ООО "Мобильные коммуникации", 2000.
6. **Новиков, Н.В.** Системно-сетевые расчеты показателей сети технологической подвижной радиосвязи // Газовая промышленность. 2009. № 6. С. 39–41.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**V.R. Milov, V.G. Baranov, N.V. Novikov, V.V. Alekseev, A.A. Sevryukov**

#### **CALCULATION OF RADIO COVERAGE ZONES OF MOBILE RADIO NETWORK USING MAPINFO PROFESSIONAL GEOINFORMATION SYSTEM**

Developed algorithms and software designed to automate the calculation of radio coverage zones of base stations in the system of professional mobile radiocommunication. The calculation is based on a statistical model of the field strength of the received signal, and includes two ways to determine the radio coverage zones. Initial data for the calculation is the information obtained from the MapInfo digital maps. Results of the calculation also display using it.

*Key words:* mobile radiocommunication, radio coverage zones, geographic information system.

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 532.5

Е.А. Рувинская<sup>1</sup>, О.Е. Куркина<sup>1,2</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>

### УТОЧНЕННОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ЭВОЛЮЦИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ТРЕХСЛОЙНОЙ СИММЕТРИЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)<sup>2</sup>

Рассматривается вопрос об уточнении модифицированного уравнения Кортевега-де Вриза с учетом членов высшего порядка малости для случая, когда коэффициент кубической нелинейности может менять знак, на примере внутренних гравитационных волн в трехслойной симметричной модели жидкости (верхний и нижний слои имеют равную толщину, скачки плотности на границах раздела слоев одинаковы).

*Ключевые слова:* нелинейные эволюционные уравнения, внутренние гравитационные волны.

Динамика внутренних гравитационных волн в океане вызывает особый интерес со стороны исследователей, поскольку и по сей день остается одной из наиболее интересных и в то же время малоисследованных областей механики жидкости и газа. Внутренние волны пронизывают всю толщу вод и играют важнейшую роль во всех динамических процессах Мирового Океана. Так, в шельфовых зонах океана они влияют на изменение рельефа дна путем транспорта наносов или размывов и, в связи с этим могут создавать угрозу для морских сооружений. Амплитуды внутренних волн в океане достигают порой сотен метров, что может быть опасно также для подводных лодок. Перемешивание вод разных температур после прохождения внутренних волн больших амплитуд может оказывать губительное влияние на морскую флору и фауну. Важным аспектом является и то, что внутренние волны могут участвовать в распространении загрязнений на большие расстояния (подобно течениям). Понимание механизмов такого воздействия невозможно без подробных исследований свойств внутренних волн, уточнения их характеристик, особенностей динамики при различных сочетаниях условий в среде.

Таким образом, очевидна важность исследования внутренних волн с точки зрения вопросов обеспечения экологической безопасности: при осуществлении оценочной деятельности в ходе разработки различных гидротехнических и береговых сооружений, переноса осадков и формирования донного и берегового рельефа прибрежной зоны океана, а также распространения загрязнений и примесей в океане.

С тех пор, как на рубеже XIX–XX вв. внутренние волны в океане были открыты экспедицией Нансена на «Фраме» и работой Экмана, объяснившего наблюдения мореплавателей, появилось множество подходов к изучению этого природного явления. В настоящее время продолжают развиваться как численные модели [1–4], так и слабонелинейная теория, позволяющая моделировать динамику внутренних гравитационных волн с помощью эволюционных уравнений, получаемых путем асимптотических разложений полной системы урав-

нений гидродинамики по малым параметрам нелинейности и дисперсии. Последний подход интересен тем, что показывает неплохую согласованность результатов моделирования с результатами натуральных и численных экспериментов, при этом не требует столь объемных вычислений, как в случае численного моделирования, и делает прозрачными связи между параметрами волн. Для применения слабонелинейной теории рассматриваются  $n$ -слойные «упрощенные» модели, среди которых наиболее хорошо изученной является двухслойная жидкость, для распространения внутренних волн в которой используется уравнение Гарднера [5–8]. Существуют также работы, посвященные исследованию внутренних волн в трехслойной среде (модифицированное уравнение Кортевега - де Вриза (мКдВ)) [9, 10], настоящая работа также развивает это направление. Рассматривается симметричная трехслойная жидкость. Для такой среды в силу симметрии коэффициент квадратичной нелинейности в слабонелинейных эволюционных уравнениях обращается в нуль, а коэффициент следующего по порядку члена кубической нелинейности может менять знак. Учет возможности смены знака коэффициента кубической нелинейности приводит к необходимости рассматривать расширение мКдВ, включающее нелинейные члены следующих порядков, для более точного описания волновых процессов.

Рассмотрим распространение внутренней волны на границах раздела слоев в трехслойной симметричной жидкости, ограниченной ровным плоским дном и абсолютно гладкой, неподвижной поверхностью.

Будем также считать, что относительный скачок плотности  $\Delta\rho$  мал (приближение Буссинеска):

$$\rho_3 = \rho - \Delta\rho, \quad \rho_2 = \rho, \quad \rho_1 = \rho + \Delta\rho,$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – плотности нижнего, среднего и верхнего слоев соответственно, поэтому в дальнейшем всеми членами  $O(\Delta\rho)$  можно пренебречь. Толщину нижнего и верхнего слоев обозначим  $h$ , полную глубину жидкости –  $H$ , нижнюю границу раздела –  $\eta(x, t)$ , верхнюю –  $\zeta(x, t)$  (рис. 1).

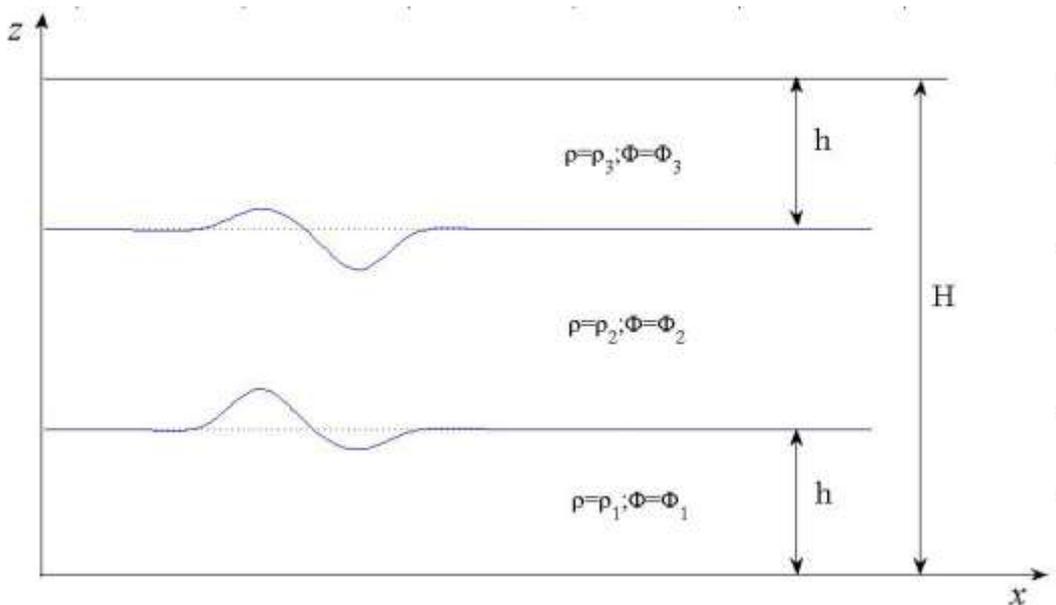


Рис. 1. Схема задачи

Стратифицированная жидкость по определению не является потенциальной [11]. Но мы схематизируем задачу, пренебрегая плавными изменениями плотности вне пикноклинов; для этого предположим, что толщина последних стремится к нулю. В этом случае мы имеем дело с тремя слоями разной плотности. Но тогда на границе раздела двух сред (верхнего и среднего слоя, среднего и нижнего слоя) так же, как и на границе вода-воздух, могут распро-

страняться гравитационные волны, обусловленные действием силы тяжести. Вне скачка жидкость однородна, и здесь можно ввести потенциал скорости. Тогда для каждого слоя справедливо уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \Phi_1 = 0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad \Phi_{1z}(z=0) = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 \Phi_2 = 0, \quad h \leq z \leq H-h, \quad (2)$$

$$\nabla^2 \Phi_3 = 0, \quad H-h \leq z \leq H, \quad \Phi_{3z}(z=H) = 0. \quad (3)$$

Граничное условие на поверхности ставится как условие твердой крышки, на дне – условие непротекания.

На границах раздела слоев запишем кинематические и динамические граничные условия, выполняющие роль условий «сшивки» для рассматриваемых функций.

На  $z = \eta(x, t)$  кинематическое граничное условие для нижнего и среднего слоя, а также динамическое граничное условие в силу уравнения Коши-Лагранжа примут вид

$$\left. \begin{aligned} \eta_t + \Phi_{1x} \eta_x - \Phi_{1z} &= 0, \\ \eta_t + \Phi_{2x} \eta_x - \Phi_{2z} &= 0, \\ \rho_1 \left( \Phi_{1t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi_1)^2 + g\eta \right) &= \rho_2 \left( \Phi_{2t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi_2)^2 + g\eta \right). \end{aligned} \right\} z = \eta(x, t) \quad (4)$$

Точно также можно записать кинематические и динамическое граничные условия для верхней границы раздела  $z = \zeta(x, t)$ :

$$\left. \begin{aligned} \zeta_t + \Phi_{2x} \zeta_x - \Phi_{2z} &= 0, \\ \zeta_t + \Phi_{3x} \zeta_x - \Phi_{3z} &= 0, \\ \rho_2 \left( \Phi_{2t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi_2)^2 + g\zeta \right) &= \rho_3 \left( \Phi_{3t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi_3)^2 + g\zeta \right). \end{aligned} \right\} z = \zeta(x, t) \quad (5)$$

Для перехода к асимптотической процедуре необходимо определить малые параметры системы, исходя из геометрии задачи и масштаба исследуемых явлений. В настоящей работе рассматриваются длинные волны, т.е. горизонтальный масштаб бассейна значительно превосходит вертикальный, в то же время амплитуды распространяющихся возмущений предполагаются малыми по сравнению с глубиной водоема. Тогда малые параметры нелинейности и дисперсии, исходя из условия задачи, вводятся следующим образом:  $\bar{\mu} = H/L$ ,  $\varepsilon = A/H$ ,  $\mu = \bar{\mu}^2$ .

В предположении стандартного масштабирования малых параметров ( $\varepsilon \sim \mu$ ) исходная система уравнений (1) – (5) преобразуется к виду

$$\Phi_{1z} + \varepsilon \Phi_{1x} = 0, \quad 0 \leq z \leq h, \quad \Phi_{1z}(z=0) = 0, \quad (6)$$

$$\Phi_{2z} + \varepsilon \Phi_{2x} = 0, \quad h \leq z \leq H-h, \quad (7)$$

$$\Phi_{3z} + \varepsilon \Phi_{3x} = 0, \quad H-h \leq z \leq H, \quad \Phi_{3z}(z=H) = 0. \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_t + \varepsilon \Phi_{1x} \eta_x - \Phi_{1z} &= 0, \\ \eta_t + \varepsilon \Phi_{2x} \eta_x - \Phi_{2z} &= 0, \\ \rho_1 \left( \Phi_{1t} + \frac{1}{2} \varepsilon (\Phi_{1x})^2 + \frac{1}{2} (\Phi_{1z})^2 + g\eta \right) &= \rho_2 \left( \Phi_{2t} + \frac{1}{2} \varepsilon (\Phi_{2x})^2 + \frac{1}{2} (\Phi_{2z})^2 + g\eta \right). \end{aligned} \right\} z = \eta(x, t) \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta_t + \varepsilon \Phi_{2x} \zeta_x - \Phi_{2z} &= 0, \\ \zeta_t + \varepsilon \Phi_{3x} \zeta_x - \Phi_{3z} &= 0, \\ \rho_2 \left( \Phi_{2t} + \frac{1}{2} \varepsilon (\Phi_{2x})^2 + \frac{1}{2} (\Phi_{2z})^2 + g\zeta \right) &= \rho_3 \left( \Phi_{3t} + \frac{1}{2} \varepsilon (\Phi_{3x})^2 + \frac{1}{2} (\Phi_{3z})^2 + g\zeta \right). \end{aligned} \right\} z = \zeta(x, t) \quad (10)$$

Граничные условия заданы на интерфейсах  $z = \eta(x, t)$  и  $z = \zeta(x, t)$ , которые являются неизвестными функциями и подлежат определению. В предположении малости амплитуд распространяющихся возмущений граничные условия могут быть сведены к более простому виду путем разложения всех неизвестных функций, в них входящих, в ряды Тейлора по малым отклонениям от невозмущенного уровня:

$$f(x, z = \eta|\xi, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^j \eta^j | \xi^j}{j!} \frac{\partial^j f}{\partial z^j} \Big|_{z=h, H-h}.$$

Следующий этап асимптотической процедуры – разложение неизвестных функций в ряды по малому параметру:

$$\eta = \varepsilon (\eta_1 + \varepsilon \eta_2 + \varepsilon^2 \eta_3 + \dots), \quad (11)$$

$$\zeta = \varepsilon (\zeta_1 + \varepsilon \zeta_2 + \varepsilon^2 \zeta_3 + \dots). \quad (12)$$

Нетрудно показать, что порядок малости потенциалов составляет  $\sqrt{\varepsilon}$ , поэтому

$$\Phi_i = \sqrt{\varepsilon} (\phi_{1(i)} + \varepsilon \phi_{2(i)} + \varepsilon^2 \phi_{3(i)} + \dots), \quad i = 1, 2, 3, \quad (13)$$

Завершающий этап – переход к медленному времени и медленной координате. Обозначим за  $c$  фазовую скорость длинных линейных волн (которую еще предстоит определить) и введем медленные переменные (согласно методу многих масштабов [12]):

$$\xi = \varepsilon^{1/2} (x - ct), \quad \tau = \varepsilon^{3/2} t. \quad (14)$$

Тогда производные будут иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial x} = \varepsilon^{1/2} \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = -\varepsilon^{1/2} c \frac{\partial}{\partial \xi} + \varepsilon^{3/2} \frac{\partial}{\partial \tau}. \quad (15)$$

Подставим ряды (11) – (13) в исходную систему уравнений (6) – (10) и, используя переменные (14), (15), перейдем к итерационной процедуре вывода.

На каждом  $i$ -м шаге выписываем уравнения (из (6)–(8)) относительно  $i$ -й поправки  $(\phi_{1(i)}, \phi_{2(i)}, \phi_{3(i)})$  для потенциалов  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  при текущей  $i$ -й степени  $\varepsilon$  в разложении. Выражаем  $\phi_{1(i)}, \phi_{2(i)}, \phi_{3(i)}$  (интегрируем). В силу того, что уравнения содержат вторые производные от  $\phi_{1(i)}, \phi_{2(i)}, \phi_{3(i)}$  (в (6)–(8) входят лапласианы от искомых функций  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ ), возникает две константы интегрирования (зависящие от медленного времени и координаты, так как интегрирование ведется по  $z$ ). «Старшая» константа (при первой степени  $z$ ) определяется следующим образом:

- для  $\phi_{1(i)}$  – из условия «непротекания» на этом шаге;
- для  $\phi_{3(i)}$  – из условия «твердой крышки» на этом шаге;
- для  $\phi_{2(i)}$  – из системы кинематических граничных условий для  $\Phi_2$  на этом шаге.

«Младшая» константа интегрирования (при  $z^0$ ) определяется на следующем шаге:

- для  $\phi_{1(i)}$  – из кинематического граничного условия для  $\Phi_1$ ;
- для  $\phi_{3(i)}$  – из кинематического граничного условия для  $\Phi_3$ ;
- для  $\phi_{2(i)}$  – из системы кинематических граничных условий для  $\Phi_2$ .

Из системы динамических граничных условий, в которые в силу конструкции уравнений входят поправки потенциалов с предыдущего шага, находим:

- связь между  $i$ -ми поправками к  $\eta(x, t)$  и  $\zeta(x, t)$ , т. е.  $\eta_i = f(\zeta_i)$  или наоборот;
- коэффициенты нелинейности, линейной и нелинейной дисперсии эволюционного уравнения для поправки  $i-1$  порядка к  $\eta(x, t)$  (либо к  $\zeta(x, t)$ ).

Таким образом, решая рекурсивно систему уравнений (6) – (10) с учетом (11) – (15) по описанному алгоритму, в нулевом порядке по  $\varepsilon$  определим квадрат фазовой скорости линейных волн  $c^2$ . Очевидно, что в рамках линейной задачи в рассматриваемой трехслойной среде существуют две волновые моды: симметричная (когда обе границы раздела отклоняются параллельно, в одну сторону  $\eta(x, t) = \zeta(x, t)$ ) и антисимметричная (когда границы раздела отклоняются на одинаковую величину, но в разных направлениях  $\eta(x, t) = -\zeta(x, t)$ ). В настоящей работе мы рассматриваем лишь первую из этих мод, поэтому выбираем только один из возможных вариантов для фазовой скорости линейных волн:

$$c^2 = \frac{gh\Delta\rho}{\rho}. \tag{16}$$

В следующих порядках получим уравнения

$$\varepsilon : \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix}_\tau + \alpha \begin{pmatrix} \zeta_1 \zeta_{1\xi} \\ \eta_1 \eta_{1\xi} \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix}_{\xi\xi\xi} = 0, \tag{17}$$

$$\varepsilon^2 : \begin{pmatrix} \zeta_2 \\ \eta_2 \end{pmatrix}_\tau + \alpha \begin{pmatrix} \zeta_1 \zeta_2 \\ \eta_1 \eta_2 \end{pmatrix}_\xi + \beta \begin{pmatrix} \zeta_2 \\ \eta_2 \end{pmatrix}_{\xi\xi\xi} + \alpha_1 \begin{pmatrix} \zeta_1^2 \zeta_{1\xi} \\ \eta_1^2 \eta_{1\xi} \end{pmatrix} + \beta_1 \begin{pmatrix} \zeta_1 \\ \eta_1 \end{pmatrix}_{5\xi} + \gamma_1 \begin{pmatrix} \zeta_1 \zeta_{1\xi\xi\xi} \\ \eta_1 \eta_{1\xi\xi\xi} \end{pmatrix} + \gamma_2 \begin{pmatrix} \zeta_{1\xi} \zeta_{1\xi\xi} \\ -\eta_{1\xi} \eta_{1\xi\xi} \end{pmatrix} = 0, \dots$$

Однако в конечном итоге необходимо получить уравнение относительно неизвестных функций  $\eta(x,t)$  для нижней и  $\zeta(x, t)$  для верхней границ раздела. Обратившись к рядам (11) и (12), можно записать следующие выражения (на примере  $\eta(x,t)$ ) для слагаемых, входящих в уравнения (17), через искомую функцию:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \varepsilon \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \varepsilon^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial t} + \dots \right), \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} &= \varepsilon \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \varepsilon^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} + \dots \right), \\ \frac{\partial^n \eta}{\partial x^n} &= \varepsilon \left( \frac{\partial^n \eta_1}{\partial x^n} + \varepsilon \frac{\partial^n \eta_2}{\partial x^n} + \varepsilon^2 \frac{\partial^n \eta_3}{\partial x^n} + \dots \right), \\ \eta \frac{\partial \eta}{\partial x} &= \varepsilon^2 (\eta_1 + \varepsilon \eta_2 + \varepsilon^2 \eta_3 + \varepsilon^3 \eta_4 + \dots) \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \varepsilon^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} + \varepsilon^3 \frac{\partial \eta_4}{\partial x} + \dots \right) = \\ &= \varepsilon^2 \left[ \eta_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \left( \eta_2 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \eta_1 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right) + \varepsilon^2 \left( \eta_3 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \eta_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \eta_1 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} \right) + \dots \right], \\ \eta^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} &= \varepsilon^3 (\eta_1 + \varepsilon \eta_2 + \varepsilon^2 \eta_3 + \varepsilon^3 \eta_4 + \dots)^2 \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \varepsilon^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} + \varepsilon^3 \frac{\partial \eta_4}{\partial x} + \dots \right) = \\ &= \varepsilon^3 \left[ \eta_1^2 + 2\varepsilon \eta_1 \eta_2 + \varepsilon^2 (\eta_2^2 + 2\eta_1 \eta_3) + 2\varepsilon^3 (\eta_1 \eta_4 + \eta_2 \eta_3) + \dots \right] \left( \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \varepsilon^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} + \varepsilon^3 \frac{\partial \eta_4}{\partial x} + \dots \right) = \\ &= \varepsilon^3 \left[ \eta_1^2 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \varepsilon \left( \eta_1^2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + 2\eta_1 \eta_2 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right) + \varepsilon^2 \left( (\eta_2^2 + 2\eta_1 \eta_3) \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \eta_1^2 \frac{\partial \eta_3}{\partial x} + 2\eta_1 \eta_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right) + \dots \right], \end{aligned} \tag{18}$$

и т.д.

Выписывая аналогичные ряды для всех слагаемых всех порядков, входящих в уравнения (17), с такой точностью по  $\varepsilon$ , чтобы обеспечить корректность уравнения, и складывая все уравнения (17) до нужного порядка включительно, в полученном суммарном уравнении выделим эти комбинации, приводя все слагаемые к виду рядов для  $\eta$  и  $\zeta$ , которые даны ранее.

Таким образом, получим обобщенное уравнение Кортевега-де Вриза для верхнего и нижнего интерфейсов (в исходных переменных):

$$\begin{aligned}
 & \left( \zeta \right)_t + c \left( \zeta \right)_x + \alpha \left( \zeta \zeta_x \right) + \beta \left( \zeta \right)_{xxx} + \alpha_1 \left( \zeta^2 \zeta_x \right) + \beta_1 \left( \zeta \right)_{5x} + \gamma_1 \left( \zeta \zeta_{xxx} \right) + \gamma_2 \left( \zeta_x \zeta_{xx} \right) + \\
 & + \alpha_2 \left( \zeta^3 \zeta_x \right) + \beta_2 \left( \zeta \right)_{7x} + \gamma_{21} \left( \zeta_{xx} \zeta_{xxx} \right) + \gamma_{22} \left( \zeta_x \zeta_{xxxx} \right) + \gamma_{23} \left( \zeta \zeta_{5x} \right) + \gamma_{31} \left( \zeta_x \right)^3 + \\
 & + \gamma_{32} \left( \zeta \zeta_x \zeta_{xx} \right) + \gamma_{33} \left( \zeta^2 \zeta_{xxx} \right) + \alpha_3 \left( \zeta^4 \zeta_x \right) + \beta_3 \left( \zeta \right)_{9x} + \gamma_{41} \left( \zeta_x \zeta_{6x} \right) + \gamma_{42} \left( \zeta_{xx} \zeta_{5x} \right) + \\
 & + \gamma_{43} \left( \zeta_{xxx} \zeta_{xxx} \right) + \gamma_{51} \left( \zeta \zeta_{xx} \zeta_{xxx} \right) + \gamma_{52} \left( \int \zeta_x \zeta_{xx} \zeta_{xxx} dx \right) + \gamma_{53} \left( \zeta \zeta_x \zeta_{xxx} \right) + \gamma_{54} \left( \zeta^2 \zeta_{5x} \right) + \\
 & + \gamma_{55} \left( \zeta_x^2 \zeta_{xxx} \right) + \gamma_{56} \left( \zeta_x \zeta_{xx}^2 \right) + \gamma_{61} \left( \zeta \zeta_x^3 \right) + \gamma_{62} \left( \zeta^2 \zeta_x \zeta_{xx} \right) + \gamma_{63} \left( \zeta^3 \zeta_{xxx} \right) = 0. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Коэффициенты уравнения (19) могут быть выписаны в безразмерном виде как функции параметра  $l = h/H$ :

$$\begin{aligned}
 \alpha &= 0, \quad \frac{\beta}{cH^2} = -\frac{(4l-3)l}{12}, \quad \frac{\alpha_1}{c} H^2 = -\frac{3(26l-9)}{8l^3}, \quad \frac{\beta_1}{cH^4} = \frac{(16l^3-45l+30)l}{1440}, \\
 \gamma_1 &= 0, \quad \frac{\gamma_2}{cH} = \frac{3(8l^2-10l+3)}{8l}, \quad \frac{\alpha_2}{c} H^3 = \frac{9(52l^2-44l+9)}{16l^5}, \\
 \frac{\beta_2}{cH^6} &= -\frac{c(320l^5-1008l^4+1260l^3-945l^2+630l-252)l}{120960}, \\
 \frac{\gamma_{21}}{cH^3} &= -\frac{(256l^4-200l^3-198l^2+231l-57)}{96l}, \\
 \frac{\gamma_{22}}{cH^3} &= -\frac{(352l^4-704l^3+486l^2-123H^3l+6)}{192l}, \quad \gamma_{23} = 0, \\
 \frac{\gamma_{31}}{c} &= \frac{(40l^3+726l^2-819l+207)}{96l^3}, \quad \frac{\gamma_{32}}{c} = \frac{(1912l^3-678l^2-927l+342)}{96l^3}, \\
 \frac{\gamma_{33}}{c} &= \frac{(952l^3-1110l^2+369l-36)}{96l^3}, \quad \frac{\alpha_3}{c} H^4 = -\frac{9(1324l^3-1508l^2+513l-45)}{128l^7}, \\
 \frac{\beta_3}{cH^8} &= -\frac{(17152l^7-76800l^6+151200l^5-171360l^4+121275l^3+56700l^2+21420l-6120)l}{29030400}, \\
 \frac{\gamma_{41}}{cH^5} &= \frac{(11264l^6-33376l^5+37824l^4-19350l^3+4335l^2-684l+180)}{34560l}, \quad (20) \\
 \frac{\gamma_{42}}{cH^5} &= \frac{(5504l^6+4192l^5-40152l^4+55030l^3-31005l^2+7218l-444)}{11520l},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_{43}}{cH^5} &= -\frac{(4864l^6 - 14240l^5 + 7968l^4 + 13578l^3 - 21219l^2 + 10809l - 1926)}{6912l}, \\ \frac{\gamma_{51}}{cH^2} &= -\frac{(16544l^5 - 18784l^4 + 16842l^3 - 25377l^2 + 18504l - 3996)}{2304l^3}, \\ \frac{\gamma_{52}}{cH^2} &= -\frac{3(32l^3 - 64l^2 + 42l - 9)}{256l}, \\ \frac{\gamma_{53}}{cH^2} &= -\frac{(56864l^5 + 93936l^4 - 330570l^3 + 26485l^2 - 76320l + 6804)}{11520l^3}, \\ \frac{\gamma_{54}}{cH^2} &= -\frac{(48672l^5 - 94256l^4 + 64590l^3 - 18255l^2 + 2430l - 216)}{11520l^3}, \\ \frac{\gamma_{55}}{cH^2} &= \frac{(189280l^5 - 646880l^4 + 743190l^3 - 334395l^2 + 33030l + 6804)}{11520l^3}, \\ \frac{\gamma_{56}}{cH^2} &= \frac{(121120l^5 - 275560l^4 + 152040l^3 + 70800l^2 - 91035l + 20844)}{5760l^3}, \\ \frac{\gamma_{61}}{c}H &= -\frac{(1424l^4 + 332l^3 - 3444l^2 + 2271l - 405)}{64l^5}, \\ \frac{\gamma_{62}}{c}H &= -\frac{(10928l^4 - 11476l^3 - 192l^2 + 2787l - 594)}{128l^5}, \\ \frac{\gamma_{63}}{c}H &= -\frac{(1904l^4 - 3172l^3 + 1848l^2 - 441l + 36)}{64l^5}. \end{aligned}$$

Уравнение (19) соответствует случаю, когда эффекты слабой нелинейности и дисперсии оказываются одного порядка малости, т.е., как уже отмечалось,  $\varepsilon \sim \mu$ . Обращение в ноль коэффициента квадратичной нелинейности нарушает классическую иерархию малых членов асимптотического разложения. В этом случае стандартное масштабирование уравнения Кортевега-де Вриза  $\varepsilon \sim \mu$  требует модификации  $\varepsilon^2 \sim \mu$  для учета дисперсионных и нелинейных эффектов в одном порядке, при этом должна возрасти роль следующих по нелинейности членов в асимптотическом разложении волнового поля. Для того, чтобы выполнить модифицированное масштабирование, перепишем уравнение (19) в переменных  $\tilde{\eta} = \varepsilon\eta$ ,  $\tilde{\zeta} = \varepsilon\zeta$ ,  $\tilde{x} = \bar{\mu}x$ ,  $\tilde{t} = \bar{\mu}t$  (знаки «тильда» опускаем):

$$\begin{aligned} &\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_t + c\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_x + \varepsilon\alpha\left(\frac{\zeta\zeta_x}{\eta\eta_x}\right) + \mu\beta\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_{xxx} + \\ &+ \varepsilon^2\alpha_1\left(\frac{\zeta^2\zeta_x}{\eta^2\eta_x}\right) + \mu^2\beta_1\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_{5x} + \varepsilon\mu\left(\gamma_1\left(\frac{\zeta\zeta_{xxx}}{\eta\eta_{xxx}}\right) + \gamma_2\left(\frac{\zeta_x\zeta_{xx}}{-\eta_x\eta_{xx}}\right)\right) + \\ &+ \varepsilon^3\alpha_2\left(\frac{\zeta^3\zeta_x}{-\eta^3\eta_x}\right) + \mu^3\beta_2\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_{7x} + \varepsilon\mu^2\left(\gamma_{21}\left(\frac{\zeta_{xx}\zeta_{xxx}}{\eta_{xx}\eta_{xxx}}\right) + \gamma_{22}\left(\frac{\zeta_x\zeta_{xxx}}{\eta_x\eta_{xxx}}\right) + \gamma_{23}\left(\frac{\zeta\zeta_{5x}}{\eta\eta_{5x}}\right)\right) + \\ &+ \varepsilon^2\mu\left(\gamma_{31}\left(\frac{\zeta_x}{\eta_x}\right)^3 + \gamma_{32}\left(\frac{\zeta\zeta_x\zeta_{xx}}{\eta\eta_x\eta_{xx}}\right) + \gamma_{33}\left(\frac{\zeta^2\zeta_{xxx}}{\eta^2\eta_{xxx}}\right)\right) + \varepsilon^4\alpha_3\left(\frac{\zeta^4\zeta_x}{\eta^4\eta_x}\right) + \mu^4\beta_3\left(\frac{\zeta}{\eta}\right)_{9x} + \\ &+ \varepsilon\mu^3\left(\gamma_{41}\left(\frac{\zeta_x\zeta_{6x}}{-\eta_x\eta_{6x}}\right) + \gamma_{42}\left(\frac{\zeta_{xx}\zeta_{5x}}{-\eta_{xx}\eta_{5x}}\right) + \gamma_{43}\left(\frac{\zeta_{xxx}\zeta_{xxx}}{-\eta_{xxx}\eta_{xxx}}\right)\right) + \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 & + \varepsilon^2 \mu^2 \left( \gamma_{51} \left( \frac{\zeta \zeta_{xx} \zeta_{xxx}}{\eta \eta_{xx} \eta_{xxx}} \right) + \gamma_{52} \left( \int \zeta_x \zeta_{xx} \zeta_{xxx} dx \right) + \gamma_{53} \left( \frac{\zeta \zeta_x \zeta_{xxx}}{\eta \eta_x \eta_{xxx}} \right) + \gamma_{54} \left( \frac{\zeta^2 \zeta_{5x}}{\eta^2 \eta_{5x}} \right) + \gamma_{55} \left( \frac{\zeta_x^2 \zeta_{xxx}}{\eta_x^2 \eta_{xxx}} \right) + \right. \\
 & \left. + \gamma_{56} \left( \frac{\zeta_x \zeta_{xx}^2}{\eta_x \eta_{xx}^2} \right) \right) + \varepsilon^3 \mu \left( \gamma_{61} \left( \frac{\zeta \zeta_x^3}{-\eta \eta_x^3} \right) + \gamma_{62} \left( \frac{\zeta^2 \zeta_x \zeta_{xx}}{-\eta^2 \eta_x \eta_{xx}} \right) + \gamma_{63} \left( \frac{\zeta^3 \zeta_{xxx}}{-\eta^3 \eta_{xxx}} \right) \right) = 0.
 \end{aligned}$$

Применяя в (21) соотношение между малыми параметрами  $\varepsilon^2 = \mu$ , получим гораздо более простое уравнение:

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)_t + \alpha_1 \left( \frac{\zeta^2 \zeta_x}{\eta^2 \eta_x} \right) + \beta \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)_{xxx} + \\
 & + \varepsilon \left( \alpha_2 \left( \frac{\zeta^3 \zeta_x}{-\eta^3 \eta_x} \right) + \gamma_2 \left( \frac{\zeta_x \zeta_{xx}}{-\eta_x \eta_{xx}} \right) \right) + \\
 & + \varepsilon^2 \left( \alpha_3 \left( \frac{\zeta^4 \zeta_x}{\eta^4 \eta_x} \right) + \gamma_{31} \left( \frac{\zeta_x^3}{\eta_x^3} \right) + \gamma_{32} \left( \frac{\zeta \zeta_x \zeta_{xx}}{\eta \eta_x \eta_{xx}} \right) + \gamma_{33} \left( \frac{\zeta^2 \zeta_{xxx}}{\eta^2 \eta_{xxx}} \right) + \beta_1 \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)_{5x} \right) + O(\varepsilon^3) = 0,
 \end{aligned} \tag{22}$$

где коэффициенты также определяются формулами (20).

Уравнение (22) выведено здесь для уточнения описания волновой динамики в тех случаях, когда коэффициент квадратичной нелинейности обращается в ноль, а коэффициент кубической нелинейности имеет значения, близкие к нулю, т.е. при соотношении толщин слоев, близком к  $h/H = 9/26$ . Проанализируем поведение коэффициентов уравнения (22). Графики зависимостей безразмерных величин коэффициентов от толщины верхнего и нижнего слоев в симметричной жидкости показаны на рис. 2. Как видно из рис. 2, коэффициент  $\alpha_2$  слагаемого нелинейности четвертой степени также может менять знак в окрестности указанной точки, и только коэффициент нелинейности пятой степени  $\alpha_3$  всюду отрицателен. Коэффициенты дисперсии  $\beta$ ,  $\beta_1$  и нелинейной дисперсии  $\gamma_2$  всюду положительны на области определения, а коэффициенты слагаемых нелинейной дисперсии  $\gamma_{31}$ ,  $\gamma_{32}$ ,  $\gamma_{33}$  имеют по одной точке смены знака, не совпадающей с  $h/H = 9/26$ .

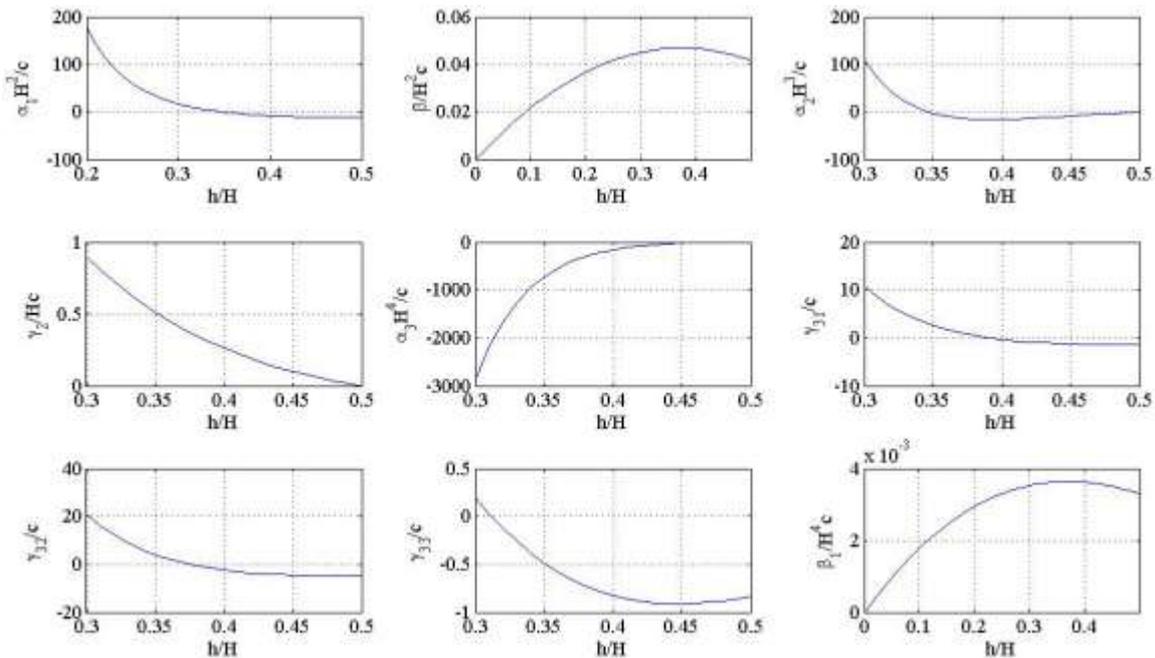


Рис. 2. Поведение коэффициентов расширенного уравнения Кортевега-де Вриза в зависимости от соотношения толщин слоев

Для более детального анализа разложим выражения для коэффициентов уравнения (21) в ряд Тейлора в окрестности точки  $h = 9/26 H$  ( $\Delta = l - 9/26$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{cH^2} &= \frac{63}{1352} + \frac{1}{52}\Delta + O(\Delta^2), \\ \frac{\alpha_2 H^3}{c} &= \frac{5940688}{6561}\Delta + O(\Delta^2), \quad \frac{\gamma_2}{cH} = \frac{7}{13} - \frac{115}{18}\Delta + O(\Delta^2), \\ \frac{\alpha_3 H^4}{c} &= -\frac{47411260}{59049} + \frac{1208410197}{531441}\Delta + O(\Delta^2), \\ \frac{\gamma_{31}}{c} &= \frac{1483}{486} - \frac{298285}{2916}\Delta + O(\Delta^2), \quad \frac{\gamma_{32}}{c} = \frac{2341}{486} - \frac{641017}{2916}\Delta + O(\Delta^2), \\ \frac{\gamma_{33}}{c} &= -\frac{109}{243} - \frac{30589}{2916}\Delta + O(\Delta^2), \quad \frac{\beta_1}{cH^4} = \frac{66291}{18279040} + \frac{1099}{1054560}\Delta + O(\Delta^2). \end{aligned}$$

Тогда расширенное модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза (22) в окрестности точки  $h = 9/26 H$  принимает вид

$$\begin{aligned} \left(\zeta\right)_t + \frac{63H^2c}{1352}\left(\zeta\right)_{xxx} + \varepsilon \frac{7Hc}{13}\left(\zeta_x\zeta_{xx}\right) + \varepsilon^2\left(-\frac{47411260c}{59049H^4}\left(\zeta^4\zeta_x\right) + \frac{1483}{486}c\left(\zeta_x^3\right) + \right. \\ \left. + \frac{2341}{486}c\left(\zeta\zeta_x\zeta_{xx}\right) - \frac{109}{243}c\left(\zeta^2\zeta_{xxx}\right) + \frac{66291H^4c}{18279040}\left(\zeta\right)_{5x}\right) + O(\varepsilon^3) = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Уравнение (23) уточняет характер волновой динамики вблизи точки нулевой кубической нелинейности за счет нелинейных дисперсий следующих порядков и нелинейности пятого порядка.

### Выводы

Предлагается нелинейно-дисперсионная теория внутренних гравитационных волн малой, но конечной амплитуды, распространяющихся на границах раздела слоев в трехслойной симметричной жидкости. В основе теории лежит асимптотическая процедура разложения гидродинамических полей в уравнениях идеальной слоистой вертикально-однородной несжимаемой жидкости в ряды по малым параметрам нелинейности и дисперсии. В результате временная эволюция волнового поля и трансформация его вдоль координаты распространения описываются нелинейным эволюционным уравнением второго порядка точности относительно малых параметров. В первом порядке по нелинейности и дисперсии полученное уравнение совпадает с широко известным модифицированным уравнением Кортевега-де Вриза. Полученное уравнение позволяет более точно описывать внутренние волновые поля и должно рассматриваться для симметричных сред, параметры которых обеспечивают близкие к нулю значения коэффициента кубической нелинейности.

Представленные результаты получены в рамках реализации мероприятия «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-846.2009.1) и докторов наук (МД-99.2010.5), и РФФИ 10-05-00199а.

## Библиографический список

1. **Канарская, Ю. В.** Негидростатическая модель стратифицированных течений со свободной поверхностью: дисс. ... канд. физ.-мат. наук, 01.02.05 / Канарская Ю.В. // Киев, 2004. 126 с.
2. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 733 с.
3. **Пелиновский, Е.Н.** Нелинейные эволюционные уравнения / Е.Н. Пелиновский, В.Е. Фридман, Ю.К. Энгельбрехт. – Таллин, Валгус, 1984. – 154 с.
4. **Талипова, Т.Г.** Влияние кубической нелинейности на трансформацию интенсивных внутренних волн / Т.Г. Талипова [и др.] // Доклады Российской Академии наук. 1999. 364. № 6. С. 824–827.
5. **Clarke, S.** On the generation of solitons and breathers in the modified Korteweg – de Vries equation / S. Clarke [at al.] // Chaos. 2000. 10. No. 2. P. 383–392.
6. **Grue, J.** A method for computing unsteady fully nonlinear interfacial waves / Grue J., Friis, A., Palm, E. and Rupas, P.-O. // J. Fluid Mech. 1997. V. 351. P. 223.
7. **Kakutani, T.** Solitary waves on a two-layer fluid / T. Kakutani, N. and Yamasaki // J. Phys. Soc. Japan. 1978. V. 45. P. 674–679.
8. **Koop, C.G.** An investigation of internal solitary waves in two-fluid system / C.G. Koop, and Butler, G. // J. Fluid Mech. 1981. V. 112. P. 225–251.
9. **Lamb, K.** Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // J. Geoph. Res. 1994. V. 99. C1. P. 843–864.
10. **Miles, J.W.** On internal solitary waves // Tellus, 1979. V. 31. P. 456–462.
11. **Miles, J.W.** On internal solitary waves // Tellus, 1981. V. 33. P. 397–401.
12. **Vlasenko, V.** Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude. / V. Vlasenko [at al.] // Deep-Sea Research I. 2003. V. 50. P. 317–338.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**Е.А. Rouvinskaya, О.Е. Kurkina, А.А. Kurkin**

**IMPROVED NONLINEAR EVOLUTIONARY EQUATION  
FOR INTERFACIAL GRAVITY WAVES  
IN A SYMMETRIC THREE-LAYER FLUID**

In the present study we derive the improved modified Korteweg-de Vries equation of higher-order in small parameters of nonlinearity and dispersion for the specific case when the coefficient of cubic nonlinear term can change its sign. Such a situation is considered for the example of interfacial gravity waves in a symmetric three-layer fluid (when the upper and lower layers have equal widths and small density jumps on the interfaces are equal).

*Key words:* nonlinear evolutionary equations, interfacial gravity waves.

УДК 537.86

Е.М. Громов, В.В. Тютин, В.П. Морозов

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРОТКИХ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ВЕКТОРНЫХ СОЛИТОНОВ В СРЕДАХ СО СМЕЩЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ (АДИАБАТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ)**

Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)

Рассмотрено взаимодействие однокомпонентных (взаимно ортогональных) векторных солитонов малой протяженности (длительностью в несколько длин волн) в анизотропных средах при учете смещения дисперсии. Рассмотрение проведено в рамках двух связанных нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка, содержащих линейные члены третьего порядка (линейная дисперсия третьего порядка), и нелинейные члены третьего порядка, отвечающие как самовоздействию (самоукручению и самоиндуцированному рамановскому рассеянию), так и перекрестному нелинейному взаимодействию различных поляризаций (перекрестной нелинейной дисперсии и перекрестному индуцированному рамановскому рассеянию). Найдены режимы отражения и прохождения солитонов друг через друга, а также режим осцилляционного взаимодействия векторных солитонов (векторный бризер).

*Ключевые слова:* дисперсия, нелинейность, поляризация, короткий векторный солитон, взаимодействие, бризер.

**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 линиях волоконной оптической связи [4]. Распространение оптических импульсов достаточно большой протяженности в одномодовых линиях хорошо описывается нелинейным уравнением Шредингера (NSE) [5–6], учитывающим линейную дисперсию второго порядка и кубическую нелинейность (self-phase modulation). Солитонное решение в этом уравнении возникает в результате баланса дисперсионного разбегания и нелинейного сжатия волнового пакета. В двухмодовых волноводах – это связанные нелинейные уравнения Шредингера (CNSE) [7–9], учитывающие взаимодействие мод через перекрестную фазовую модуляцию (cross-phase modulation), и связанные уравнения Гинзбурга–Ландау (CGL) [10–12], учитывающие также и линейную дисперсию третьего порядка (third-order linear dispersion) и потери в волноводе.

Уменьшение протяженности волновых импульсов, с одной стороны, и, с другой стороны, использование сред со смещенной дисперсией приводит к необходимости учета в модельных нелинейных уравнениях членов более высокого (третьего) порядка малости, соответствующих нелинейным эффектам укрупнения [13], и индуцированное рамановское рассеяние (stimulated Raman-scattering) [14]. Так, в одномодовых волноводах распространение коротких оптических импульсов может быть описано нелинейным уравнением Шредингера третьего порядка (TNSE) [15–21], содержащим как линейное слагаемое, отвечающее линейной дисперсии третьего порядка, так и нелинейные члены самодействия: самоукручение (self-stepping) и самоиндуцированное рамановское рассеяние (self-stimulated Raman-scattering). В этом уравнении солитонное решение возникает в результате баланса линейного абберационного искажения волнового импульса и нелинейных изменений, обусловленных нелинейной дисперсией и индуцированным рамановским рассеянием.

Стационарные волны в рамках НУШ-3 (TNSE) исследовались как численно [22, 23],

так и аналитически. В работах [22, 23] рассматривалось солитонное решение с пространственной модуляцией волнового числа в точке перегиба линейной дисперсионной характеристики (при отсутствии линейной дисперсии второго порядка, но при учете линейной дисперсии третьего порядка) и в пренебрежении членами нелинейной дисперсии третьего порядка.

Анализ НУШ-3 методом обратной задачи рассеяния с нахождением точных  $N$  - солитонных решений был проведен в трех случаях. При отсутствии линейной дисперсии второго порядка и квадратичной нелинейности и для действительного волнового поля НУШ-3 сводится к модифицированному уравнению Кортевега - де Вриза, решение которого было получено в [24–27]. Солитонные решения с немодулированным волновым числом найдены в следующих двух случаях: в НУШ-3 в точке нулевой линейной дисперсии второго порядка – в [28, 29]; в НУШ-3 при произвольных параметрах среды – в [19, 30].

При распространении коротких векторных оптических импульсов в двухмодовых волноводах возникает необходимость учета в каждом из нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка для различных поляризации еще и перекрестных нелинейных членов третьего порядка малости, соответствующих перекрестному укрупнению (cross-stepping) и перекрестному индуцированному рамановскому рассеянию (cross-stimulated Raman-scattering) [31–33]. Так возникают два связанных нелинейных уравнения Шредингера третьего порядка (СТNSE), содержащих нелинейные члены третьего порядка малости, описывающие как самовоздействие (self-stepping и self-stimulated Raman-scattering), так и перекрестное взаимодействие различных поляризаций (cross-stepping и cross-stimulated Raman-scattering) [31].

В данной работе рассмотрена динамика однокомпонентных нелинейных волновых полей малой протяженности (протяженностью в несколько длин волн). Рассмотрение будет проведено в рамках третьего приближения теории дисперсии нелинейных волн в анизотропных средах при учете смещения дисперсии, т.е. при отсутствии линейной дисперсии второго порядка. Показано, что в рамках этого приближения возникает взаимодействие нелинейных волновых полей различной поляризации. В качестве примера рассмотрено взаимодействие коротких однокомпонентных векторных солитонов. Найдены режимы отражения и прохождения коротких векторных солитонов друг через друга, а также режим осцилляторного взаимодействия коротких взаимно ортогональных солитонов, при котором происходит периодический обмен энергией между солитонами различной поляризации (векторный бризер).

### Короткие однокомпонентные векторные солитоны

Распространение векторного волнового поля  $\vec{E} = \vec{e}_1 U(\xi, t) \exp(i\omega t - ik_u \xi) + \vec{e}_2 W(\xi, t) \exp(i\omega t - ik_w \xi)$  малой протяженностью (в несколько длин волн  $k_{u,w} L_{u,w} \gtrsim 1$ ) и малой длительности (в несколько периодов  $\omega T_{u,w} \gtrsim 1$ ), в слабо анизотропных нелинейных диспергирующих средах достаточно хорошо описываются третьим (абберрационным) приближением теории дисперсии нелинейных волн, в котором учитываются члены третьего порядка малости: это линейные члены  $\varepsilon^3 \sim \partial^3 U / \partial \xi^3, \partial^3 W / \partial \xi^3$ , соответствующие линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion), и нелинейные члены, соответствующие эффектам самоукрупнения (self-stepping)  $\varepsilon^3 \sim \partial(|U|^2 U) / \partial \xi, \partial(|W|^2 W) / \partial \xi$ , самоиндуцированного рамановского рассеяния (self-stimulated Raman-scattering)  $\varepsilon^3 \sim W \partial(|W|^2) / \partial \xi, U \partial(|U|^2) / \partial \xi$ , перекрестного укрупнения (cross-stepping)  $\varepsilon^3 \sim \partial(|W|^2 U) / \partial \xi, (|U|^2 W)'_{\xi}, \partial(W^2 U^*) / \partial \xi, (U^2 W^*)'_{\xi}$  и перекрестного индуцированного рамановского рассеяния (cross-stimulated Raman-scattering)  $\varepsilon^3 \sim W (|U|^2)'_{\xi}, U \partial(|W|^2) / \partial \xi, U^* \partial(W^2) / \partial \xi, W^* \partial(U^2) / \partial \xi$ . В этом приближении базовыми уравнениями дина-

мики медленных огибающих  $U$  и  $W$  различных поляризационных компонент при условии малого отличия их волновых чисел  $|k_u - k_w| \ll k_{u,w}$  является система двух связанных нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка:

$$2i \left[ \frac{\partial U}{\partial t} + \beta \frac{\partial (|U|^2 U + \sigma |W|^2 U)}{\partial \xi} + \frac{\beta \sigma}{2} \frac{\partial (W^2 U^*)}{\partial \xi} + \mu U \frac{\partial (|U|^2 + \sigma |W|^2)}{\partial \xi} + \frac{\mu \sigma}{2} U^* \frac{\partial (W^2)}{\partial \xi} \right] + 2\alpha (|U|^2 + \sigma |W|^2) U + \alpha \sigma W^2 U^* + i\gamma \frac{\partial^3 U}{\partial \xi^3} = 0, \quad (1)$$

$$2i \left[ \frac{\partial W}{\partial t} + \beta \frac{\partial (|W|^2 W + \sigma |U|^2 W)}{\partial \xi} + \frac{\beta \sigma}{2} \frac{\partial (U^2 W^*)}{\partial \xi} + \mu W \frac{\partial (|W|^2 + \sigma |U|^2)}{\partial \xi} + \frac{\mu \sigma}{2} W^* \frac{\partial (U^2)}{\partial \xi} \right] + 2\alpha (|W|^2 + \sigma |U|^2) W + \alpha \sigma U^2 W^* + i\gamma \frac{\partial^3 W}{\partial \xi^3} = 0, \quad (2)$$

где  $\xi = x - V_g^L \cdot t$ ,  $V_g^L = \partial \omega / \partial k$  – линейная групповая скорость;  $\omega = \omega(k, |U|^2, |W|^2)$  – нелинейное дисперсионное соотношение;  $\alpha = \partial \omega / \partial (|U|^2) = \partial \omega / \partial (|W|^2)$  – коэффициент кубичной нелинейности (self-phase modulation);  $\sigma$  – коэффициент перекрестной фазовой модуляции (cross-phase modulation) (так, для «керровской» нелинейности  $\sigma = 2/3$ ),  $\gamma = -\partial^3 \omega / (3 \partial k^3)$  – коэффициент линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion);  $\beta$  – коэффициент самоукручения (self-stepping) или нелинейной дисперсии;  $\mu$  – коэффициент самоиндуцированного рамановского рассеяния (self-stimulated Raman-scattering);  $U^*$ ,  $W^*$  – величины, комплексно сопряженные  $U$ ,  $W$  соответственно.

Система уравнений (1)–(2) имеет двухкомпонентное (включающее обе ненулевые компоненты  $U$  и  $W$ ) солитонное решение:

$$\begin{cases} U(\xi, t) = \frac{A_1}{\cosh(A_1 \varepsilon (\xi - V_1 t))} \exp(i \Omega_1 t + i K \xi), \\ W = 0 \end{cases} \quad (3)$$

и

$$\begin{cases} W(\xi, t) = \frac{A_2}{\cosh(A_2 \varepsilon (\xi - V_2 t))} \exp(i \Omega_2 t + i K \xi), \\ U = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A_{1,2}$  – амплитуды солитонов;  $\theta = 2\mu - \beta$ ,  $\varepsilon = \sqrt{\theta / 3\gamma}$ ,  $K = 3\alpha\gamma / 6(\beta - \mu)\gamma$  – добавочное волновое число;  $\Omega_{1,2} = 2K\gamma(K^2 / 2 - \theta A_{1,2}^2 / 6)$  – добавочные частоты векторных солитонов различной поляризации;  $V_{1,2} = \theta A_{1,2}^2 / 6 - 3\gamma K^2 / 2$  – скорости движения солитонов различной поляризации.

Такие солитонные решения по отдельности являются точными решениями несвязанного (скалярного) нелинейного уравнения Шредингера третьего порядка [19–20]. Как было показано в [21], такие короткие однокомпонентные (или скалярные) солитоны являются устойчивыми при условии  $\gamma(2\mu - \beta) > 0$ . Устойчивость этого солитонного решения исследована в [21] аналитически в адиабатическом приближении и численном эксперименте. В численном эксперименте при малом возмущении точного решения получено, что в зависимости от параметров среды различные компоненты возмущенного солитона могут осциллировать друг относительно друга или одна из векторных компонент может усиливаться при угасании другой компоненты. Остается нерешенным важный вопрос о точном описании соотношений па-

раметров среды и параметров солитонных компонент различной поляризации, соответствующих различным типам поведения компонент. Также важен вопрос о поведении отдельных векторных компонент, сильно разнесенных в пространстве. В дальнейшем исследовании подразумевается выполнение условий устойчивости однокомпонентных солитонов.

### Сохранение энергии системы коротких ортогональных векторных волновых пакетов

Определим закон изменения энергии ортогональных волновых полей малой протяженности в системе (1)–(2). Для этого умножим (1) на величину  $U^*$ , комплексно сопряженную к  $U$ , и сложим полученное уравнение с комплексно ему сопряженным. Интегрируя полученное уравнение по  $x$  от  $-\infty$  до  $\infty$  при нулевых условиях на бесконечности  $(U, W)|_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$ , получим скорость изменения энергии поляризационной компоненты  $U$ :

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = -\sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 \frac{\partial |W|^2}{\partial \xi} d\xi - \frac{\sigma}{4}(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ (U^*)^2 \frac{\partial (W^2)}{\partial \xi} + U^2 \frac{\partial (W^*)^2}{\partial \xi} \right] d\xi. \quad (5)$$

В частном случае при одинаковой пространственной фазовой модуляции различных поляризаций  $U = |U| \exp(i\Omega_u(t) + i\varphi(\xi))$ ,  $W = |W| \exp(i\Omega_w(t) + i\varphi(\xi))$  соотношение (5) принимает более простую форму:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = -\frac{3}{2} \sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 \frac{\partial |W|^2}{\partial \xi} d\xi.$$

Аналогично из уравнения (2) получим скорость изменения энергии для поляризационной компоненты  $W$ :

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |W|^2 d\xi = -\sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |W|^2 \frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} d\xi - \frac{\sigma}{4}(2\mu - \beta) \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ (W^*)^2 \frac{\partial (U^2)}{\partial \xi} + W^2 \frac{\partial (U^*)^2}{\partial \xi} \right] d\xi. \quad (6)$$

Из (5)–(6) следует, что распространение короткого волнового поля одной поляризации в присутствии волнового поля другой поляризации сопровождается энергообменом между различными поляризационными компонентами. Складывая соотношения (5) и (6), получим закон сохранения энергии векторного волнового пакета:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} (|U|^2 + |W|^2) d\xi = 0. \quad (7)$$

В дальнейшем взаимодействие коротких векторных волновых полей рассмотрим на примере взаимодействия коротких однокомпонентных векторных солитонов.

### Взаимодействие коротких однокомпонентных векторных солитонов

Рассмотрим начальную задачу взаимодействия двух коротких векторных солитонов различной поляризации. Пусть в момент времени  $t = 0$  в анизотропной среде существуют два взаимно ортогональных векторных солитона различной поляризации и различной амплитуды с расстоянием  $\xi_0$  между их центрами:

$$\begin{aligned} U(\xi, t = 0) &= \frac{A_1(0)}{\cosh(A_1(0)\epsilon(\xi - \xi_0))} \exp(iK\xi), \\ W(\xi, t = 0) &= \frac{A_2(0)}{\cosh(A_2(0)\epsilon\xi)} \exp(iK\xi). \end{aligned} \quad (8)$$

Полагая, что изменение параметров солитонов происходит достаточно медленно, решение при  $t > 0$  будем искать в адиабатическом приближении:

$$U(\xi, t) = \frac{A_1(t)}{\cosh \left[ A_1(t) \varepsilon \left( \xi - \xi_0 - \int_0^t V_1(\tilde{t}) d\tilde{t} \right) \right]} \exp \left\{ i \int_0^t \Omega_1(\tilde{t}) d\tilde{t} + iK\xi \right\},$$

$$W(\xi, t) = \frac{A_2(t)}{\cosh \left[ A_2(t) \varepsilon \left( \xi - \int_0^t V_2(\tilde{t}) d\tilde{t} \right) \right]} \exp \left\{ i \int_0^t \Omega_2(\tilde{t}) d\tilde{t} + iK\xi \right\},$$
(9)

где  $V_{1,2}(t) = \theta A_{1,2}^2(t) / 6 - 3\gamma K^2 / 2$  – скорости движения солитонов в момент времени  $t$ ;  $\Omega_{1,2}(t) = 2K\gamma(K^2 / 2 - \theta A_{1,2}^2(t) / 6)$  – мгновенные частоты смещений солитонов в момент времени  $t$ . Расстояние между центрами солитонов изменяется по закону

$$\Delta\xi = \xi_0 + \int_0^t (V_1(\tilde{t}) - V_2(\tilde{t})) d\tilde{t} = \xi_0 + \frac{\theta C_0}{6} \int_0^t \Delta A(\tilde{t}) d\tilde{t},$$
(10)

где  $\Delta A = A_1 - A_2$  – различие амплитуд солитонов. Подставляя (10) в закон сохранения энергии системы солитонов (7), для амплитуд солитонов получим

$$A_1(t) + A_2(t) = A_1(0) + A_2(0) = C_0.$$
(11)

Далее, дифференцируя соотношение (10) по времени, а также подставляя (10) в (5), получим систему уравнений для траекторий движения солитонов

$$\frac{d\Delta A}{dt} = \frac{3\sigma\alpha(2\mu - \beta)(C_0^2 - (\Delta A)^2)}{16 \cosh^2((C_0 + \Delta A)\varepsilon\Delta\xi/2)} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tanh \eta d(\tanh \eta)}{\cosh^2(\delta\eta)[1 - \tanh(\delta\eta) \cdot \tanh((C_0 + \Delta A)\varepsilon\Delta\xi/2)]^2},$$
(12)

$$\frac{d\Delta\xi}{dt} = \frac{\theta C_0}{6} \Delta A,$$
(13)

где  $\delta = A_1 / A_2 = (C_0 + \Delta A) / (C_0 - \Delta A)$  – отношение амплитуд солитонов.

В дальнейшем рассмотрим взаимодействие коротких однокомпонентных векторных солитонов при малом различии их амплитуд  $|\Delta A| \ll C_0$ . В этом случае, принимая в правой части (12)  $\delta = 1$  и обозначая  $\Delta y = C_0 \varepsilon \Delta \xi / 2$ , получим систему уравнений для траекторий движения солитонов:

$$\frac{d\Delta y}{dt} = \rho_1 \Delta A,$$
(14)

$$\frac{d\Delta A}{dt} = \rho_2 I(\Delta y),$$
(15)

где  $\rho_1 = \varepsilon C_0^2 \theta / 12$ ,  $\rho_2 = \sigma\alpha(2\mu - 3\beta) C_0^4 \theta / 16$ ,

$$I(\Delta y) = \frac{1}{\cosh^2(\Delta y)} \int_{-1}^{+1} \frac{(1 - \tau^2) \tau d\tau}{[1 - \tau \cdot \tanh(\Delta y)]^2} = \frac{2(3\Delta y - 3 \tanh(\Delta y) - \Delta y \cdot \tanh^2(\Delta y))}{\tanh^4(\Delta y)}.$$

В результате линеаризации в окрестности состояния равновесия ( $\Delta A = 0, \Delta y = 0$ ), т.е. при малых значениях  $\Delta y$ , система уравнений (14)–(15) примет вид

$$\frac{d\Delta y}{dt} = \rho_1 \Delta A,$$
(16)

$$\frac{d\Delta A}{dt} = \frac{8}{15} \rho_2 \Delta y.$$
(17)

Тип и устойчивость состояния равновесия определяются знаком величины  $\rho_1 \rho_2$ . Так, при  $\rho_1 \rho_2 > 0$  состояние равновесия является неустойчивым (типа «седло»), при  $\rho_1 \rho_2 < 0$  –

устойчивым (типа «центр»), что соответствует колебаниям взаимно ортогональных солитонов друг относительно друга с периодом  $\sqrt{-8\rho_1\rho_2/15}$ .

Проанализируем систему (14)–(15) при произвольных значениях  $\Delta y$ . Для этого поделим (15) на (14), разделим переменные в полученном уравнении и проинтегрируем его:

$$(\Delta A)^2 + 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y) = (\Delta A_0)^2 + 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y_0) = \text{const}, \quad (18)$$

где  $\Delta A_0 = \Delta A(\Delta y_0)$  – начальное различие амплитуд солитонов,  $\Delta y_0 = (\Delta y)_{t=0}$  – начальное расстояние между центрами солитонов,  $\Phi(\Delta y) = \frac{\Delta y - \tanh(\Delta y)}{\cosh^2(\Delta y) \cdot \tanh^3(\Delta y)}$  – эффективный потенциал взаимодействия векторных солитонов.

Проанализируем траектории движения (18) при  $\rho_1\rho_2 > 0$  и  $\rho_1\rho_2 < 0$ , отвечающих соответственно неустойчивому и устойчивому состояниям равновесия системы (16)–(17).

1. При  $\rho_1\rho_2 > 0$  примем, что в начальный момент времени  $t=0$  короткие векторные солитоны находятся на значительном расстоянии друг от друга, много большем их протяженностей  $|\Delta y_0| \gg 1$ , и имеют различные начальные амплитуды  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A)_{|\Delta y| \rightarrow \infty}^2 \neq 0$ . Тогда с учетом  $\lim_{|\Delta y| \rightarrow \infty} \Phi(\Delta y) = 0$  получим из (18) для траекторий движения

$$(\Delta A)^2 + 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y) = (\Delta A)_{|\Delta y| \rightarrow \infty}^2. \quad (19)$$

На рис. 1 приведены графики решений (19) (траектории), отвечающие различным значениям  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A)_{|\Delta y| \rightarrow \infty}^2$ .

При достаточно большом различии начальных амплитуд солитонов  $(\Delta A_0)^2 > (\Delta A_c)^2 = 8\rho_2/(3\rho_1)$  солитоны, находящиеся в начальный момент времени на значительном расстоянии друг от друга, в результате взаимодействия проходят друг мимо друга (траектории 1, рис. 1) и амплитуды каждого из солитонов до и после взаимодействия остаются равны прежним значениям.

При различии начальных амплитуд солитонов, соответствующем критическому значению  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A_c)^2$ , солитоны, находящиеся в начальный момент времени на значительном расстоянии друг от друга, в результате взаимодействия асимптотически приближаются друг к другу и в момент совпадения их центров их амплитуды также совпадают (траектории 2, рис. 1). Уравнение для траекторий 2 (рис. 1) найдем из условия их прохождения через начало координат  $(\Delta A)_{\Delta y=0} = 0$ . С учетом  $\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \Phi(\Delta y) = 2/3$  получим из (19) для траекторий 2 (рис. 1)

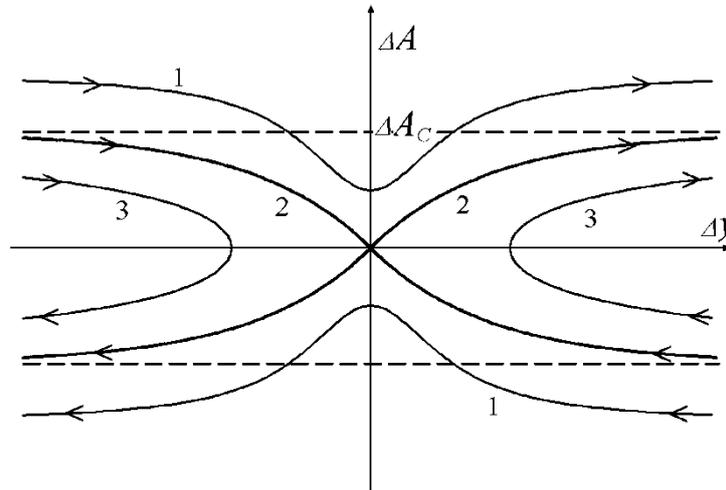
$$(\Delta A)^2 = 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{2}{3} - \Phi(\Delta y) \right). \quad (20)$$

При достаточно малом различии начальных амплитуд солитонов: при  $(\Delta A_0)^2 < (\Delta A_c)^2$  – солитоны, находящиеся в начальный момент времени на значительном расстоянии друг от друга, в результате взаимодействия отталкиваются друг от друга (траектории 3, рис. 1). Наименьшее расстояние  $\Delta y_{\min}$  между центрами солитонов в этом случае определяется из условия равенства амплитуд солитонов в точке наибольшего сближения солитонов, т.е. при наименьшем расстоянии  $(\Delta A)_{\Delta y_{\min}} = 0$ , и в этом случае из (19) имеем

$$(\Delta A_0)^2 = 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y_{\min}). \quad (21)$$

В частности, при достаточно малом различии начальных амплитуд солитонов, отвечающих соотношению  $|\Delta A_0| \ll |\Delta A_c|$  соотношение (21) выполняется при условии малого перекрытия солитонов  $|\Delta y_{\min}| \gg 1$ , и в этом случае из (21) с учетом  $\Phi(\Delta y_{\min}) \approx 4|\Delta y_{\min}| \cdot \exp(-2|\Delta y_{\min}|)$  получим уравнение, описывающее наименьшее расстояние между солитонами:

$$(\Delta A_0)^2 = 16 \frac{\rho_2}{\rho_1} |\Delta y_{\min}| \cdot \exp(-2|\Delta y_{\min}|). \tag{22}$$



**Рис. 1. Траектории движения центра «масс» однокомпонентных солитонов при  $\rho_1 \rho_2 > 0$ :**

1 – прохождение солитонов друг через друга; 2 – сепаратрисы, соответствующие критическому различию начальных амплитуд солитонов; 3 – отталкивание солитонов друг от друга

2. При  $\rho_1 \rho_2 < 0$  примем, что в начальный момент времени  $t = 0$  короткие векторные солитоны находятся в одной точке  $\Delta y_0 = 0$  и имеют различные амплитуды  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A)_{\Delta y=0}^2 \neq 0$ . В этом случае с учетом  $\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \Phi(\Delta y) = 2/3$  получим из (19) для траекторий движения солитонов:

$$(\Delta A)^2 + 4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y) = (\Delta A)_{\Delta y=0}^2, \tag{23}$$

в котором  $\rho_2 / \rho_1 < 0$ . На рис. 2. приведены траектории (23) при различных значениях  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A)_{\Delta y=0}^2$ .

При достаточно большом различии начальных амплитуд солитонов: при  $(\Delta A_0)^2 > (\Delta A_c)^2 = -8\rho_2 / (3\rho_1)$  – солитоны разбегаются, и на больших расстояниях друг от друга амплитуды солитонов стремятся к различным значениям (траектории 1, на рис. 2). При этом выполняется.  $(\Delta A)^2 = (\Delta A_0)^2 - (\Delta A_c)^2$ .

При различии начальных амплитуд солитонов, соответствующем критическому значению  $(\Delta A_0)^2 = (\Delta A_c)^2$ , солитоны разбегаются, и на больших расстояниях друг от друга амплитуды солитонов стремятся к равным между собой значениям (траектории 2, рис. 2). Траектории 2 опишем из (23) при условии их асимптотического приближения к оси  $\Delta y$  при

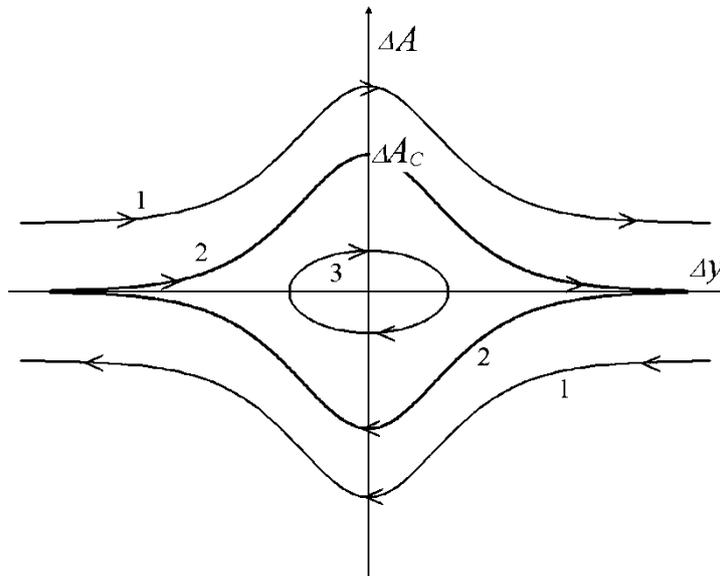
$|\Delta y| \rightarrow \infty: \Delta A_{|\Delta y| \rightarrow \infty} \rightarrow 0$ . С учетом  $\lim_{|\Delta y| \rightarrow \infty} \Phi(\Delta y) = 0$  получим из (23) уравнение для траекторий 2 (рис. 2)

$$(\Delta A)^2 = -4 \frac{\rho_2}{\rho_1} \Phi(\Delta y). \tag{24}$$

При достаточно малом различии начальных амплитуд солитонов: при  $(\Delta A_0)^2 < (\Delta A_c)^2$  – расстояние между солитонами и их амплитуды меняются во времени периодическим образом (траектории 3, рис. 2). Этот режим взаимодействия коротких векторных солитонов можно определить как векторный бризер. В частности, при достаточно малом, по сравнению с их протяженностями, разбегании солитонов  $|\Delta y| \ll 1$  и с учетом  $\Phi(\Delta y) \approx 2/3 - 4(\Delta y)^2/15$  получим из (24) для траекторий 3 (рис. 2)

$$(\Delta A)^2 - \frac{16}{15} \frac{\rho_2}{\rho_1} (\Delta y)^2 = (\Delta A_0)^2, \tag{25}$$

что соответствует проведенному анализу линеаризованной около состояния равновесия системы (16)–(17).



**Рис. 2. Траектории движения центра «масс» однокомпонентных солитонов при  $\rho_1 \rho_2 < 0$ :**

1 – прохождение солитонов друг через друга; 2 – сепаратрисы, соответствующие критическому различию начальных амплитуд солитонов; 3 – осцилляторное движение солитонов друг относительно друга (векторный бризер)

Случай  $\rho_1 \rho_2 = 0$  возможен (при условии существования однокомпонентных солитонов) только при  $2\mu - 3\beta = 0$ , что приводит к сохранению энергий каждой из взаимно ортогональных компонент  $U$  и  $W$  по отдельности вследствие выражений (5) и (6). В этом случае отсутствует передача энергии от одной компоненты к другой, т.е. отсутствует взаимодействие компонент и однокомпонентные (взаимно ортогональные) солитоны распространяются, не реагируя друг на друга.

### Выводы

В данной работе проанализировано движение пары однокомпонентных векторных солитонов малой протяженности в анизотропных средах со смещенной дисперсией. Найден закон сохранения суммарной энергии таких солитонов. Исследование взаимодействия соли-

тонов проведено в адиабатическом приближении при достаточно малом различии амплитуд солитонов  $|\Delta A| \ll A_{1,2}$ , но при произвольном расстоянии между солитонами. В явном виде найдены траектории движения солитонов и соответствующие им изменения амплитуд солитонов. В зависимости от величин параметров среды и начальных амплитуд солитонов возможно как прохождение солитонов друг через друга, так и отталкивание солитонов, а также периодическое движение солитонов относительно общего центра – векторное бризерное состояние. Определены соотношения между параметрами среды и параметрами солитонов, соответствующие разным типам взаимодействия солитонов.

Работа проведена при поддержке РФФИ (проект № 11 – 02 – 01307).

### 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. 1972. V. 34. P.62 -69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N. 3. P. 142–144.
7. **Manakov, S.V.** On the theory of two-dimensional stationary self focussing of electromagnetic waves // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1973. V. 65. P. 505-516; Sov. Phys. JETP. 1974. V.38. P. 248-253.
8. **Fordy, A.P.** Nonlinear Schrodnger equations and simple Lie algebras / A.P. Fordy, P.P. Kulish // Commun. Math. Phys. 1983. V. 89. P. 427–443.
9. **Menyuk, C.R.** Nonlinear pulse-propagation in birefringent optical fibers // Optics Letters. 1987. V.12. P.614; J. Opt. Soc. Am. B. 1988. V. 5. P. 392.
10. **Cundiff, S.T.** Observation of Polarization-Locked Vector Solitons in an Optical Fiber / S.T. Cundiff [at al.] // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. 3988; Akhmediev [at al.] // Opt. Lett. 1998. V. 23. P. 852.
11. **Tang, D.Y.** Observation of high-order polarization-locked vector solitons in a fiber laser / D.Y. Tang, H. Zhang, L.M. Zhao, X.Wu // Phys. Rev. Lett. 2008. V.101. 153904.
12. **Christodoulides, D. N.** Vector solitons in birefringent nonlinear dispersive media / D. N. Christodoulides, R. I. Joseph // Opt. Lett. 1988. V.13. N. 1. P. 53–55.
13. **Oliviera, J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliveira, M.A. Moura // Phys. Rev. E. 1998, V. 57. P. 4751–4755.
14. **Gordon J.P.,** Theory of the soliton self-frequency shift // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 662–664.
15. **Kodama Y.,** Optical solitons in a monomode fiber // J. Stat. Phys. 1985. V. 39. P. 597– 14.
16. **Zaspel C.E.,** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation. //Phys. Rev. Lett. 1999. V.82. N.4. P.723 – 726.
17. **Hong, B.** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation / B. Hong, D. Lu // Inter. Journal of Nonlinear Science. 2009. V. 7. N. 3. P. 360–367.
18. **Karpman, V.I.** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B. 2004.V.39. P. 341–350.
19. **Gromov, E.M.** Nonlinear dynamics of short wave trains in dispersive media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1996. V.110. P.137.; JETP. 1996. V.83. P. 73–79.
20. **Gromov, E.M.** Short optical solitons in fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 2000. V.10. N. 3. P. 551–558.
21. **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. 1999. V. 256. P. 153–158.
22. **Wal, P.K.A.** Soliton at the zerogroup-dispersion wavelength of a single-model fiber / P.K.A. Wal, C.R. Menyuk, H.H. Chen, Y.C. Lee // Opt. Lett. 1987. V. 12. P. 628.

23. **Мезенцев, В.К.** Новый класс солитонов в волоконных световодах вблизи точки нулевой дисперсии / В.К. Мезенцев, С.К. Турицын // Квантовая Электроника. 1991. Т. 18. N.5. С. 610–612.
24. **Wadati, M.** The exact solution of the modified Korteweg-de Vries equation // Phys. Soc. Jap. 1972. V.32. P. 1681.
25. **Hirota, R.** Exact solution of the sine-Gordon equation for multiple collisions of solitons // J. Math. Phys. 1972. V.33. P.805.
26. **Hirota, R.** Exact solutions of the modified Korteweg-de Vries equation for multiple collisions of solitons // J.Phys.Soc.Jap. 1972. V. 33. P. 1456.
27. **Miura, R.M.** Korteweg–de Vries equations and generalizations. I. A remarkable explicit nonlinear transformation // J.Math.Phys. 1969. V.9. P.1202–1204.
28. **Frantzeskakis, D.J.** Nonlinear dynamics of femtosecond optical solitary wave propagation at the zero dispersion point / D.J. Frantzeskakis, K. Hizanidis, G.S. Tombas, I. Belia // IEEE J. Quantum Electron. 1995. V. 31. P. 183.
29. **Frantzeskakis, D.J.** Ultrashort solitary-wave propagation in dielectric media with resonance dominated chromatic dispersion / D.J. Frantzeskakis, K. Hizanidis, C. Polymills // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V.12. N.4. P.628.
30. **Громов, Е.М.** Короткие солитоны огибающей (комбинированное нелинейное уравнение) / Е.М. Громов, В.И. Таланов // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. N. 6. С. 735.
31. **Kim J.,** A coupled higher-order nonlinear Schrodinger equation including higher-order bright and dark solitons // ETRI Journal. 2001. V.23. N.1. P. 9–15.
32. **Lu, F.** Vector soliton fission / F. Lu [et al.] // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. N.18. 183901.
33. **Gromov, E.M.** Short vector soliton / E.M. Gromov, V.V. Tyutin, D.E. Vorontsov // Physics Letters A. 2001. V. 287. issue 3-4. P. 233–239.

*Дата поступления  
в редакцию 12.10.10*

**E.M. Gromov, V.V. Tyutin, V.P. Morozov**

### **SHORT SINGLE-COMPONENT VECTOR SOLITONS INTERACTION IN DISPERSION-SHIFTED MEDIA (ADIABATIC APPROXIMATION)**

The interaction of short single-component vector solitons in the frame of the coupled third-order nonlinear Schrodinger equations taking into account third-order linear dispersion, self-stepping, self-stimulated Raman-scattering, cross-stepping and cross-stimulated Raman-scattering terms is considered. Conditions of reflection and propagation of the solitons through each other and also the condition of oscillator interaction (vector breather) are obtained.

*Keywords:* dispersion, nonlinearity, polarization, short vector soliton, interaction, breather.

УДК 556

О.Е. Хвостова

## ОЦЕНКА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)

Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с гидрогеологией части бассейна реки Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища, проведена общая оценка текущего состояния гидрогеологии водохранилищ по различным параметрам. Выявлено, что эрозионные процессы в бассейне Горьковского водохранилища имеют среднюю интенсивность по сравнению с аналогичными процессами в бассейнах Рыбинского и Чебоксарского водохранилищ, но активность ЭПП присутствует. Особое внимание уделено процессам размыва и эрозии береговой линии Горьковского водохранилища, представлена математическая и численная модель оценки запаса устойчивости склонов.

*Ключевые слова:* гидрология водохранилищ, моделирование гидрогеологических процессов, оползни, эрозия берега, численное моделирование.

### Введение

Исследование динамических процессов береговой зоны Горьковского водохранилища является актуальной темой как при строительстве новых объектов, так и при эксплуатации уже возведенных. Систематическое наблюдение за подмывом берегов, оползнями, изменением уровня воды в реке Волга и другими процессами позволит предотвратить разрушение откосов (как естественных, так и искусственных), склонов, не допустить угрозы аварийных ситуаций, а значит, избежать человеческих жертв и значительных денежных затрат.

Согласно исследованиям Приволжского регионального центра государственного мониторинга состояния недр, выполненных на основе сравнительно-геологического анализа [1], была выявлена оползневая и селевая эрозия почв и размыв грунта вдоль побережья Горьковского водохранилища. Прогноз развития экзогенных геологических процессов, показал, что при сохранении существующего уровня водной поверхности водохранилища и ветрового режима размываемые участки береговой линии сохраняют унаследованный характер и ожидается размыв береговой линии. Подмыв водой склонов, а также переувлажнение подземными водами пород – последствия создания водохранилищ и одновременно причина активизации большинства оползневых процессов.

В настоящей работе рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с гидрогеологией части бассейна реки Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища, особое внимание при этом уделено Горьковскому водохранилищу. Также исследованы процессы размыва и эрозии береговой линии Горьковского водохранилища, систематизированы собранные гидрологические данные. Проведена общая оценка текущего состояния гидрогеологии водохранилищ по различным параметрам, относящимся к различным типам факторов: геологическое строение и рельеф (неизменные факторы), климат и почвы (факторы, изменяющиеся в длительной перспективе), метеорологические условия и хозяйственная деятельность (быстроизменяющиеся факторы). Теоретически исследованы процессы размыва и эрозии береговой линии водохранилищ. Выбраны наиболее оптимальные математические модели, пригодные для оценки запаса устойчивости склонов.

### Гидрогеологические характеристики Горьковского водохранилища

Горьковское водохранилище находится между Рыбинским и Чебоксарским водохранилищами по течению реки Волга. Все три водохранилища входят в одну систему водохра-

нилищ Волжско-Камского каскада. Рыбинское и Чебоксарское водохранилища являются определенными барьерами для вод, поступающих и вытекающих из Горьковского водохранилища. Поэтому анализ гидрогеологических данных позволит найти адекватную методологию оценки эрозии берегов водохранилища.

**Горьковское водохранилище** было образовано плотиной Нижегородской ГЭС, заполнено в 1955—1957 гг. Площадь — 1590 км<sup>2</sup>, объём — 8,71 км<sup>3</sup>, средняя глубина — 3,65 м, максимальная глубина — 22 м, длина — 427 км, ширина — до 16 км, высота над уровнем моря — 84 м [2].

Рельеф прилегающих территорий — это в основном низменные, слегка всхолмленные равнины, приподнятые над уровнем моря, в основном, на 100–150 м. Гидрогеологические условия определяются наличием нескольких этажно-расположенных артезианских водоносных горизонтов и комплексов, разделенных относительно водоупорными толщами. Мощность зоны активного водообмена изменяется от нескольких десятков до 150–200 м [3]. Наиболее активными экзогенными геологическими процессами (ЭГП) являются переработка берегов Горьковского водохранилища и оползнеобразование [4], вследствие чего идет постоянное отчуждение земель уникальной ландшафтной зоны Волжского побережья. Так, волновая переработка берегов, особенно в *озерной* части, достигает с начала заполнения водохранилища на отдельных участках 40–60 м. В настоящее время величина смещения бровки берегового уступа на активных участках переработки не превышает 0,5–0,8 м в год, а объём размытых пород — 5–7 м<sup>3</sup>/м.

Повышенная активность переработки берегов и оползневого процесса в основном наблюдается при повышенном увлажнении оползневых тел и откосов абразионных уступов за счет большого количества атмосферных осадков, а также при более длительном стоянии воды в водохранилище на отметках выше допустимого уровня. Скорость смещения активных оползней варьируется от 0,1 до 8 м в год, чаще от 0,2 до 2 м. Периодически происходит активизация древних оползней, примером чего является оползень 2005 г. у д. Воробьецово в За-волжском районе Ивановской области протяженностью вдоль берега р. Волги около 0,7 км (рис. 1, слева). Объём активизировавшегося оползня превышает 1 млн м<sup>3</sup>, при этом создались предпосылки для вовлечения в оползневой процесс жилых строений восточной части д. Воробьецово на протяжении около 250 м (рис. 1, справа).



**Рис. 1. Обвальнo-оползневой уступ на участке активизации древнего оползня вдоль южной окраины д. Воробьецово: левый берег р. Волги, ниже впадения в нее р. Меры**

**Рыбинское водохранилище** образовано в 1941 г. водоподпорными сооружениями Рыбинского гидроузла, расположенного в северной части Рыбинска, перекрывающими русла двух рек: Волги и Шексны. Площадь — 4580 км<sup>2</sup>, объём — 25,5 км<sup>3</sup>, средняя глубина — 5,5 м, максимальная глубина — 30 м.

Рельеф прилегающих территорий Рыбинского водохранилища — это низменные тер-

ритории, по его побережью тянутся сырые луга, леса, болота. Лишь местами по долинам затопленных рек можно встретить обрывы, поросшие соснами. Гидрогеологические условия территории определяются совокупностью климатических, структурных и литолого-фациальных факторов. Положение водохранилища в зоне умеренно влажного климата с преобладанием осадков над испарением благоприятствует атмосферному питанию подземных вод [4].

Так же, как и на Горьковском водохранилище, имеет место переработка берегов. На их формирование оказывают влияние значительные колебания уровня воды Рыбинского водохранилища, периодически высокие течения при сбросе воды, а работы по укреплению берегов ведутся очень медленно.

**Чебоксарское водохранилище** образовано плотиной Чебоксарской ГЭС, расположенной в г. Новочебоксарске (Чувашская Республика). Заполнено в 1980–1982 гг. Площадь – 2190 км<sup>2</sup>, длина – 341 км, наибольшая ширина – 16 км, глубина – до 35 м [5]. Волга разделяет район Чебоксарского водохранилища на две орографические провинции: возвышенное правобережье, являющееся краевой частью Приволжской возвышенности, и низменное левобережье, представляющее Горьковско-Марийскую низменность. По этой причине склоны долины р. Волги в данном районе имеют резкую асимметрию. Правобережный склон долины высокий и крутой, в то же время местами развиты пойма и низкие надпойменные террасы длиной до 10–15 км [3, 6]. Левый склон долины состоит из поймы и трёх надпойменных террас, сложенных аллювиальными, преимущественно песчаными отложениями.

На правобережных склонах оползневые процессы и процесс переработки береговой линии происходят намного активнее, чем на левобережных. Активизация оползней зачастую связана с климатическими, гидрогеологическими и техногенными факторами. Активность переработки берегов Чебоксарского водохранилища увеличивается с повышением уровня воды в нем. Так, например, в 2004 г. при подъеме уровня на 0,15–0,20 м, среднегодовая величина отступления берега возросла в 1,2 раза по сравнению с 2002–2003 годами. Сейчас скорость переработки берегов в основном не превышает 0,5 м/год по отступанию бровки и 0,5–2 м<sup>3</sup>/м в год по объему размытых пород [5].

Сравнение гидрогеологических характеристик водохранилищ показывает, что Рыбинское водохранилище является самым большим из рассматриваемых, а его береговая линия наименее всего подвержена влиянию эрозионных процессов. Горьковское водохранилище – самое маленькое, и эрозионные процессы вдоль его береговой линии происходят со средней интенсивностью. Для Чебоксарского водохранилища характерна самая высокая степень интенсивности протекания эрозионных процессов.

Заметим также, что для всех трех водохранилищ характерны разные типы почв и растительности, что является одним из ключевых факторов, влияющих на развитие эрозионных процессов. Так, для Рыбинского водохранилища с заболоченными поймами характерна низкая оползневая и эрозионная активность, для Чебоксарского с преимущественно песчаными почвами и высоким холмистым правобережьем – высокая, для Горьковского водохранилища с дерново-подзолистыми почвами – средняя. При этом активность переработки береговой линии, наиболее интенсивная вдоль Горьковского водохранилища, приводит к тому, что величина смещения бровки берегового уступа на активных участках переработки и объем размытых пород здесь выше, чем в Рыбинском и Чебоксарском.

### Экзогенные геологические процессы

Переработка берегов протекает под влиянием волновой энергии воды и оползневых процессов. Опыт эксплуатации построенных крупных водохранилищ (Куйбышевского, Днепровского и др.) показывает, что разрушение берегов в отдельных случаях может продвигаться вглубь суши до 100–200 м. Эти процессы очень опасны для близко расположенных населенных пунктов.

Экзогенные геологические процессы (ЭГП) – это геологические процессы, возникающие в приповерхностной зоне литосферы под воздействием внешних природных и техноген-

ных факторов. К ЭГП относятся оползни и обвалы, карст, суффозия, овражная и речная эрозия, термокарст, наледи, подтопление и др. От активности этих процессов напрямую зависят скорость и масштабы процесса переработки берегов водохранилища.

Существует несколько групп факторов усиления ЭГП. К первой группе относят геологическое строение и рельеф, т.е. те факторы, которые на время прогноза можно считать неизменными. Ко второй группе факторов относят климат, гидрогеологические и геокриологические условия, растительность и почвы. К третьей группе факторов (быстроизменяющихся) относят метеорологические условия (атмосферные осадки, температура, ветер и т.д.), гидрологические (расходы и уровни воды в водоемах), сейсмические (землетрясения) и хозяйственную деятельность (вырубка лесов, подрезка склонов, сооружение насыпей, горные работы и т.д.).

Наиболее вероятное время активизации ЭГП в бассейне водохранилищ – периоды весеннего снеготаяния (апрель-май) и максимума осенних осадков (июль-сентябрь). На эти периоды обычно прогнозируется низкая активность обрушения и отступления береговой линии водохранилищ, волновая и ветровая эрозия в период максимума осадков весеннего снеготаяния (апрель-май) и осенних дождей (сентябрь-октябрь).

Состоянием и мониторингом ЭГП занимаются Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Гидроспецгеология», Центр мониторинга состояния недр (г. Москва). Ежеквартально выпускаются сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов и последствиях их воздействий на населенные пункты и хозяйственные объекты на территории Российской Федерации.

Для анализа данных об ЭГП на участке р. Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища были выбраны соответствующие данные из информационных сводок за 2007–2009 гг. [7–9]. Отметим, что до 2007 года мониторинг проявлений ЭГП на территории Центрального, Приволжского и Северо-Западного округов не проводился. Также при анализе данных сводок просматривается, что наблюдение за ЭГП на участке р. Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища проводится не самым тщательным образом, основное внимание уделено Южному, Сибирскому и Дальневосточному федеральным округам.

В рассмотренных сводках отмечаются случаи воздействия ЭГП на населенные пункты, земли и хозяйственные объекты, сопровождавшиеся незначительным ущербом. В основном это процессы активизации оползневых, карстово-суффозионных и эрозионных явлений. Отметим также, что ЭГП наиболее часто проявляют себя в местах, где велика крутизна склонов, эти места во многих случаях соответствуют высоким углам – более  $25^\circ$  от горизонтали.

Необходимо более тщательно исследовать проблему активизации оползневых и эрозионных процессов на участке р. Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища, развивать математические модели оценки устойчивости склонов, более тщательно подходить к вопросам мониторинга ЭГП на участках гидротехнических сооружений, таких как водохранилища. Зная законы и закономерности развития оползневых процессов и явлений, можно прогнозировать их образование и тем самым предупредить возможные аварии и катастрофы.

### **Возникновение и прогнозирование оползневых процессов**

Оползни могут быть вызваны действием разных факторов. Земная поверхность состоит главным образом из склонов. Некоторые из них устойчивы, другие в силу различных условий становятся неустойчивыми. Это происходит тогда, когда изменяется угол наклона откоса склона или если склон оказывается отягощён рыхлым материалом. При этом сила тяжести оказывается больше силы связности грунта. Это может быть вызвано:

- увеличением крутизны склона в результате подмыва водой;
- ослаблением прочности пород при выветривании или переувлажнении осадками и подземными водами;
- воздействием сейсмических толчков;
- строительной и хозяйственной деятельностью.

Оползни редко отмечаются на склонах крутизной менее 10–12°. И при уклоне 15° оползни возникают только при благоприятных геологических и гидрогеологических условиях. Но достаточная влажность пород, обеспечивающая их пластичность, всегда необходима. Можно отметить, что при соблюдении ряда необходимых условий оползни есть функция крутизны и высоты склона. Для возникновения оползней наиболее благоприятны такие геологические условия, когда в основании оползневого склона залегают водоупорные пласты, а выше лежат водоносные породы.

Оползни, вызванные изменением природных условий, как правило, не начинаются внезапно. Первоначальным признаком начавшихся оползневых подвижек служит появление трещин на поверхности земли, разрывов дорог и береговых укреплений, смещение деревьев и т.п. С максимальной скоростью (десятки км/час) оползни движутся в начальный период, с течением времени скорость постепенно замедляется. Именно благодаря постепенному возникновению, оползневые процессы можно прогнозировать.

В настоящее время в зависимости от конкретных условий оползневого склона разработано и применяется на практике достаточно много методов определения оползневых смещений, большинство из которых основано на применении геодезических методов.

Самый распространенный и простой метод оценки устойчивости склонов и откосов - метод аналогий, при этом по необходимости выполняются соответствующие расчеты и моделирование [10]. Метод основан на использовании данных наблюдений за устойчивостью откосов и склонов такой же крутизны, сложенных сходными породами. По данным этих наблюдений подбираются аналоги изучаемого участка. Применять этот метод можно только при уверенности, что сравниваемые инженерно-геологические условия эталонного и изучаемого участков аналогичны.

Учитывая, что в каждом регионе грунты имеют свои генетические особенности, предпочтительнее при прогнозировании применять механико-математические расчеты устойчивости склонов и искусственных откосов.

Существует группа методов, которые базируются на подборе наиболее опасной поверхности скольжения. Для этого заранее задаются углы откоса (по аналогии с другими естественными или искусственными откосами или по нормативным данным), а об устойчивости оцениваемого откоса судят по значению коэффициента безопасности.

В работе [11] описан метод расчета устойчивости для оползней консеквентной структуры. Условия равновесия оползня по плоскости скольжения здесь определяются следующим уравнением:

$$T = N \operatorname{tg} \varphi + CL, \quad (1)$$

где  $T$  - составляющая силы тяжести, стремящаяся сместить массы горных пород вниз по склону или откосу;  $N$  - составляющая силы тяжести, ориентированная перпендикулярно к поверхности скольжения, стремящаяся удержать массы горных пород в равновесии;  $f = \operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения пород;  $C$  - расчетное сцепление пород по поверхности или в зоне ослабления;  $L$  - длина поверхности скольжения. Здесь подразумевается, что поверхность скольжения – плоскость, имеющая однородный наклон.

Тогда коэффициент устойчивости оползня определяется из соотношения

$$\eta = \frac{(N \operatorname{tg} \varphi + CL)}{T}. \quad (2)$$

Обычно расчет устойчивости оползня усложняется тем, что поверхность скольжения может иметь неоднородный наклон, т.е. плоскоступенчатую форму, или нижняя часть оползня может быть затоплена, например водами реки, водохранилища и т.д.

Данная методика позволяет найти наиболее опасную поверхность скольжения, оценить устойчивость грунтовых откосов, в том числе при развитии контактных оползней и оползней с выдавливанием пород основания.

В работе [12] описана методика расчета точности и периодичности геодезических измерений при наблюдениях за смещениями на оползневых склонах, основанная на расчете среднеквадратических эллипсов смещений оползней с учетом их пространственно-временных характеристик. Однако данный метод трудно применить в рамках обобщенного исследования, так как для получения начального векторного поля для последующего построения среднеквадратических эллипсов требуется точное и систематическое наблюдение за определенным оползневым участком.

В работе [13] описан метод геодинамического потенциала, предусматривающий оценку вероятностного показателя опасности возникновения оползней или возможности их активизации. Геодинамический потенциал вычисляется по формуле

$$W_{\text{landside}} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - p_k), \quad (3)$$

где  $p_k$  - вероятность возникновения или активизации оползней в пределах площади с проявлением признаков  $k$ , относящихся к учитываемым при прогнозировании факторам. Для оценки риска активизации оползня привлекается информация по разнообразным факторам формирования и развития оползневых процессов.

Так как строение оползней, причины их возникновения и условия, способствующие их развитию, достаточно разнообразны, то и методы расчета их устойчивости применяются разные. Выбор метода расчета устойчивости должен определяться структурой оползня, формой выявленной или намечаемой поверхности скольжения, возможностью учета всех силовых воздействий на оползень, определяющих степень его устойчивости: состояние равновесия масс горных пород, слагающих оползень, постоянные или временные нагрузки, гидродинамическое давление, гидростатическое взвешивание, ускорение свободного падения при сейсмических колебаниях и др.

### Оценка запаса устойчивости склонов

Рассмотрев методы моделирования оползневых процессов, был выбран следующий метод оценки устойчивости склонов. Кроме средней крутизны, условия равновесия склона зависят и от его формы в вертикальном разрезе, т.е. его профиля [10]. В механике грунтов для случая общего предельного равновесия склонов в однородной среде выявлены зависимости между их основными характеристиками для следующих трех типов профилей:

1) для прямолинейного склона или откоса, ограниченного сверху и внизу горизонтальными плоскостями, определяемые путем подбора наиболее опасных круглоцилиндрических поверхностей скольжения;

2) вогнутого склона предельного очертания с вертикальной верхней частью максимальной возможной высоты  $H_0$ , ограниченного сверху горизонтальной плоскостью и неограниченно продолжающегося вниз, рассчитанные на основе предположения, что горизонтальный слой мощностью  $H_0$  сверху находится в упругом состоянии, а ниже весь грунт – в предельном;

3) выпуклого склона предельного очертания с вертикальной частью максимальной высоты  $H_0$  внизу и неограниченно продолжающегося вверх, установленные на основе предположения, что на всем склоне до глубины  $H_0$  грунт находится в упругом состоянии, глубже – в предельном.

Несмотря на различное очертание этих склонов и различие примененных методов расчета и гипотез, средняя крутизна склонов, находящихся в состоянии предельного равновесия или имеющих одинаковый коэффициент запаса устойчивости, во всех трех случаях оказывается почти одинаковой. Довольно обычный при глубоких смещениях естественный оползневый склон с одной оползневой ступенью представляет собой комбинацию этих двух

типов. На более высоких оползневых склонах обычно наблюдается и большее число (четыре-пять) оползневых ступеней.

Во всех случаях общее равновесие склона определяется соотношением пяти величин:

- крутизны склона;
- общей высоты склона  $H$ ;
- угла внутреннего трения грунта  $\varphi$ ;
- его сцепления  $c$ ;
- объемного веса  $\gamma$ .

При одинаковых геологических условиях, т. е. при постоянном значении величин  $\varphi$ ,  $c$  и  $\gamma$ , критическая крутизна склонов оказывается функцией только одной величины  $H$ , т. е. высоты склона.

Основываясь на изложенном для оценки устойчивости откосов, предполагая, что нарушение устойчивости откоса может произойти в форме обрушения со срезом и вращением, будем основываться на методе круглоцилиндрических поверхностей скольжения. На рис. 2 схематически представлена модель расчета устойчивости склона с помощью этого метода, где  $\varphi$  - угол внутреннего трения грунта, град;  $c$  - удельное сцепление грунта, т/м<sup>2</sup>;  $l$  - длина отрезка дуги скольжения в пределах данного блока, м;  $\alpha$  - угол наклона поверхности скольжения блока к горизонту;  $T = P \sin \alpha$  – сдвигающая сила, действующая на блок;  $N = P \cos \alpha$  – нормальная составляющая веса блока  $P$ .

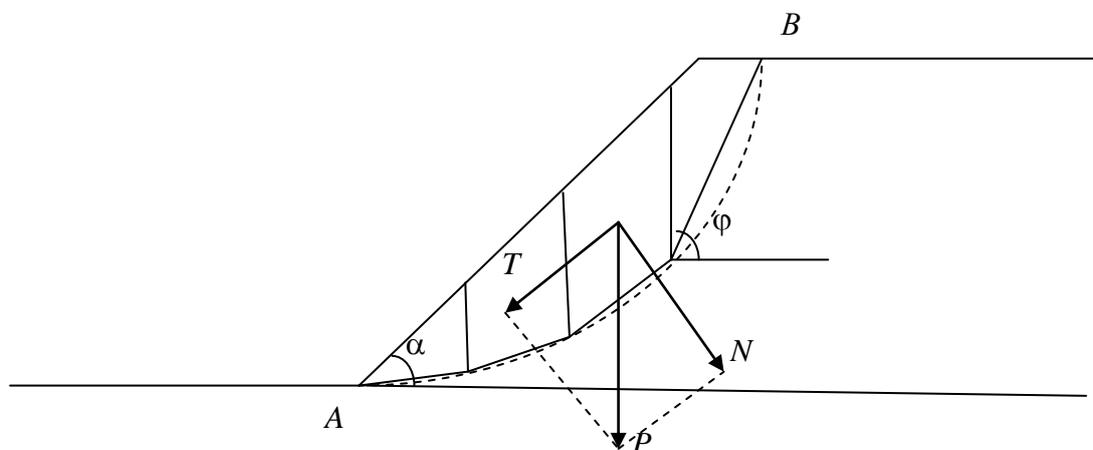


Рис. 2. Схема расчета устойчивости по схеме обрушения со срезом и вращением

Степень устойчивости откоса оценивается по величине коэффициента запаса устойчивости, определяемого по отношению момента удерживающих сил к моменту сдвигающих сил относительно центра наиболее опасной дуги скольжения:

$$n = \frac{M_{уд.}}{M_{сд.}} \quad (4)$$

Коэффициент запаса устойчивости - эта общепринятая характеристика склона или откоса. В момент начала оползания он равен единице, а если склон неподвижен, то коэффициент всегда больше единицы. Существуют нормативные значения для этого коэффициента, которые предусматривают запас устойчивости склона.

Для определения коэффициента устойчивости выделенный при расчете отсек, ограниченный кривой скольжения  $AB$ , разделяют вертикальными сечениями на ряд блоков, примерно одинаковых по ширине. Границы блоков назначают в местах перелома линии откоса, в местах пересечения границ различных слоев откоса с поверхностью скольжения и т.п. Далее определяют силы, действующие на каждый блок:

- сила  $P$ , приложенная в центре тяжести блока, равная собственному весу блока;
- реакция грунта на поверхности скольжения, которая состоит из силы трения, равной  $N \operatorname{tg} \varphi$ , прямо пропорциональной нормальному давлению;
- силы сцепления, равные  $CL$  для каждого участка;
- сдвигающая сила  $T = P \sin \alpha$ .

После этого определяют коэффициент устойчивости откоса для принятой поверхности скольжения. При этом выражение (1) можно записать в виде

$$n = \frac{\sum N_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum C_i L_i}{\sum T_i} = \frac{\sum P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum C_i L_i}{\sum P_i \sin \alpha_i}. \quad (5)$$

Рассмотрим всю береговую линию водохранилища, где имеются различные значения этих параметров, зависящие от многих условий. Ограничимся средними значениями, характерными для данного региона, а если быть точнее, то значениями, свойственными среднезернистому песку с тонкими прослойками глины и суглинка. Это наиболее характерный тип грунта для рассматриваемой области. Для него  $\varphi = 0,334 \text{ рад} \approx 19^\circ$ ,  $c = 5,2 \text{ т/м}^2$ ,  $\gamma = 1,97 \text{ т/м}^3$ .

По описанной модели поведен расчет коэффициента запаса устойчивости склонов для береговой линии Горьковского водохранилища. Расчет коэффициента производился по следующему шаблону. Для каждой точки карты, вычислялись коэффициенты запаса устойчивости по 8 ближайшим точкам (рис. 3).

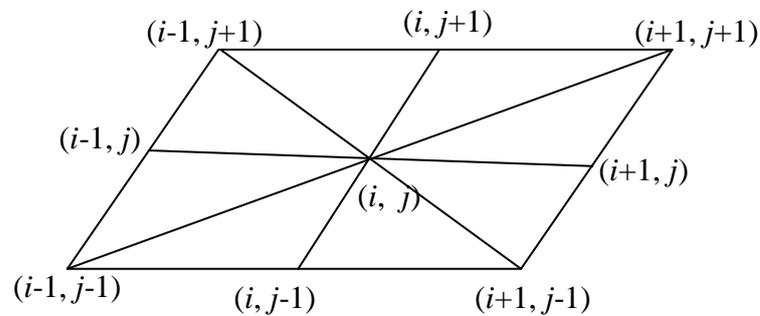


Рис. 3. Шаблон для вычисления коэффициента запаса устойчивости

Батиметрия региона Горьковского моря была получена с помощью программы Google Earth, а также с использованием топографических карт Горьковского водохранилища (рис. 4). Расчетная область представляет собой равномерную сетку, 1651\*4501 точек, с расстоянием между узлами 20 метров по вертикали и горизонтали. Так как средний уровень высоты Горьковского водохранилища над уровнем моря составляет 80 метров, а значения глубин мы не учитывали, то с целью упрощения расчетов все значения высот были понижены на 80 метров, получив нулевой уровень на поверхности водохранилища.

Полученная карта коэффициентов запаса устойчивости береговой линии Горьковского водохранилища представлена на рис. 5.

Проведем анализ полученных результатов. В основном наименее устойчивые склоны выделяются на правом побережье р. Волги. Так, в северной части водохранилища вблизи деревень Спириха, Мальгино, Скуратиха, севернее г. Юрьевца в Ивановской области наблюдаются склоны с коэффициентом запаса устойчивости менее 1,4 (рис. 6, слева). Если посмотреть на физическую карту того же региона (рис. 6, справа), то можно заметить, что в этом же месте обозначены обрывы. Это дает основание полагать, что полученный нами результат совпадает с реальной ситуацией на побережье. Действительно, в этом регионе склоны неустойчивые, и там идет процесс активного оползания.

Примерно также ситуация обстоит и южнее г. Юрьевца (рис. 7). Здесь коэффициент запаса устойчивости получился несколько больше, но есть небольшие участки, где присутствует оползневая опасность. Полученные результаты согласуются с данными из физической карты водохранилища, где также отмечены обрывы и овраги.

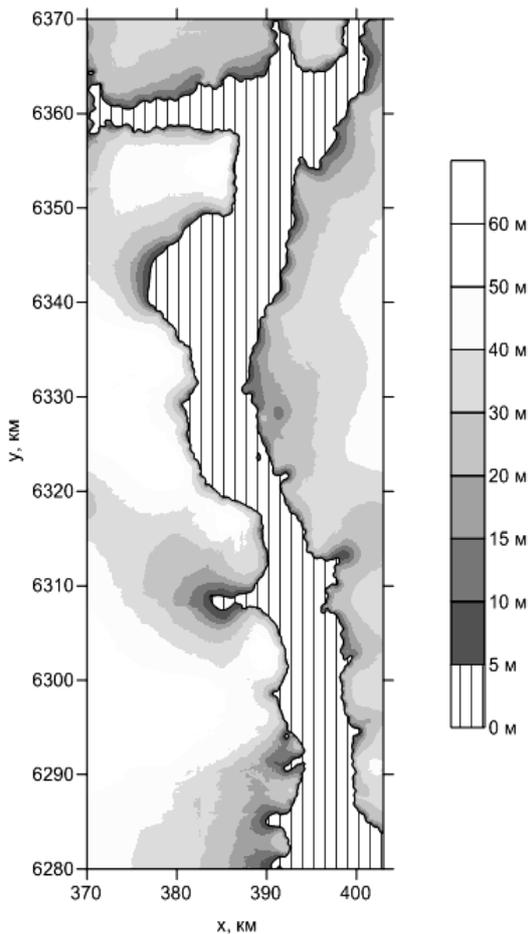


Рис. 4. Батиметрия Горьковского водохранилища

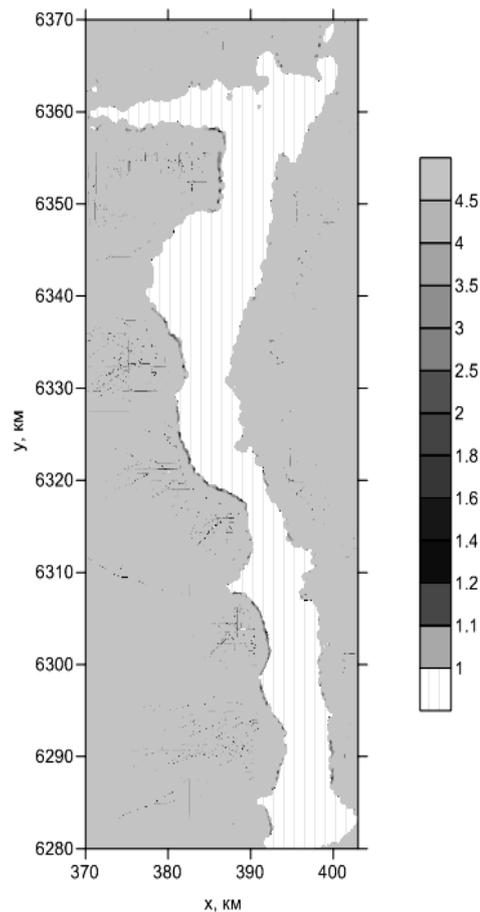


Рис. 5. Рассчитанные коэффициенты запаса устойчивости склонов для Горьковского водохранилища

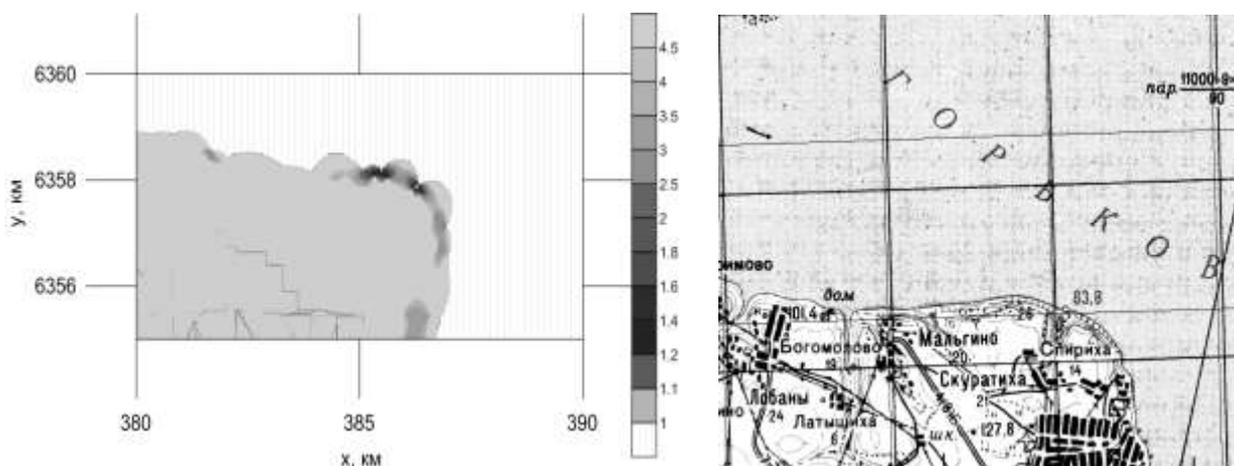
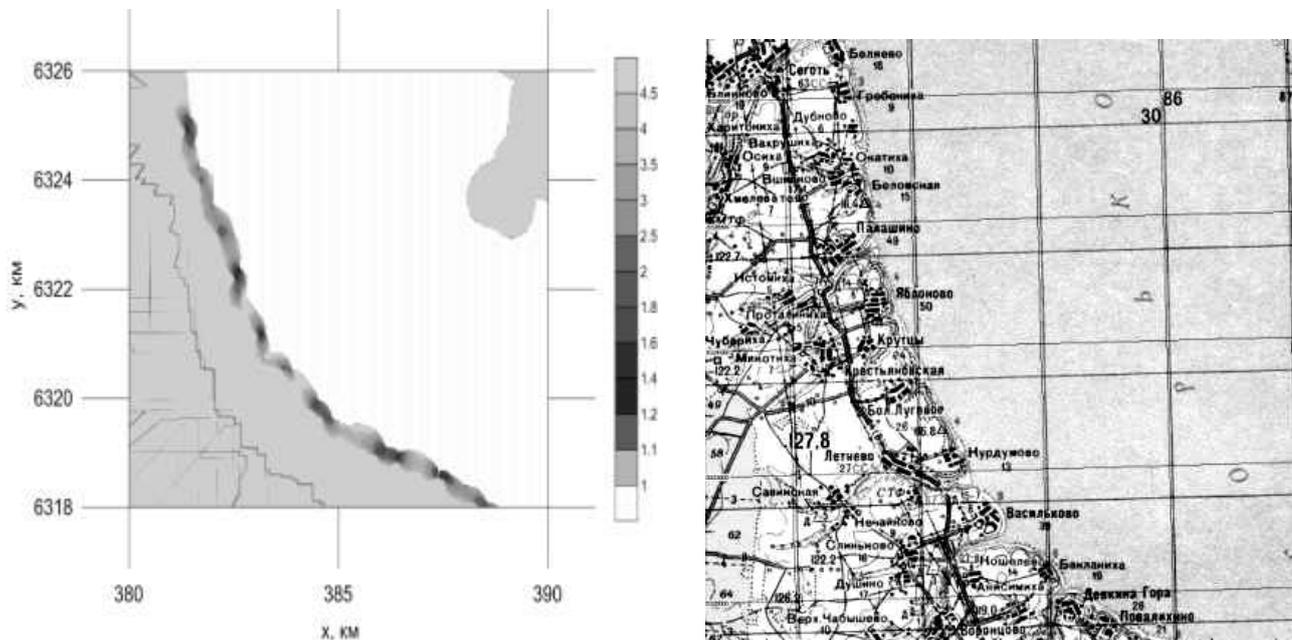


Рис. 6. Участок Горьковского водохранилища севернее Юрьевца: рассчитанные значения коэффициента запаса устойчивости (слева) и часть топографической карты (справа)

Также можно выделить склоны с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости севернее г. Пучежа Ивановской области в районе деревень Яблоново, Бол. Луговое, Кудрумово, Бол. Васильковое, Бакланиха, Девкина Гора. По высоте здесь склоны не превышают 20 метров, но, как можно видеть по физической карте, берег в некоторых местах имеет обрывы, отсюда и значения коэффициента запаса устойчивости ниже 1,4. Наличие здесь большого количества населенных пунктов увеличивает возможность ущерба хозяйству и населению от размывания и оползания берегов.

Еще одним из наиболее опасных участков на побережье является участок севернее поселка Катунки в Чкаловском районе Нижегородской области, вблизи деревень Лукинское, Дмитриево, Галашино. Здесь также имеют место обрывы в прибрежной зоне, что понижает значения коэффициента устойчивости склонов.

На левом побережье склоны более пологие, и если на физической карте и можно увидеть обозначение обрыва, то на нашей карте эти склоны обладают достаточно высоким коэффициентом запаса устойчивости. Это объясняется тем, что математическая модель не учитывает возможность подрезания водой склона, а также достаточно крупным разрешением батиметрической карты.



**Рис. 7. Участок Горьковского водохранилища южнее Юрьевца:**  
 рассчитанные значения коэффициента запаса устойчивости (слева)  
 и часть топографической карты (справа)

### Выводы

В настоящей работе представлены и систематизированы собранные гидрологические данные применительно к процессам, происходящим в бассейне Горьковского водохранилища, на участке реки Волга от Рыбинского до Чебоксарского водохранилища. Проведена общая оценка текущего состояния гидрогеологии водохранилищ по различным параметрам, относящимся к различным типам факторов: геологическое строение и рельеф (неизменные факторы), климат, и почвы (факторы, изменяющиеся в длительной перспективе), метеорологические условия и хозяйственная деятельность (быстроизменяющиеся факторы).

Собранные данные рассмотрены и проанализированы с точки зрения изменений гид-

режима водоемов. Выявлено, что эрозионные процессы в бассейне Горьковского водохранилища имеют среднюю интенсивность по сравнению с аналогичными процессами в бассейнах Рыбинского и Чебоксарского водохранилищ, но активность ЭГП присутствует. Показано, что экзогенные геологические процессы вдоль береговой линии Горьковского водохранилища происходят вследствие следующих факторов: геологического строения и рельефа местности (крутизна склонов, типы почв); гидрогеологических условий (уровень и глубина залегания подземных вод); метеорологических условий, а также хозяйственной деятельности (вырубка лесов, подрезка склонов, сооружение насыпей, горные работы и т.д.).

Исследованы процессы размыва и эрозии береговой линии с точки зрения оценки береговой устойчивости. Проведена оценка запаса устойчивости склонов берегов водохранилища, выявлены участки с наименьшим запасом устойчивости. Это участки побережья вблизи городов Юрьевец, Пучеж и пос. Катунки. Здесь имеют место крутые склоны и обрывы, коэффициент запаса устойчивости которых ниже 1,4, что позволяет говорить об оползневой опасности в этих регионах.

Научно-исследовательская работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (контракт № П205), а также при поддержке грантов Президента РФ для молодых российских ученых – докторов наук (МД-99.2010.5) и РФФИ 10 05 00199а.

#### Библиографический список

1. Подсистемы Мониторинга. - Приволжский региональный центр государственного мониторинга состояния недр [Электронный ресурс]. <http://www.monitoring.nn.ru>.
2. Горьковское водохранилище // Материал из Википедии – Свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Горьковское\\_водохранилище](http://ru.wikipedia.org/wiki/Горьковское_водохранилище).
3. Геологическая карта Поволжья и Прикамья [Карты] / под ред. К.Р. Чепикова; - 1:2 500 000, 250 км в 1 см; – 1 к. М.: Геология СССР, 1964.
4. Карта активности овражной эрозии на территории Российской Федерации в 2005 году [Карты] / под ред. В.В.Макарьяна, Н.А. Корнилова; 1:1 000 000, 100 км в 1 см; – 1 к. М.: ФГУГП «Гидро-роспецгеология», 2006.
5. Чебоксарское водохранилище // Википедия [Электронный ресурс]. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Чебоксарское\\_водохранилище](http://ru.wikipedia.org/wiki/Чебоксарское_водохранилище).
6. Государственная геологическая карта РФ [Карты] / Спб.: ВСЕГЕИ, 2000; 1:1 000 000, 100 км в 1 см; – 1 к.
7. Сводка о проявлениях экзогенных геологических процессов и последствиях их воздействий на населенные пункты и хозяйственные объекты на территории РФ за IV квартал 2007 г. - М.: Центр мониторинга состояния недр, 2008.
8. Сводка о проявлениях экзогенных геологических процессов и последствиях их воздействий на населенные пункты и хозяйственные объекты на территории РФ за IV квартал 2008 г. - М.: Центр мониторинга состояния недр, 2009.
9. Сводка о проявлениях экзогенных геологических процессов и последствиях их воздействий на населенные пункты и хозяйственные объекты на территории РФ за IV квартал 2009 г. - М.: Центр мониторинга состояния недр, 2010.
10. Емельянова, Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1972.
11. Анисимова, И.И. Моделирование состояния оползня для оценки опасности // материалы 15-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-15, Кемерово-Томск). – Екатеринбург; Кемерово: изд-во АСФ России, 2009. Т. 1. С. 528–529.
12. Симонян, В.В. Определение главных осей движения оползня по эллипсу смещений // Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров. – М., 2006.

13. Анисимова, И.И. Определение факторов риска активизации оползней / И.И. Анисимова, К.В. Симонов // материалы 14-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКФ-14, Уфа). – Екатеринбург; Уфа: изд-во АСФ России, 2008. Т. 1. С. 389–390.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.10*

**O.E. Khvostova**

### **SLOPE STABILITY ASSESSMENT OF GORKOVSKOE RESERVOIR SHORELINE**

In the present study, issues related to the hydrogeology of the basin of the Volga River from Rybinsk to Cheboksary Reservoir are reviewed and analyzed, evaluation of the current state of hydrogeology reservoirs on various parameters is performed. It is revealed that the erosion processes in the basin of the Gorky Reservoir has an average intensity in comparison with similar processes in the basins of the Rybinsk and Cheboksary reservoirs, but the activity is presented. Particular attention to the processes of erosion and shoreline erosion of the Gorky Reservoir is given. The mathematical and numerical model of the slope stability coefficient is presented.

*Key words:* water reservoirs hydrology, modeling of hydrogeological processes, landslides, coastal erosion, numerical simulation.

# ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.7

В.А. Утробин

## МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЛЯ РЕЦЕПТОРОВ СЕТЧАТКИ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

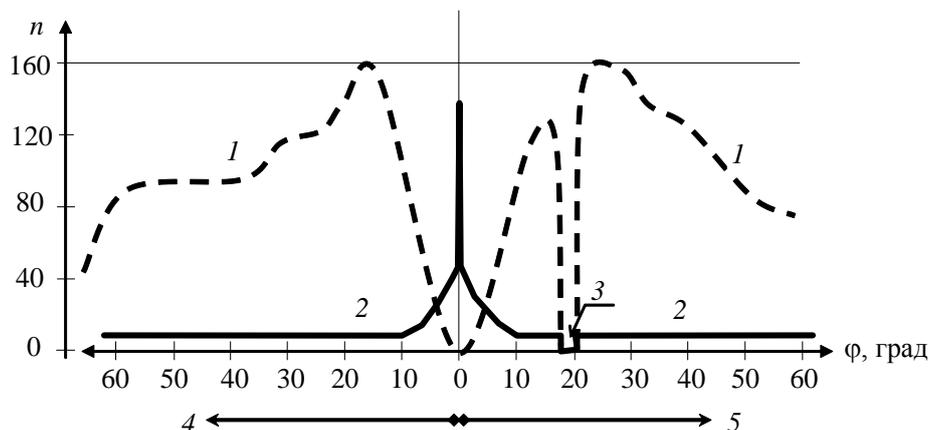
Рассматриваются способы организации поля рецепторов сетчатки глазного яблока с позиций теории активного восприятия. Выделяется два типа упорядоченных структур – решетки колбочек и решетки палочек. Вводится понятие картографических направлений на решетке. Исследуются варианты взаимодействия выделенных классов решеток между собой.

*Ключевые слова:* зрительные рецепторы, сетчатка, модель организации поля рецепторов.

### Введение

Поскольку глаз – система, то и сетчатка, понимаемая в узком смысле как поле рецепторов (в широком смысле – это пирамида нейронов над полем рецепторов), должна функционировать как единое целое. Поэтому дальним зонам рецепторов сетчатки необходимо поставить в соответствие рецептор (или рецепторы) из ближних зон. В результате плотность рецепторов в этих зонах должна возрастать не по закону  $2^n$ , а быстрее. Именно это и наблюдается в сетчатке глаза человека (с точностью до усредненных данных). Например, по данным, приведенным в работе [1], имеем: общее число палочек (125÷130) млн, колбочек – (6÷7) млн; плотность колбочек в центральной ямке (где палочек нет) порядка (113÷147) тыс./мм<sup>2</sup>; палочки появляются на расстоянии 130 мкм от центральной ямки небольшими скоплениями, а затем образуют как бы частокол, окружающий каждую колбочку; наибольшая плотность палочек до 170 тыс./мм<sup>2</sup> наблюдается на расстоянии (5÷6) мм от центральной ямки (порядка 20°); к периферии их становится меньше в три-четыре раза.

На рис. 1 показана примерная зависимость распределения числа ( $n$ ) палочек и колбочек (на  $10^{-3}$  мм) по углу отклонения от зрительной оси ( $\varphi$ ) [2].

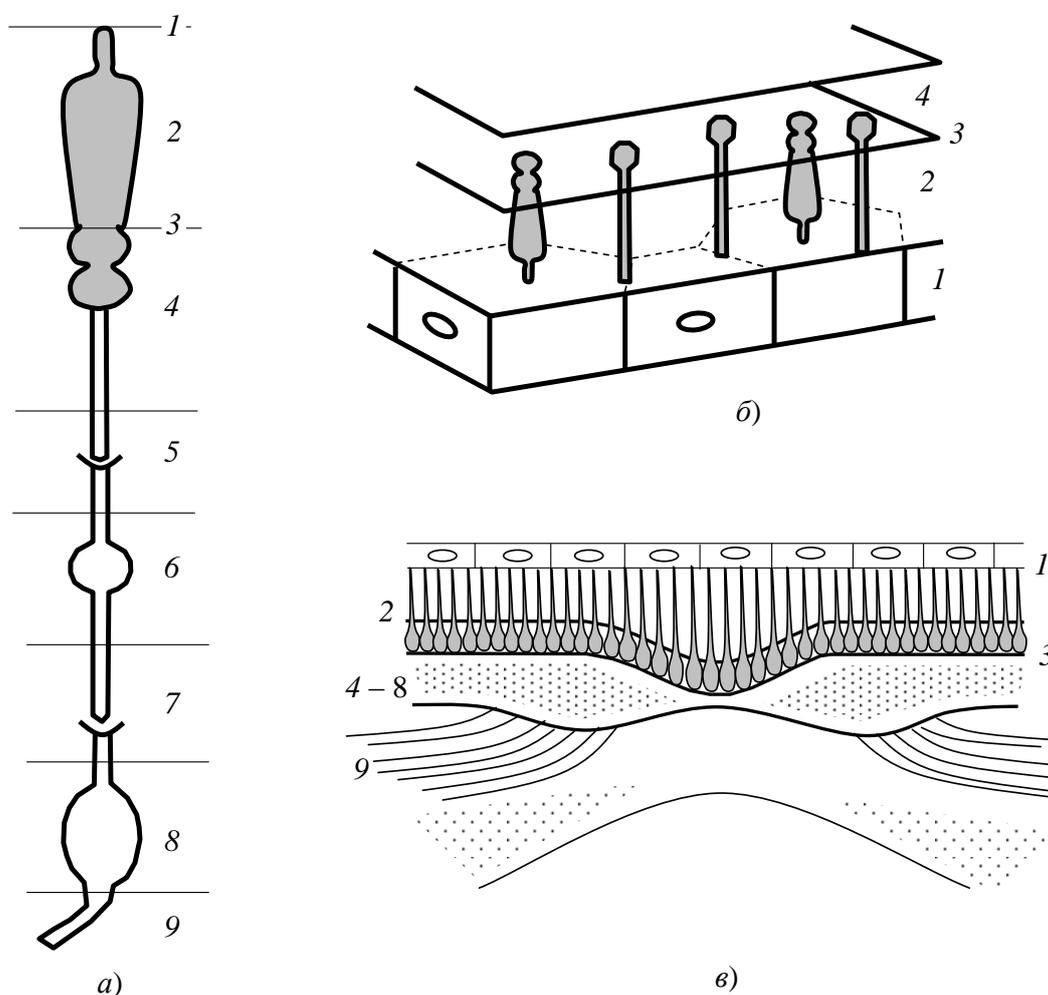


**Рис. 1. Схема распределения рецепторов на сетчатке:**

1 – палочки; 2 – колбочки; 3 – слепое пятно; 4 – височная сторона; 5 – носовая сторона

Если в центре *fovea* число колбочек (плотно упакованных так, что их размеры уменьшаются примерно в два раза, т.е. если колбочки – круговые цилиндры, то они сплющиваются в шестигранные цилиндры) порядка 2000 [3], то в области желтого пятна (где нет палочек) их порядка 50000 [4].

С позиций существования «двух зрений» – центрального и периферического, – известно следующее: максимальная чувствительность периферической части сетчатки к восприятию света соответствует углу  $10^{\circ} \div 12^{\circ}$  от центра [1]; уже на расстоянии  $10^{\circ}$  от центральной ямки острота зрения равна 0,2 и быстро спадает к периферии [5].



**Рис. 2. Схемы слоев сетчатки (а), «установки» рецепторов (б) и поперечного разреза сетчатки на участке центральной ямки желтого пятна (в):**

1 – пигментный слой; клетки имеют форму шестигранных призм, расположенных в один ряд; тела клеток заполнены зернами пигмента – фуcoxина; 2 – фоторецепторный слой, состоящий из палочек и колбочек; 3 – наружная пограничная мембрана; 4 – наружный зернистый слой, образованный ядрами;

5 – наружный сетчатый слой синапсов; 6 – внутренний зернистый слой, образованный телами и ядрами биполярных эритроцитов (второй нейрон); 7 – внутренний сетчатый слой синапсов;

8 – ганглиозный слой третьего нейрона; 9 – слой нервных волокон

Изложенное подтверждает развиваемые модельные представления и, в частности, утверждение о том, что часть рецепторов в составе периферических полей находится в центральных областях, т.е. «далеко» расположены относительно периферической зоны. Это определяет «длинные» аксоны в направлении от этой зоны к центру сетчатки. Для частичного устранения этого «дефекта» (т.е. выравнивание длин путей) необходимо «поднять» по оси глубины  $z$  нервные клетки. Именно это и наблюдается в реальной сетчатке над полем рецеп-

торов. Хотя изменение толщины сетчатки связано еще с одним процессом, заключающимся в исчезновении части нейронов над рецепторами при движении к центру *fovea*.

Известно следующее:

- в области желтого пятна строение сетчатки изменяется: по мере приближения к центральной ямке пятна (*fovea centrales*) *исчезает* слой нервных волокон, затем слой ганглиозных клеток и внутренний сетчатый слой; далее исчезает внутренний зернистый слой ядер и наружный сетчатый слой (рис. 2). На дне центральной ямки сетчатка состоит лишь из колбочек, а остальные элементы как бы сдвинуты к краю пятна [5];

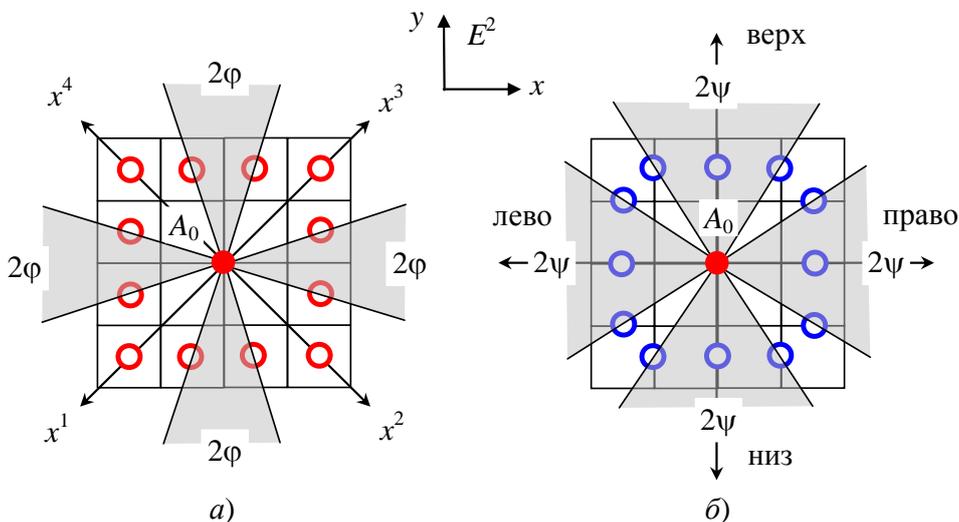
- в области ямки наблюдается утончение слоя нервных тканей, в которой к тому же нет кровеносных сосудов (создающих тень на сетчатке) [4]: толщина сетчатки около зрительного нерва порядка 0,4 мм; в области пятна – 0,1 мм; у зубчатой линии (на краю рабочей части сетчатки) – порядка 0,1 мм. Следует отметить также то, что «нервные волокна направлены к слепому пятну *по кратчайшему пути*, за исключением случаев, когда, идя по такому пути, им пришлось бы пересечь желтое пятно».

Итак, сетчатка – сложно организованная система как в «плоскости», так и по глубине. Имеющийся материал об ее организации носит описательный характер, а большая часть количественных оценок – статистические оценки – часто противоречивы (например, в одном источнике число колбочек до 7 млн, палочек до 130 млн, а в другом колбочек до 8 млн, палочек до 140 млн). Поэтому далее будем исходить из концепции подобия организации сетчатки на положения теории активного восприятия.

**Правило 1.** Область *fovea* – большая точка, отображаемая в центр обработки; колбочки – рецепторы дневного видения, образующие относительно палочек – рецепторов сумеречного видения (условно), независимую систему, упорядоченную в поле рецепторов; поле рецепторов разбито на области интересов *A, B, C*.

### Картографические направления на сетчатке

Пусть вокруг большой точки  $A_0$  упорядочены колбочки, образуя матрицу  $4 \times 4$  на планигоне. Относительно этой точки имеем, кроме диагональных, восемь направлений, образующих четыре конуса (или два полных конуса в плоскости) с углом при вершине  $2\varphi$ , где  $\varphi \approx 18,43^\circ$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 1/3$  (рис. 3, *a*). В результате получаем базовую меридиональную сетку поля сетчатки относительно полюса  $A_0$ , на которую с некоторым шагом (регулярным или нет) можно нанести линии параллелей. Полученная сетка – *картографическая сетка* на планигоне.



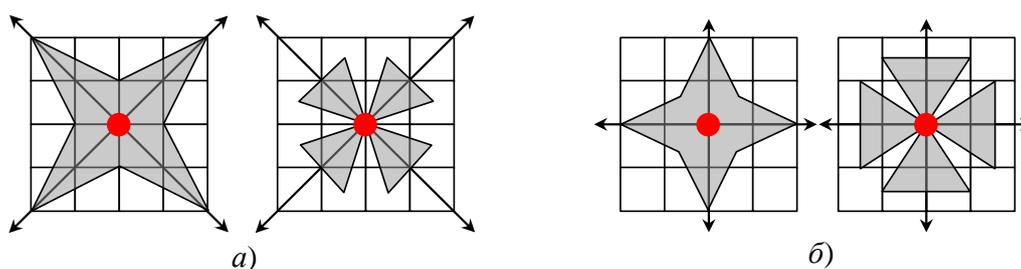
**Рис. 3. Картографические линии меридианов:**

*a* – для колбочек; *б* – для палочек

Далее, поскольку дендриты палочек имеют радиальную ориентацию и располагаются между отростками пигментного эпителия сетчатки [6], то, считая клетки планигона (рис. 3) клетками эпителия (в реальной сетчатке такие клетки имеют шестиугольную форму), получаем новую сетку меридианов для палочек (рис. 3, б). Такая сетка имеет базовыми координатными направлениями оси  $x$ ,  $y$  декартовой системы координат, каждой из которых можно поставить в соответствие пару конусов (в плоскости) с углом при вершине  $2\psi$ , где  $\psi \approx 33,69^\circ$ ,  $\text{tg}\psi = 2/3$ .

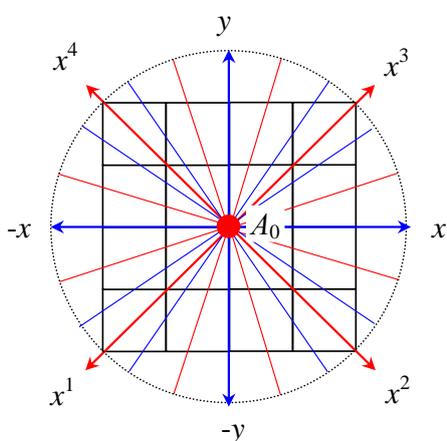
Полученные системы координат и картографических меридиональных линий удовлетворяют:

- положениям теории активного восприятия на ориентационные свойства системы полных групп по углам  $\varphi = \text{arctg}1/3$ ,  $\psi = \text{arctg}2/3$ ;
- известным положениям дифференциации свойств колбочек и палочек, где последние отвечают за ориентацию в пространстве;
- системе пропорциональных шкал на базе  $U$ -граммы.



**Рис. 4. Интерпретации координатных направлений на диагональную и прямую розы  $U$ -граммы:**  
а – для системы колбочек; б – палочек

Последнее свойство поясняется на рис. 4, а на рис. 5 показана общая система меридиональных линий сетчатки относительно полюса – большой точки  $A_0$  (стрелками выделены базовые направления). Рассмотрим эту систему линий, представленную на квадратном планигоне, с позиций симметрии.



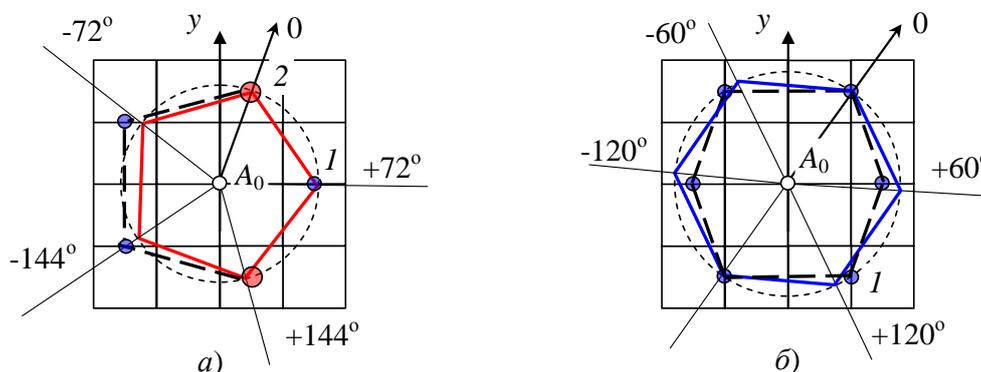
**Рис. 5. Меридианы полюса**

Во-первых, поскольку базовые координатные направления  $(x^1, x^2, x^3, x^4)$ ,  $(x, -x, y, -y)$  при вершине  $A_0$  имеют прямые углы, то они отражают симметрию четвертого порядка – квадратного планигона. Во-вторых, так как угол «конуса зрения» для колбочек, равный  $2\varphi \approx 36,86^\circ$ , по порядку значения числа близок к  $36^\circ$ , а в «расширенном» варианте –  $72^\circ$ , то имеем отражение симметрии пятого порядка (квазисимметрия). Аналогично для «угла зрения» палочек получаем:  $\psi \approx 33,69^\circ \sim 30^\circ$ , что соответствует в «расширенном» варианте углу  $60^\circ$ , т.е. имеем отражение симметрии шестого порядка (напомним, что палочки «растут из ребер» шестигранных призм).

Следовательно, квадратный планигон, наделенный «естественной» симметрией четвертого порядка, на меридианах колбочек и палочек наделяется дополнительными симметрическими свойствами, отражающими симметрии пятого и шестого порядков (пусть даже квази).

Выделим одну произвольную колбочку на планигоне, например, ту, которая находится на меридиане  $18,43^\circ$  относительно координатной оси  $y$  (рис. 6, а). Отложим от этого нулевого меридиана в ту и другую стороны угол  $72^\circ$ , получим линии с углами относительно оси,

равными  $90,43^\circ$  и  $53,57^\circ$ , что по порядку близко к меридианам палочек  $-90^\circ$  и  $56,31^\circ$ . Откладывая далее линии по углам  $\pm 144^\circ$ , получаем «деформированную» пентаграмму, в вершинах которой находится три палочки и две колбочки; только одно ребро такой пентаграммы «истинно правильное» – это то, которое наблюдается в первом квадранте планигона (позиция палочки отличается от «правильной» на  $0,43^\circ$ ).



**Рис. 6. Планигон с дополнительными симметрическими свойствами:**  
*a* – пятого порядка; *б* – шестого порядка; *1* – координатно упорядоченные палочки;  
*2* – координатно упорядоченные колбочки

Если проделать аналогичные процедуры для системы меридианов палочек на предмет выявления симметрии шестого порядка, то получим полностью «деформированный» шестиугольник, но такой, который, в отличие от пентаграммы на своих вершинах полностью состоит из палочек (рис. 6, б). Следовательно, пентаграмма (деформированная на планигоне) – отражение взаимодействия палочек и колбочек между собой.

*Свойство 1.* На планигоне с упорядоченными на нем рецепторами существует квазисимметрия пятого и шестого порядков.

### Алгебра изображения над полем рецепторов

Рецепторы – палочки и колбочки – точечные элементы, и поэтому для их представления на планигоне необходима реализация  $Q$ -преобразования. Если для колбочек, упорядоченных на решетке  $4 \times 4$ , решение однозначно, т.е. нейроны над этим полем изначально реализуют  $Q$ -преобразование, а далее  $U$ -преобразование, то для палочек, расположенных «в щелях пигментного эпителия» матрицы, вопрос открыт.

Как известно [7, 8],  $Q$ -преобразование, применяемое к пикселям изображения, определенного в конечной области, отображает это изображение в абсолютно гладкое многообразие. В это случае:

- планигон – инструмент, позволяющий выявлять на изображении его структурные элементы и их связи;
- каждый структурный элемент – визуальная масса, которая либо «размазана» однородно в области определения (вариант замкнутой области), либо локализована в центре области, как гравитационная масса (или электрический заряд), образуя область изменения потенциала по логарифмическому закону (вариант открытой двумерной области).

Поэтому уже на уровне первого слоя нейронов над полем колбочек можно получить представление на планигон, т.е. каждая колбочка – центр в своей области определения и эта область представлена (на выходе нейрона) визуальной массой. Для того, чтобы такая модель преобразований работала для палочек, «окружающих колбочки частоколом» (рис. 7, а, б), им необходим соответствующий планигон. Такой планигон (а точнее, решетку на уровне рецепторов) можно получить, если его строить смещенным на половину клетки планигона колбо-

чек (рис. 7, в, г). В этом случае сразу же возникают варианты организации полей палочек и колбочек, определяющие *направление смещения* выделяемого планигона:

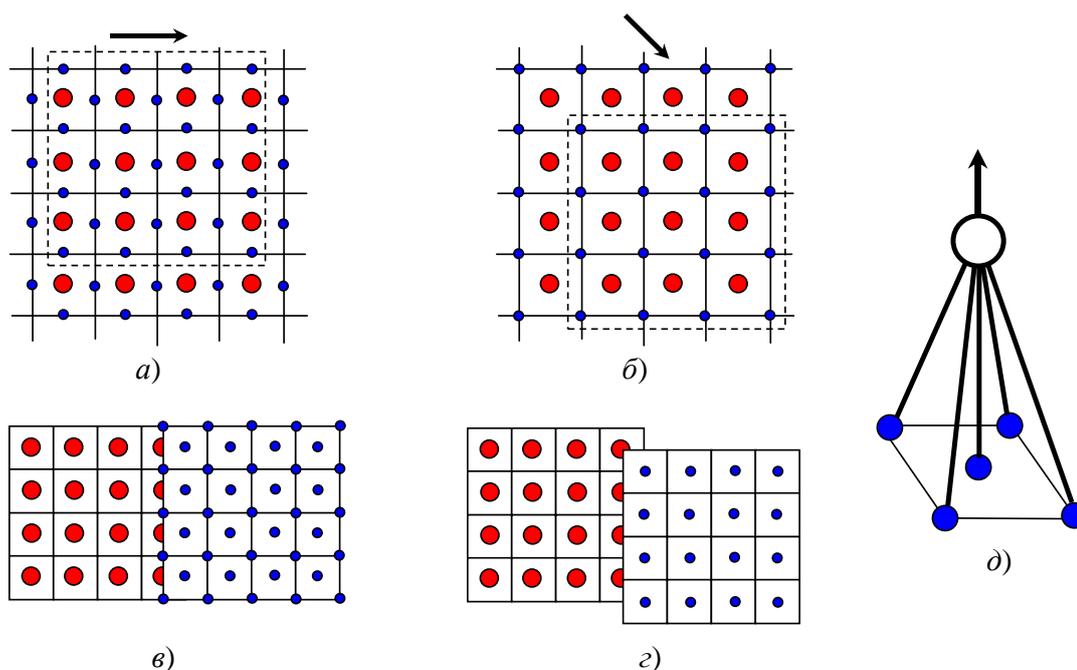
1) если каждая колбочка окружена *ромбом* палочек (рис. 7, а), то смещение можно реализовать по декартовым осям  $x, y$ ;

2) если же имеем *квадрат* палочек (рис. 7, б), то смещение должно реализоваться по диагональным направлениям.

В первом случае каждой пятерке палочек для их представления соответствует (после  $Q$ -преобразования) один нейрон (рис. 7, д).

Во втором случае имеем взаимно однозначное соответствие.

**Предложение 1.** Область сетчатки, где требуется высокая чувствительность при низком разрешении, имеет *ромбическую* укладку палочек относительно *квадратной* укладки колбочек. В противном случае (при низкой чувствительности и высоком разрешении) имеем *квадратные* укладки как палочек, так и колбочек.



**Рис. 7. Варианты организации решеток:**

а – палочек; б – колбочек; в, г – варианты смещенных полей рецепторов;

д – для варианта горизонтального (или вертикального) смещения нейрон должен «обрабатывать» сразу пять рецепторов

Поскольку имеем два типа планигонов (палочек и колбочек) и между ними существует связь по варианту рис. 6, а, то допустимо существует третий, их общий планигон, построенный над планигонами палочек и колбочек. Определим эти три планигона для отличия от планигона, используемого для анализа и синтеза в теории активного восприятия, *рецепторным R-планигоном*. Функционирование рецепторного планигона соответствует функционированию обычного планигона. Пусть рецепторный планигон колбочек ( $RK$ ) покрыт рецепторным планигоном палочек ( $RP$ , без какого-либо смещения), пусть такой планигон – замкнутая область определения, тогда каждая колбочка в пространстве обобщенного рецепторного планигона ( $RR$ ) «засвечивает» свою клетку планигона, а каждая палочка – пару соседних клеток планигона; результатом представления является образ изображения на общем рецепторном планигоне.

**Определение 1.** Подрешетке колбочек размером  $4 \times 4$  после реализации  $Q$ -преобразования соответствует  $RK$ -планигон; подрешетке палочек с *ромбической* организа-

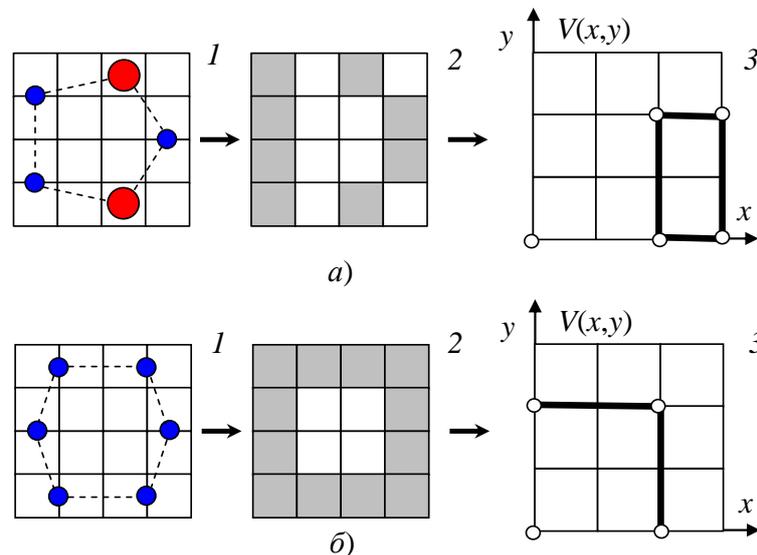
цией, совмещенной с подрешеткой колбочек размером  $4 \times 4$ , после реализации  $Q$ -преобразования соответствует  $RP$ -планигон;  $(RK, RP)$  планигоны образуют  $RR$ -планигон.

### Примеры

1. Пентагону по рис. 6, а, представленному «реакциями» колбочек и палочек, соответствует образ  $\bar{V}_4 V_9 + \bar{V}_8 \bar{V}_{13}$  замкнутой группы  $(V_4, V_9, V_8, V_{13})$  (рис. 8, а).

2. Шестиугольнику (рис. 6, б) на шести палочках соответствует образ полной группы (рис. 8, б).

*Утверждение 1.* На  $(RK, RP, RR)$  планигонах действует алгебра изображений и алгебра групп.



**Рис. 8.** Отображение полей рецепторов (1) на планигон (2) с представлением на решетке (3) для подмножества палочек и колбочек (а) и только палочек (б)

Подводя итог изложенному, выделим следующие положения:

1. Решетки колбочек централизованы относительно области ясного видения (*fovea*), как большой точки  $A_0$  (рис. 3, а).

2. Решетки палочек, по крайней мере, в ближней зоне к *fovea* также централизованы (рис. 3, б).

3. В ближней зоне от *fovea* существует  $RR$ -планигон и его подрешетки палочек и колбочек, совмещенные в соответствии с рис. 7, а.

4. В дальней зоне от *fovea* подрешетки палочек допускают смещения по координатным осям  $x$ ,  $y$  и диагональным направлениям относительно системы координат – квадрата *fovea*.

5. Область ясного видения и ближняя зона, представленная склеенными  $RR$ -планигонами, – область центрального зрения.

6. Дальняя зона на смещенных решетках и склеенных над ними  $RR$ -планигонами – область периферийного зрения.

### Библиографический список

1. Ковалевская, Е.И. Глазные болезни / Е.И. Ковалевская. – М.: Медицина, 1986. – 347 с.
2. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 т. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. Т. 2. – 480 с.
3. Элементы теории биологических анализаторов / под ред. Н.В. Позина. – М.: Наука, 1978. – 360 с.

4. Джадд, Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 528 с.
5. Глазные болезни / А.А. Бочарова [и др.]. – М.: Медицина, 1989. – 423 с.
6. Анатомия человека: в 3-х т. / под ред. М.Р. Санина. – М.: Медицина, 1993. Т. 2. – 633 с.
7. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 234 с.
8. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 228 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**V.A. Utrobin**

### **ORGANISATION MODELS OF THE EYEBALL RETINA FIELD OF RECEPTORS**

Considered ways of organising field of receptors of an eyeball retina from positions of the theory of active perception. There are two selected types of the ordered structures – lattices of cones and lattices of rods. The concept of cartographical directions on a lattice is entered. Investigated variants of interaction between selected classes of the lattices.

*Key words:* visual receptors, a retina, model of the organisation of a field of receptors.

УДК 681.586

А.В. Преображенский, Е.Н. Поселенов

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ «УГОЛ-КОД» НА СЕЛЬСИНЕ**

ФГОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта»

Рассмотрен алгоритм работы преобразователя «угол-код», состоящего из сельсина, аналого-цифрового преобразователя и компьютера. Приведены результаты испытаний преобразователя.

*Ключевые слова:* сельсин, компьютер, преобразователь «угол-код».

Сельсины широко применяются на водном транспорте как аналоговые датчики угла поворота вала различных механизмов. Компьютеризация автоматических систем, позволяющая внедрять эффективные интеллектуальные алгоритмы управления, предполагает замену сельсинов на цифровые датчики угла поворота вала или использование преобразователей «угол-код» на сельсине. В работе рассматривается преобразователь «угол-код», в котором обмотки сельсина, возбуждаемого пониженным напряжением, подключаются непосредственно к аналоговому порту управляющего компьютера. Многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) обычно входит в состав системы управления, так что дополнительного оборудования для построения преобразователя «угол-код» не требуется.

**Алгоритм определения угла поворота**

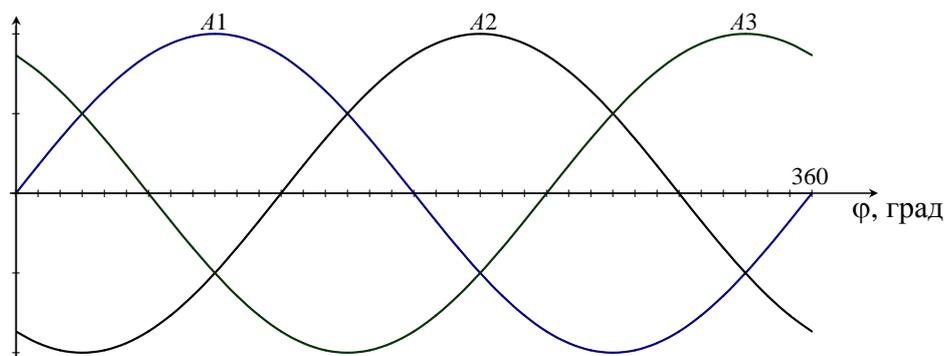
В идеальном случае напряжения на обмотке возбуждения и обмотках синхронизации сельсина

$$U_0(t) = A_0 \sin \omega t, \quad U_i(t) = A_i \sin \omega t \quad (i = 1, 2, 3),$$

$$U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) = 0, \quad (1)$$

$$A_1 = A \sin \varphi, \quad A_2 = A \sin(\varphi - 120^\circ), \quad A_3 = A \sin(\varphi - 240^\circ), \quad (2)$$

где  $\omega$  - частота напряжения питания,  $\varphi$  - угол поворота ротора сельсина относительно нулевого положения,  $A$  - максимально возможное значение напряжения, предполагаемое одинаковым для всех обмоток синхронизации сельсина. Изменение амплитуд напряжений  $U_i(t)$  в обмотках синхронизации в зависимости от угла поворота сельсина  $\varphi$  показано на рис. 1.



**Рис. 1. Зависимость амплитуд напряжений в обмотках синхронизации от угла поворота**

Из (2) следует

$$\frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} = \frac{\operatorname{tg}\varphi - \sqrt{3}}{3\operatorname{tg}\varphi + \sqrt{3}} = P, \quad \frac{A_2 + A_3}{A_2 - A_3} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{3}} = Q, \quad \frac{A_3 + A_2}{A_3 - A_2} = \frac{\operatorname{tg}\varphi + \sqrt{3}}{\sqrt{3} - 3\operatorname{tg}\varphi} = R,$$

$$\operatorname{tg}\varphi_P = \frac{\sqrt{3}(P+1)}{1-3P}, \quad \operatorname{tg}\varphi_Q = Q\sqrt{3}, \quad \operatorname{tg}\varphi_R = \frac{\sqrt{3}(R-1)}{3R+1}. \quad (3)$$

Значения  $\varphi_P, \varphi_Q, \varphi_R$ , полученные из соотношений (3) с использованием функции «арктангенс», обозначим  $\varphi^*$ . Функция «арктангенс» определена в диапазоне  $\pm\pi/2$ . Для определения значения  $\varphi$  в диапазоне  $0 \div 2\pi$  используем алгоритм

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi^*, & \text{если } \varphi^* > 0 \text{ и } A_2 < 0, \\ \varphi &= \varphi^* + \pi, & \text{если } (\varphi^* > 0 \text{ и } A_2 > 0) \text{ или } (\varphi^* < 0 \text{ и } A_3 < 0), \\ \varphi &= \varphi^* + 2\pi, & \text{если } \varphi^* < 0 \text{ и } A_3 > 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Алгоритм (4) поясняет рис. 2, где штриховкой показаны области значений угла  $\varphi$  при различных знаках величин  $A_2$  и  $A_3$ .

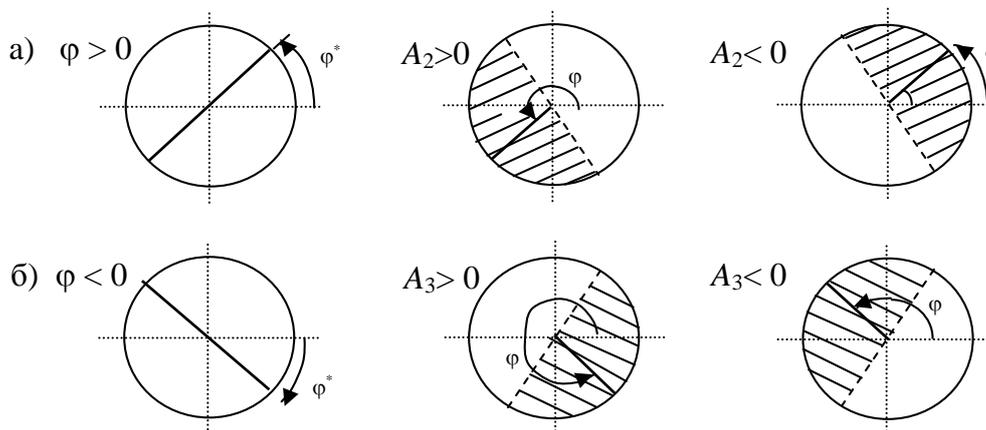


Рис. 2. Значения угла  $\varphi$  при различных знаках величин  $A_2$  и  $A_3$

Условие (1) на практике не выполняется, значения  $\operatorname{tg}\varphi_P, \operatorname{tg}\varphi_Q, \operatorname{tg}\varphi_R$  будут не одинаковы, и результаты измерений, выполненных по разным парам величин  $A_i$ , желательно усреднить. В области углов, близких к  $\pm\pi/2$ , где величина  $\operatorname{tg}\varphi$  меняет знак, а ее абсолютное значение велико, будем усреднять значения  $\varphi_P, \varphi_Q, \varphi_R$ , а в окрестности нулевого угла, чтобы исключить случаи суммирования углов, близких к  $0$  и  $360^\circ$ , – значения  $\operatorname{tg}\varphi_P, \operatorname{tg}\varphi_Q, \operatorname{tg}\varphi_R$ .

В рассматриваемом алгоритме важны не абсолютные значения  $A_i$ , а их соотношения, которые не изменяются при замене величин  $A_i$  на мгновенные значения напряжений в обмотках синхронизации  $U_i(t)$ . Для уменьшения влияния различных случайных факторов на результат измерения угла вместо величин  $A_i$  будем использовать величины

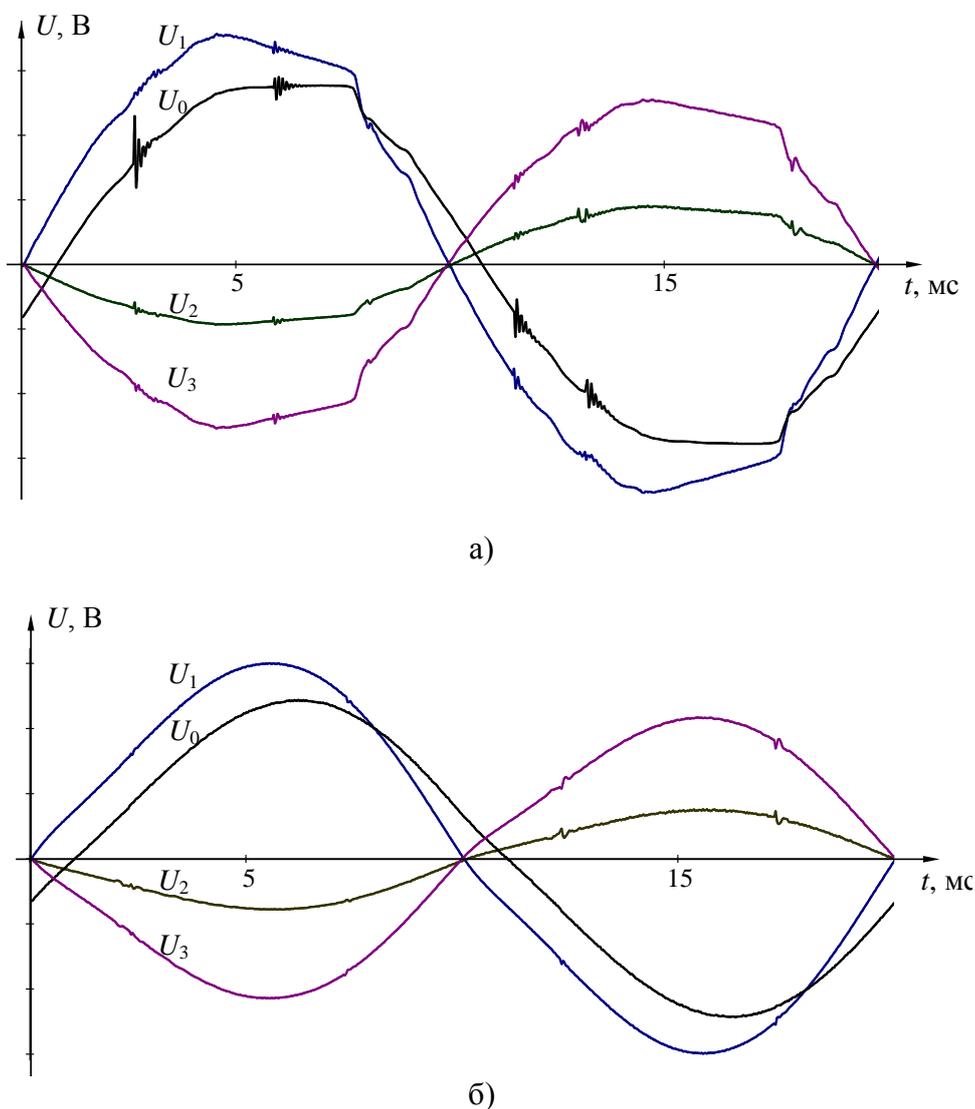
$$a_i = [\operatorname{sgn} \sum_{k=1}^N U_i(k)U_0(k)] * [\sum_{k=1}^N |U_i(k)|],$$

где  $U(k)$  – ряд дискретных «отсчетов» напряжений с обмоток сельсина, полученных с АЦП,  $N$  – число отсчетов. Первый множитель представляет знак напряжения в обмотке синхронизации: положительный – при синфазном и отрицательный – при противофазном напряжении  $U_i(t)$  по отношению к напряжению возбуждения  $U_0(t)$ .

Параметрами рассматриваемого алгоритма являются число отсчетов  $N$  и фаза напряжения возбуждения, при которой начаты отсчеты. Влияние этих параметров на результат измерения угла исследовано на лабораторном образце преобразователя «угол-код».

### Результаты эксперимента

Лабораторный образец преобразователя «угол-код» выполнен на сельсине типа СС - 404 и плате АЦП L-154, подключенной к персональному компьютеру. Подключение всех четырех обмоток сельсина к АЦП дифференциальное. Напряжение на обмотку возбуждения сельсина (5В, 50 Гц) подается с генератора синусоидальных сигналов или от сети через понижающий трансформатор. Минимальный временной интервал ввода данных с одного канала АЦП, при поочередном опросе четырех каналов, составляет 30 мкс. Пример осциллограмм напряжений в обмотках сельсина при питании от сети и генератора приведен на рис. 3. При испытании преобразователя получены следующие результаты.



**Рис. 3. Осциллограммы напряжений в обмотках сельсина:**  
а – при питании от сети; б – от генератора

Разброс результатов определения угла поворота по  $N = 10$  отсчетам, начатым при одной и той же фазе напряжения питания и занимающим по времени 0,3 мс, составляет около  $0,1^\circ$  и практически не снижается при увеличении  $N$  в десятки раз. Разброс одинаков при питании сельсина как от генератора, так и от сети, напряжение которой сильнее отличается от синусоидального и характеризуется повышенным уровнем помех. Можно утверждать, что случайные помехи и несинусоидальность напряжения питания практически не влияют на точность измерения угла поворота рассматриваемым методом.

Результат измерения угла при  $N = 10$  зависит от фазы напряжения возбуждения в момент начала отсчетов. Измерение по отсчетам, выполненным в области перехода напряжения возбуждения через нулевое значение, оказывается неверным, так как неправильно определяются знаки величин  $a_i$  вследствие фазового сдвига между напряжением возбуждения и напряжениями в обмотках синхронизации. Если исключить эти случаи, наибольшая разница значений угла (до двух градусов) наблюдается при определении угла по отсчетам, выполненным на положительной и отрицательной полуволне напряжения возбуждения.

Момент начала отсчетов не играет роли при определении угла по отсчетам, сделанным в течение целого периода напряжения возбуждения. В этом случае разброс результатов измерения зависит от угла поворота сельсина. Эта зависимость, полученная по 20 измерениям, представлена на рис. 4. Она сохраняется при измерении по отсчетам, снятым на нескольких целых периодах напряжения питания.

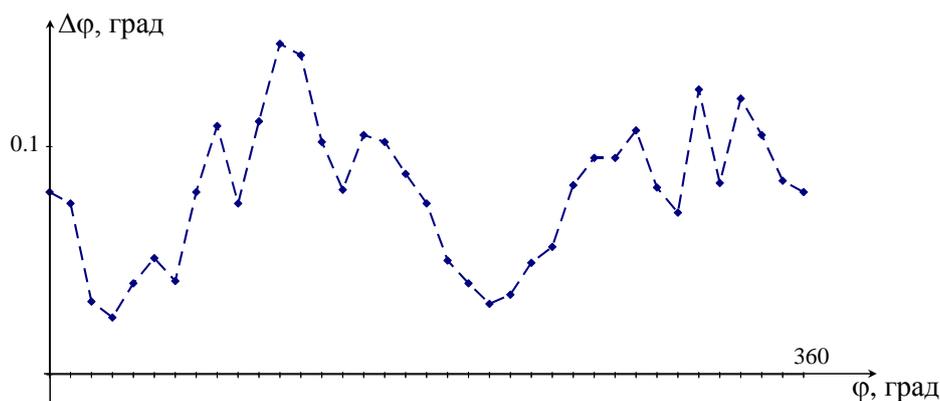


Рис. 4. Разброс результатов измерений

Для оценки погрешности преобразователя «угол-код» было проведено измерение угла поворота шагового двигателя типа ДШИ-200 с ценой шага  $1,8^\circ$  в пределах полного оборота. Величина шага, по показаниям преобразователя, изменялась в диапазоне от  $1,5$  до  $1,9^\circ$ . Погрешность преобразования в  $0,3^\circ$  соответствует классу точности сельсина.

Количество дифференциальных входов АЦП, используемых в преобразователе «угол-код», можно уменьшить, если считать соотношение  $U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) = 0$  точным и измерять напряжения с двух обмоток синхронизации, а не с трех. В этом случае значения угла получаются завышенными. Разница значений углов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ , полученных по опросам напряжений с двух и трех обмоток, зависит от угла поворота и достигает до  $1^\circ$  (рис. 5). Эта зависимость систематическая, при повторении измерений сохраняется.

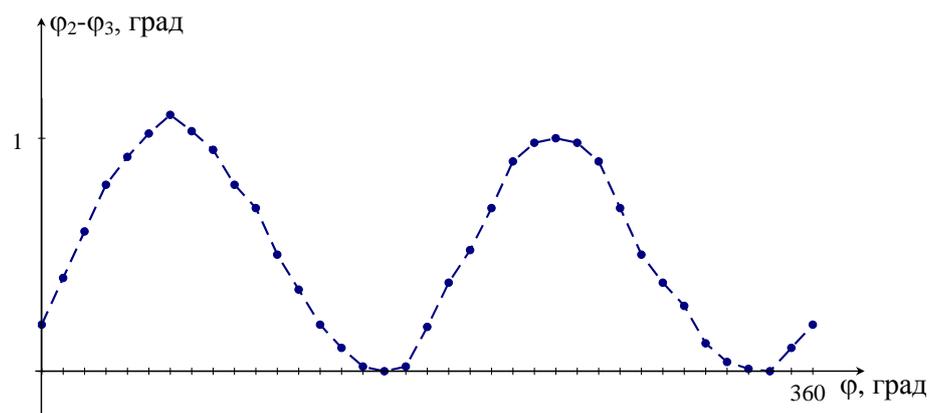


Рис. 5. Расхождение результатов измерений по сигналам с двух и трех обмоток

Судя по результатам эксперимента, рассмотренный способ преобразования «углокод» не вносит методической погрешности, погрешность определения угла зависит от точности сельсина и составляет около  $0.3^\circ$ .

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**A.V. Preobrazhensky, E.N. Poselenov**

### **ANGLE-CODE CONVERTER WITH SELSYN AND COMPUTER**

The algorithm of angle-code converting by using of selsyn and computer is considered. The results of converter testing are present.

*Key words:* selsyn, computer, angle-code converter.

УДК 004

А.В. Мордвинов

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАТЕГОРИЗАЦИИ ТЕКСТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы разработки методики по автоматической категоризации текстов, основанной на использовании модели текста, разработанной с помощью применения словарно-ориентированного алгоритма сжатия данных. Представленная модель текста позволяет учитывать не только лексическую, но и композиционную семантику документа, а также предоставляет возможность упростить этап индуктивного построения классификатора документов.

*Ключевые слова:* моделирование, текст, категоризация, автоматизация, алгоритм, сжатие.

За последние 10-15 лет задачи управления документами на основании их содержимого (обобщенное название – «извлечение информации», ИИ) приобрели особенно важное значение в области информационных систем ввиду постоянно повышающейся доступности документов в цифровой форме и вытекающей отсюда необходимости получать к ним доступ максимально быстрыми и удобными способами. Одной из таких задач является категоризация текста (КТ) – задача распределения текстов на естественном языке по тематическим категориям из заранее определенного набора. Появление задачи категоризации текстов относится к началу 60-х годов прошлого века, но только в 90-х она приобрела свою истинную значимость благодаря возросшему прикладному интересу и доступности более мощных аппаратных средств. КТ сейчас применяется во многих контекстах, начиная от индексирования документов на основе контролируемого словаря, заканчивая фильтрацией документов, автоматической генерацией метаданных, заполнением иерархических каталогов Интернет-ресурсов, атрибуцией текстов неизвестных авторов, а также в любых приложениях, требующих автоматизированной организации или диспетчеризации документов.

До конца 80-х наиболее популярным подходом к КТ, по крайней мере, в сообществе, занимающемся прикладными исследованиями, была инженерия знаний (ИЗ). Этот подход состоит в ручном задании набора правил на основании знаний экспертов о том, как классифицировать документы по заданным категориям. В 90-х годах XX века этот подход стремительно утратил популярность (особенно в исследовательском сообществе) в пользу парадигмы машинного обучения (МО). В соответствии с этим подходом производится индуктивное автоматическое построение текстового классификатора с помощью обучения на наборе заранее классифицированных документов.

КТ – задача присвоения булевого значения каждой паре  $(d_j, c_i) \in D \times C$ , где  $D$  – домен документов, а  $C = \{c_1, \dots, c_{|C|}\}$  – множество заранее заданных категорий. Значение  $T$  (*True*), присвоенное  $(d_j, c_i)$ , обозначает решение классифицировать документ  $d_j$  в категорию  $c_i$ ; тогда как значение  $F$  (*False*) обозначает решение не классифицировать документ  $d_j$  в категорию  $c_i$ . Более формально, ставится задача аппроксимировать неизвестную целевую функцию  $\check{F}: D \times C \rightarrow \{T, F\}$  (которая описывает, как документы должны быть классифицированы) посредством функции  $\Phi: D \times C \rightarrow \{T, F\}$ , называемой классификатором, такой, чтобы она максимально совпадала с  $\check{F}$ .

Тексты в обычном представлении не могут быть интерпретированы классификатором или алгоритмом построения классификатора. Поэтому к документам должна быть заранее применена процедура индексирования, которая ставит в соответствие каждому тексту ком-

пактное представление его содержимого. Выбор этого представления зависит от того, что считать значимыми элементами текста и какие правила естественного языка считать значимыми для комбинирования этих элементов. В задаче КТ вторая проблема обычно игнорируется, и текст представляется вектором весов элементов, выбранных в качестве текстообразующих. Типичным выбором на сегодняшний день является представление текста в виде вектора слов. Подобное представление текста представляется сильно ограниченным, соответственно исследования в области моделирования текста продолжают и являются актуальными с точки зрения развития методик КТ.

При построении любой автоматизированной системы по категоризации текстов необходимым является решение трех основных задач:

- индексирования документа и уменьшения размерности пространства элементов в полученном представлении;
- индуктивного построения классификатора документов;
- оценки эффективности созданной системы.

На сегодняшний день при решении задач индексирования документа и оценки эффективности системы ТК практически полностью полагается на базовые механизмы ИИ. Причина в том, что КТ – задача управления документами на основе их содержимого, поэтому имеет схожие характеристики с другими ИИ задачами, такими как, например, текстовый поиск. С одной стороны, это обоснованное решение, так как КТ является подзадачей ИИ, причем последняя дисциплина располагает гораздо более серьезной базой теоретических и практических исследований. С другой стороны, получается, что различные подходы к категоризации различаются в основном тем, как они решают проблему индуктивного построения текстового классификатора. Причем простота применяемой на первом этапе модели текста обуславливает необходимость использования сложных методик построения классификаторов, таких, например, как ансамбли классификаторов или boosting-техники. По этой же причине для обеспечения приемлемой эффективности системы приходится создавать выборки обучающих документов достаточно большого объема: по несколько десятков текстов для каждой категории.

В данной статье предлагается методика по категоризации текстов, которая позволяет:

- во-первых, упростить этап построения классификатора за счет использования классификаторов данных общего назначения вместо специализированных классификаторов текстов и их ансамблей;
- во-вторых, обеспечить высокую эффективность разрабатываемой системы при небольших объемах обучающей выборки.

Эти цели достигаются путем использования специально разработанной модели текста вместо общепринятого вектора весов слов.

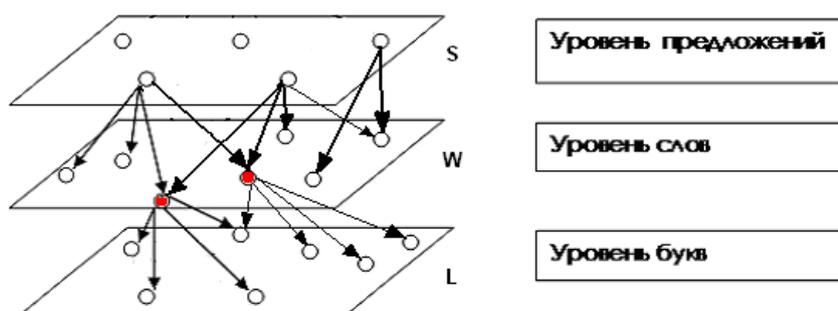


Рис. 1. Иерархия текстовой системы

С точки зрения системного подхода, текст обладает всеми признаками стационарной системы: с одной стороны, это целостный объект, в то же время мы можем выделить наи-

меньшие элементы текста, взаимодействие которых по определенным правилам порождает текст как систему. При этом потенциал текстовой системы (по такому параметру, как “смысловая нагрузка”) больше суммы потенциалов составляющих ее элементов:  $P(A) > [P(a_1) + P(a_2) + \dots + P(a_n)]$ . Кроме того, текст обладает четкой иерархической структурой, где каждый элемент более низкого уровня входит в состав какого-либо элемента более высокого уровня иерархии (рис. 1).

Таким образом, статистически каждый уровень текстовой системы может быть описан множеством соответствующих элементов, каждому из которых соответствует определенный вес – число ссылок на этот элемент (или частота встречаемости элемента) на более высоком уровне иерархии:  $\vec{S} = \{s_1, \dots, s_n\}$ ,  $\vec{W} = \{w_1, \dots, w_n\}$ ,  $\vec{L} = \{l_1, \dots, l_n\}$ .

Общепринятый в задаче категоризации подход состоит в том, что модель строится на множестве слов  $\vec{W} = \{w_1, \dots, w_n\}$ , из которого с помощью специальных техник выбираются элементы с максимальными весами. Для вычисления весов слов чаще всего используется функция  $tfidf(t_k, d_j) = \#(t_k, d_j) \cdot \log \frac{|Tr|}{\#Tr(t_k)}$ , где  $\#(t_k, d_j)$  обозначает частоту элемента  $t_k$  в документе  $d_j$ , а  $\#Tr(t_k)$  – число документов в обучающей выборке  $Tr$ , в которых встречается  $t_k$ .

Предлагаемый в данной статье способ моделирования текста основывается на использовании в качестве базы для модели данных, которые создаются словарно-ориентированным алгоритмом LZ78 в процессе кодирования текста и уничтожаются при завершении работы алгоритма (так называемый словарь). Используя эти промежуточные данные, мы можем с помощью ряда разработанных алгоритмов представить модель текста в виде дерева, которое содержит в себе те подстроки, которые кодировщик считал статистически значимыми для данного текста. Дерево объединяет в себе максимум  $M$  поддеревьев, где  $M$  – число символов входного алфавита (рис. 2).

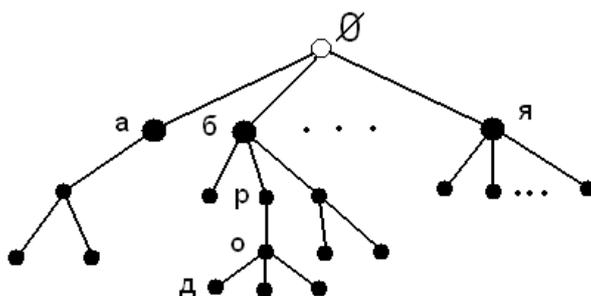


Рис. 2. Модель текста в виде дерева

Вес конкретной подстроки, содержащейся в дереве,  $P(X) = N + 1$ , где  $N$  – число нижележащих узлов дерева. Практически  $N$  равняется числу подстрок модели, образованных из данной. Если обозначить за  $m_x$  число вхождений подстроки в исходный текст, то будем иметь соотношение:  $P(X) < m_x$ .

Деревья применяются для визуального отображения модели и хранения ее информации в памяти ЭВМ, такое представление позволяет эффективно использовать рекурсию для извлечения и обработки данных модели. Однако в таком виде модель имеет слишком большую размерность для того, чтобы быть обработанной классификатором. Для снижения размерности и нормализации сравниваемых моделей каждая из них представляется в виде спектра подстрок заданной длины, которая может варьироваться от 1 до  $K$ , где  $K$  – число уровней дерева (рис. 3 и рис. 4). Подобная возможность динамически регулировать максимальную длину подстрок модели, считающихся значимыми при проведении обучения классификатора, позволяет использовать в системах по категоризации текстов один классифика-

тор с заранее настроенными параметрами, а настройку системы на особенности входных данных производить, изменяя уровень детализации спектров.

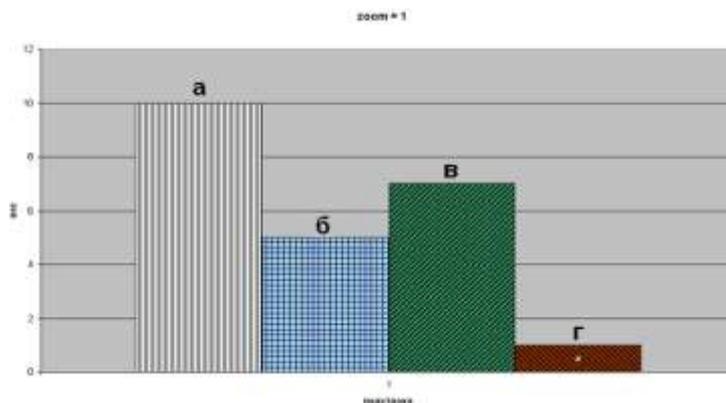


Рис. 3. Спектр модели текста с уровнем детализации 1

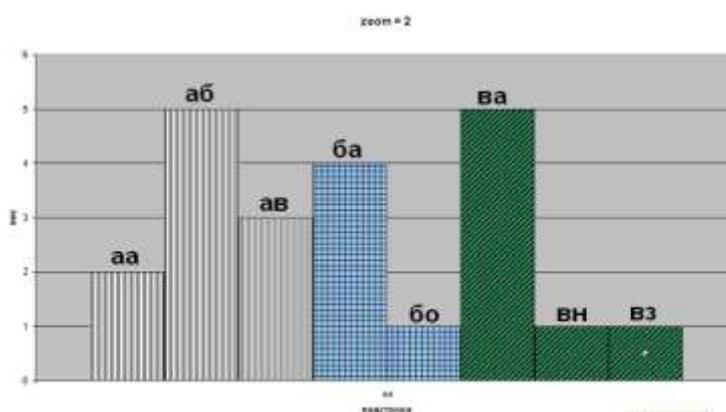


Рис. 4. Спектр модели текста с уровнем детализации 2

Рассмотрим теперь методику по категоризации текстов, использующую разработанную модель текста. Будем решать задачу в рамках МО подхода, основывающегося на том, что изначально доступна обучающая выборка документов  $Tr = \{d_1, \dots, d_{|Tr|}\} \subset D$ , уже классифицированная по категориям  $C = \{c_1, \dots, c_{|C|}\}$ .

Последовательность шагов:

- с помощью разработанных алгоритмов для каждого обучающего документа  $d_j \in Tr$  строим модель  $m_j$ ;
- выбираем уровень точности  $k$  и для каждой модели получаем спектр подстрок  $s_j$ , заранее уменьшая таким образом размерность векторов для классификации;
- зная для каждой  $c_i \in C$  подмножество  $Tr_{|c_i|} \subset Tr$  обучающих документов, рассчитываем для каждой категории профиль  $P_i$ , который содержит подстроки спектров документов из  $Tr_{|c_i|}$ , наиболее значимые для данной категории. Ценность подстроки будем оценивать по ее весу  $w_i = \sum_i \#(t_k, c_i) \cdot \ln \frac{|Tr|}{\sum_{j \neq i} \#(t_k, c_j)}$ , где  $\sum_i \#(t_k, c_i)$  – количество раз, которое

подстрока  $t_k$  встречается в спектрах категории  $c_i$ ;  $|Tr|$  – количество документов во всех категориях;  $\sum_{j \neq i} \#(t_k, c_j)$  – количество раз, которое подстрока  $t_k$  встречается во всех категориях, кроме данной;

- производим дополнительное снижение размерности, убирая из каждого профиля  $P_i$  подстроки, вес которых меньше определенного порогового значения  $\tau$ , определяемого экспериментально;
- в общем случае имеем  $|P_i| \neq |P_j|, \forall i, j$ , поэтому нормируем профили, добавляя в каждый из них отсутствующие подстроки из других профилей, присваивая им нулевой вес, собственным же подстрокам профиля назначаем вес 1; таким образом мы переходим к бинарным весам;
- имея для каждой категории  $c_i \in C$  профиль  $P_i: |P_i| = \text{const}, \forall i$  и спектры обучающих документов из  $Tr_{c_i} \subset Tr$ , вычисляем для каждого документа  $d_j$  вектор  $\vec{V}_j: v_{ji} = \begin{cases} 1, v_{ji} \in P_i \ \& \ v_{ji} \in S_j, \\ 0, v_{ji} \in P_i \ \& \ v_{ji} \notin S_j; \end{cases}$
- обучаем классификатор на множестве векторов  $V = \{\vec{V}_1, \dots, \vec{V}_j\}$ ;
- система по категоризации текстов по категориям  $C = \{c_1, \dots, c_{|C|}\}$  настроена и готова к работе.

Предложенная методика по категоризации текстов была реализована программно, ее эффективность проверена с использованием нескольких широкоизвестных обучающихся алгоритмов классификации данных: Decision Trees, Fuzzy Rules, SVM, MLP, PNN. При объеме обучающей выборки всего в три документа процент верно классифицированных документов составил: Decision Trees – 73%, Fuzzy Rules – 82%, MLP – 91%, PNN и SVM – 100%. Пример результатов классификации для алгоритма PNN представлен на рис. 5.

Row ID	S class	D Lit	D econom	D manag	D phyl	D progr	D psych	D vision	S Winner
Row0	Lit	0.702	0.03	0.032	0.023	0.046	0.083	0.084	Lit
Row1	Lit	0.599	0.045	0.047	0.036	0.064	0.105	0.106	Lit
Row2	vision	0.128	0.064	0.067	0.055	0.08	0.115	0.49	vision
Row3	vision	0.13	0.066	0.07	0.057	0.082	0.117	0.479	vision
Row4	psych	0.12	0.077	0.081	0.07	0.089	0.45	0.112	psych
Row5	psych	0.125	0.103	0.108	0.098	0.109	0.337	0.121	psych
Row6	econom	0.121	0.327	0.108	0.099	0.108	0.118	0.118	econom
Row7	econom	0.117	0.35	0.105	0.096	0.104	0.114	0.114	econom
Row8	manag	0.108	0.083	0.435	0.078	0.089	0.104	0.104	manag
Row9	phyl	0.116	0.116	0.122	0.298	0.116	0.116	0.116	phyl
Row10	progr	0.138	0.098	0.103	0.09	0.31	0.131	0.131	progr

Рис. 5

### Библиографический список

1. **Прангишвили, И.В.** Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
2. **Гаврилова, Т.А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000.
3. **Акимов, С.В.** Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза // Труды учебных заведений связи. СПб.: СПбГУТ. 2004. № 171. С. 165–173.
4. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983.
5. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С. Айвазян [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1989.

6. **Androutsopoulos, I.** 2000. An experimental comparison of naive Bayesian and keyword based anti-spam filtering with personal e-mail messages / I. Androutsopoulos [et al.] // In Proceedings of SIGIR-00, 23rd ACM International Conference on Research and Development in Information Retrieval (Athens, Greece, 2000). P. 160–167.
7. **Cohen, W.W.** 1995b. Text categorization and relational learning. // In Proceedings of ICML- 95, 12th International Conference on Machine Learning (Lake Tahoe, CA, 1995). P. 124–132.
8. **Cohen, W. W.** 1999. Context sensitive learning methods for text categorization / W. W. Cohen, Y. Singer // ACM Trans. Inform. Syst. 17, 2. P. 141–173.
9. **Dagan, I.** 1997. Mistake driven learning in text categorization / I. Dagan, Y. Karov, D. and Roth // In Proceedings of EMNLP-97, 2nd Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (Providence, RI, 1997). P. 55–63.
10. **Drucker, H.** 1999. Automatic text categorization and its applications to text retrieval / H. Drucker, V. Vapnik, D. and Wu // IEEE Trans. Neural Netw. 10, 5. P. 1048–1054.
11. **Fuhr, N.** 1994. Probabilistic information retrieval as combination of abstraction inductive learning and probabilistic assumptions / N. Fuhr, U. and Pfeifer // ACM Trans. Inform. Syst. 12, 1. P. 92–115.
12. **Lewis, D. D.** 1992b. Representation and Learning in Information Retrieval. Ph. D. thesis, Department of Computer Science, University of Massachusetts, Amherst, MA.
13. **YANG, Y.** 1999. An evaluation of statistical approaches to text categorization. Inform. Retr. 1, 1–2. P. 69–90.
14. **Joachims, T.** 2002. Guest editors' introduction to the special issue on automated text categorization / T. Joachims, F. and Sebastiani // J. Intell. Inform. Syst. 18, 2/3 (March-May). P. 103–105.

*Дата поступления*  
*В редакцию 15.10.2010*

**A. V. Mordvinov**

### **AUTOMATED TEXTS CATEGORIZATION METHOD**

Aspects of development of an automated texts categorization method based on the text model built using word-oriented compression algorithm are examined. The presented text model allows to take into consideration not only lexical, but also composition document semantics. It also allows to simplify the phase of inductive construction of text classifiers.

*Key words:* modeling, text, categorization, automation, algorithm, compression.

УДК 629.12 – 531.3

М.И. Фейгин

### ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДНА ПРИ ВЕТРЕ

Предлагаемый подход можно применять при использовании диаграммы в качестве исходной составляющей интеллектуального алгоритма авторулевого для дальнейшего точного установления параметров управления в натуральных условиях, а также в прогнозировании случаев потери управляемости судном при ветре.

Ключевые слова: движение судна, ветровое воздействие, расчет диаграммы управляемости.

Проблема управляемости судна при ветре включает несколько направлений, прежде всего это теоретическое исследование зарождаемости диаграммы управляемости при переходе от безветрия к слабому ветру и ее эволюции по мере увеличения скорости ветра. Существенное значение здесь имеет бифуркационный подход к установлению типов стационарных решений (движение в прямолинейном направлении, циркуляция, ветровые автоколебания) и условий их сосуществования и устойчивости. Другое направление связано с построением и исследованием диаграммы управляемости, включающим решение достаточно сложной системы трансцендентных уравнений [1, 2].

Не менее важной представляется прикладная сторона проблемы. Она включает подходы к приближенному построению диаграммы и применению знаний общей качественной картины поведения судна при ветре к конкретному судну в изменяющихся условиях плавания. Другими словами, необходимо разработать надежный интеллектуальный алгоритм авторулевого, способный адаптироваться к условиям и выполнять необходимые маневры [3].

Диаграмма управляемости судна при ветре определена как зависимость угла курса  $\psi$  установившихся движений судна в прямолинейном направлении от угла перекладки руля  $U$  при определенном отношении скорости истинного ветра  $V_i$  к скорости судна. Типичная диаграмма управляемости при  $V_i > 1$  приведена на рис.1. Координаты критических точек, выделенных кружками, обозначены  $U_j^{kr}, \psi_j^{kr}, j=1,2,\dots,6$ . Точки пересечения диаграммы с осью ординат обозначены  $\psi_1^0, \psi_2^0, \dots, \psi_7^0$ . При любом  $V_i$  строго попутному ветру соответствует  $\psi = 0, 2\pi$ , а встречному –  $\psi = \pi$ . Следовательно, три точки остаются неизменными:

$$\psi_1^0 = 0, \quad \psi_4^0 = \pi, \quad \psi_7^0 = 2\pi. \quad (1)$$

При определении других точек пересечения будем полагать симметричными по отношению к критическим точкам участки диаграммы управляемости, расположенные слева и справа от оси ординат, а расположенные в верхней и нижней половине диаграммы – зеркально симметричными относительно горизонтальной линии  $\psi = \pi$ . Тогда координаты остальных четырех точек пересечения диаграммы с осью ординат равны

$$\begin{aligned} \psi_2^0 &= 2\psi_1^{kr}, & \psi_3^0 &= 2\psi_3^{kr} - \pi, \\ \psi_5^0 &= 2\pi - \psi_3^0, & \psi_6^0 &= 2\pi - \psi_2^0. \end{aligned} \quad (2)$$

Если известны координаты точек  $U_j^{kr}, \psi_j^{kr}$ , определенные или методом исследования исходной системы уравнений движения судна при ветре или в результате натуральных испытаний, процедуру построения диаграммы управляемости можно существенно упростить. Рассматриваемый далее подход применим при использовании диаграммы в качестве интеллек-

туальной составляющей алгоритма авторулевого, а также в прогнозировании случаев потери управляемости судном при ветре.

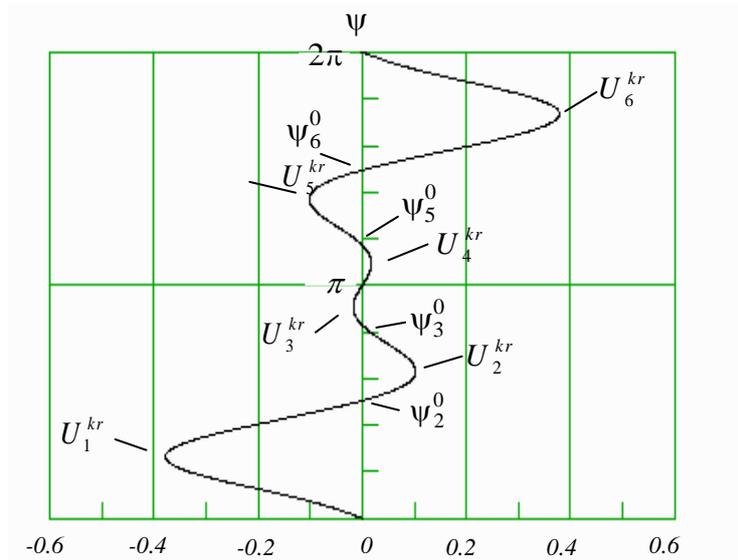


Рис. 1

**1. Интерполяционная формула.** Для любого из участков диаграммы в качестве интерполяционной формулы принимаем синусоиду с показателем степени  $a > 1$ . Вершина синусоиды совпадает с критической точкой

$$U = U_i^{kr} \sin^a \left( \frac{\pi(\psi - \psi_i^0)}{\psi_{i+1}^0 - \psi_i^0} \right). \quad (3)$$

При увеличении  $a$  участок диаграммы в окрестности критической точки сужается сильнее. Достаточно хорошее приближение к точно построенным диаграммам получается при  $a = 1.5$ . Это видно из приведенных на рис. 2 диаграмм управляемости неустойчивого в безветрии судна. Значения скорости ветра выбиралось с целью иллюстрации частичной потери управляемости в интервалах угла курса прямолинейного движения судна, когда критический угол поворота руля становится равным максимально допустимому.

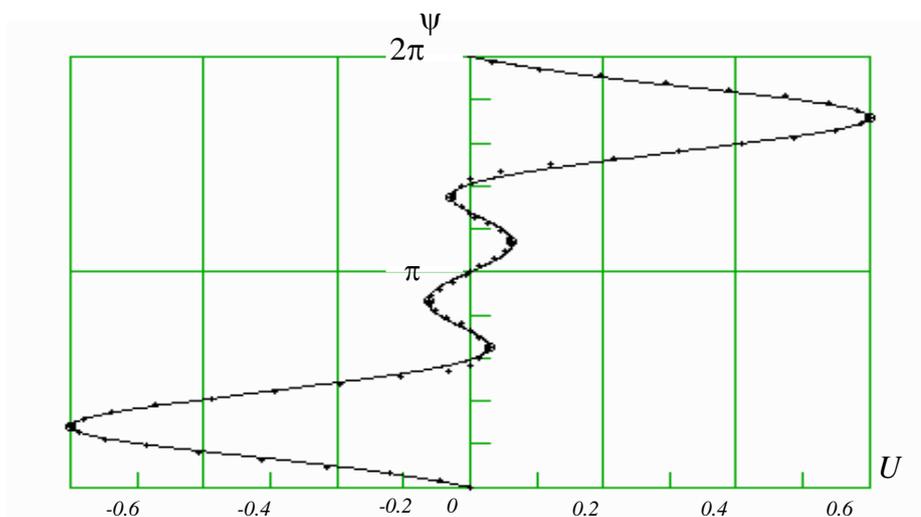


Рис. 2

Таким образом, построение диаграммы по формулам (1)–(2) не представляет сложности, если для каждого значения  $V_i$  известны соответствующие критические точки.

**2. Расчет критических точек.** Следующий шаг – это упрощение расчетов критических точек. Будем полагать, что путем решения соответствующей системы уравнений или в процессе натурных измерений получены координаты критических значений для трех скоростей истинного ветра  $V_{i1}$ ,  $V_{i2}$ ,  $V_{i3}$ .

$$U_{1j}, \psi_{1j}, U_{2j}, \psi_{2j}, U_{3j}, \psi_{3j} \quad (j=1, 2, \dots, 6). \quad (4)$$

Тогда для расчета критических точек на всем интервале  $V_i$  можно воспользоваться интерполяционной формулой Лагранжа для полинома второй степени

$$U_j(V_i) = f_1(V_i)U_{1j} + f_2(V_i)U_{2j} + f_3(V_i)U_{13}, \quad (3)$$

$$\psi_j(V_i) = f_1(V_i)\psi_{1j} + f_2(V_i)\psi_{2j} + f_3(V_i)\psi_{13}, \quad (4)$$

$$f_1(V_i) = \frac{(V_i - V_{i2})(V_i - V_{i3})}{(V_{i1} - V_{i2})(V_{i1} - V_{i3})}, \quad (5)$$

$$f_2(V_i) = \frac{(V_i - V_{i1})(V_i - V_{i3})}{(V_{i2} - V_{i1})(V_{i2} - V_{i3})}, \quad (6)$$

$$f_3(V_i) = \frac{(V_i - V_{i1})(V_i - V_{i2})}{(V_{i3} - V_{i1})(V_{i3} - V_{i2})}. \quad (7)$$

Результаты строго аналитических зависимостей и расчета по интерполяционным формулам (3)–(6) приведены на рис. 3 и рис. 4.

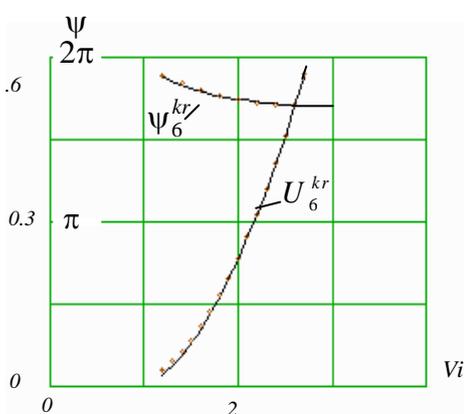


Рис. 3

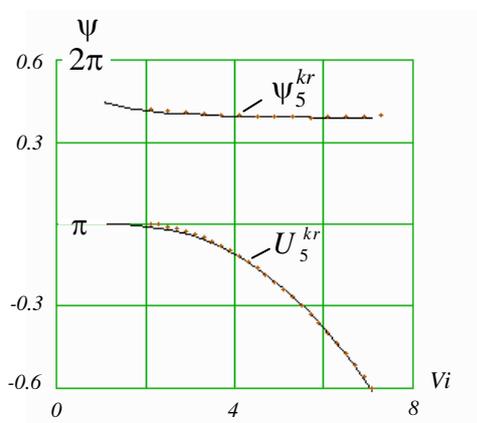


Рис. 4

**3. К прогнозированию потери управляемости.** Как видно из рис. 3 и рис. 4, значения  $\psi_6^{kr}$  и  $\psi_5^{kr}$  (следовательно, и симметричные им  $\psi_1^{kr}$  и  $\psi_2^{kr}$ ) с ростом  $V_i$  и приближением к ситуации потери управляемости практически не изменяются.

Таким образом, в соответствии с (1) можно считать неизменными значения  $\psi_2^0$  и  $\psi_6^0$ . Будем полагать, что указанные опорные точки для наиболее существенных участков диаграммы известны. Тогда приближенная формула (2) участка диаграммы позволяет оценивать величину соответствующего критического угла путем периодических измерений в натуральных условиях установившихся значений углов курса  $\psi$  и перекладки руля  $U$ :

$$U_1^{kr} \approx U / \sin^a \left( \frac{\pi \psi}{\psi_2^0} \right). \quad (8)$$

По степени приближения  $U_1^{kr}$  к предельному значению  $U_{\max}$  можно судить о приближении потенциально аварийной ситуации потери управляемости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 04-01-00815.

#### Библиографический список

1. **Фейгин, М.И.** Зарождение и эволюция диаграммы управляемости судна при ветре // Вестник ВГАВТ. Межвузовская серия: Моделирование и оптимизация сложных систем. 2005. Вып. 14. С. 9–17.
2. **Фейгин, М.И.** К построению диаграммы управляемости судна при ветре в натуральных условиях / М.И. Фейгин, А.В. Попов // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: тез. докл. IX Международного семинара. – М.: ИПУ РАН. 2006. С. 134–146.

Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010

**M.I. Feigin**

#### COMPUTATION OF THE CONTROLLABILITY DIAGRAM FOR A SHIP SUBJECT TO THE ACTION OF A WIND

We propose a method to approximately compute the controllability diagram for a ship subject to the action of a wind. This approximate controllability diagram is then used as the input in the self-learning algorithm that in-situ defines the parameters for safe ship auto-piloting. The abovementioned approach is also effective in forecasting controllability loss of a ship.

*Key words:* ship motion, wind influence, computation of controllability diagram.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.923: 621.922

В.В. Глебов, Д.А. Игнатьев, М.Е. Егоров

### УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Высокая хрупкость неметаллических конструкционных материалов определяет сложность выбора оптимальных условий механической обработки. Неметаллические конструкционные материалы широко используются при создании современных машин. Для обработки указанных материалов применяются в основном методы шлифования, осуществляемые путем интенсивного трещинообразования. Рассмотрены критерии при зарождении и распространении трещины в теле детали из хрупких неметаллических материалов. Предложено использовать специальный инструмент, оснащенный виброгасителем, с дискретно управляемыми упругими свойствами.

*Ключевые слова:* стекло, шлифование, трещина, неметаллические конструкционные материалы, виброгаситель, жесткость, демпфирование.

При изготовлении современной техники сохраняется общая тенденция к постоянному повышению требований, предъявляемых к исполнительным поверхностям машин и приборов, что требует совершенствования технологических процессов, одновременно обеспечивающих, как высокое качество, так и высокую производительность обработки. Типовыми деталями, применяемыми в различных конструкциях, являются призмы, шайбы, плитки, пластины и т.д. с протяженными плоскими рабочими поверхностями высокой точности, высокими требованиями к качеству поверхностного слоя.

Такие детали изготавливают из оптических стекол и ситаллов, различных марок, керамики, относящихся к группе хрупких неметаллических материалов (далее стекла), которые находят широкое применение вследствие благоприятного сочетания их оптических, механических и эксплуатационных свойств [2].

Высокая твердость стекла обуславливает при изготовлении деталей, использование методов абразивной обработки, в частности, для случая обработки плоских поверхностей – торцовое шлифование.

Если рассмотреть данный процесс с точки зрения механики разрушения, то в результате контактного взаимодействия двух твердых тел образуются области с напряженным состоянием. С ростом напряжения в материале происходит накапливание микроповреждений, что в дальнейшем приводит к зарождению очага разрушения (исходной трещины). Зависимость максимальной величины напряжения от амплитуды колебаний  $A$ , силы прижима  $F$  и радиуса округления абразивных зерен  $R$ , согласно [4], имеет вид

$$\sigma_{\max} = 2,9n^{0,3}\eta^{0,3}A^{0,45}F^{0,7}R^{0,15}, \quad (1)$$

где  $n$  - число зерен абразива, приходящегося на единицу площади торца инструмента;  $\eta$  - постоянная, зависящая от свойств абразива и материала детали.

Описание процесса разрушения можно представить иллюстрацией (рис. 1). Вначале при внедрении зерна, форма которого принята сферической, в обрабатываемый материал контакт характеризуется как упругий (рис. 1, а), но при достижении максимума касательных напряжений под поверхностью возникает зона пластичности (ЗП) (рис. 1, б). На поверхности у границы площадки контакта, в зоне растягивающих напряжений, появляются отдельные дуговые трещины. При больших нагрузках таких трещин становится больше, и длина их увеличивается. В итоге дуговые трещины сходятся, образуя одну или несколько кольцевых трещин, вложенных одна в другую. При дальнейшем повышении нагрузки кольцевая трещина перерастает в коническую (КТ) в виде усеченного конуса (рис. 1, б), так называемого конуса Герца [4]. Согласно исследованиям [4], при вдавливании зерна и достижении максимальной величины силы прижима  $F$ , вызывающей максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ , на поверхности появляется кольцевая трещина диаметром

$$d = 2,23 \sqrt[3]{\frac{R F}{E}}, \quad (2)$$

где  $E$  - модуль упругости обрабатываемого материала.

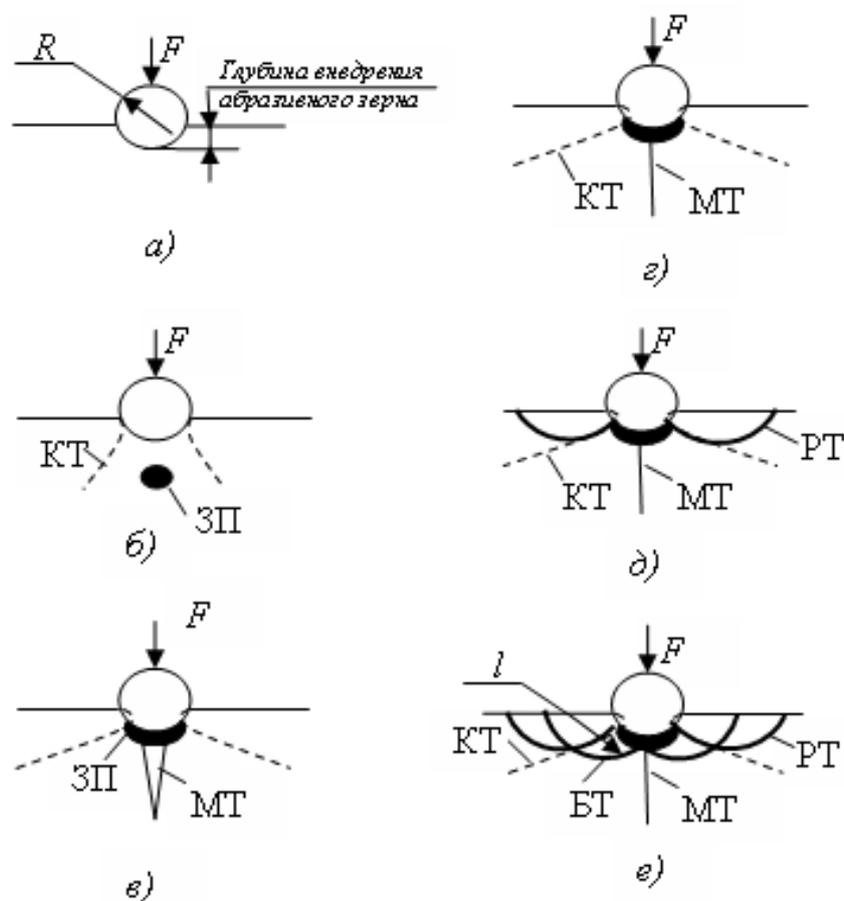


Рис. 1. Схема образования трещины

Кроме того, увеличение нагрузки приводит к увеличению зоны, где возникает пластическая деформация, у основания которой появляется медианная трещина (рис. 1, в), что, в свою очередь, при определенных условиях может привести к неисправимому браку. При разгрузке медианная трещина закрывается за счет сжимающих сил упругодеформированной части материала (рис. 1, г). Однако при разгрузке на поверхности образца напряжения меняют знак, и при остаточной силе, равной примерно половине максимальной, возникает система радиальных трещин (РТ) (рис. 1, д). Такие трещины зарождаются у краев контактной

площадки и растут при дальнейшей разгрузке. После полного снятия нагрузки под пластическидеформированной зоной возникают большие растягивающие напряжения, которые создают систему боковых трещин (БТ) (рис. 1, *e*). Эти трещины берут свое начало от границы пластической зоны. В момент снятия нагрузки, что соответствует моменту выхода абразивного зерна из зоны контакта с обрабатываемой поверхностью, при нагрузке, составляющей примерно 10 % от максимальной, происходит образование трещин, ориентированных почти параллельно обрабатываемой поверхности, которые при росте вверх принимают блюдцеобразную форму. Пересечение радиальных трещин с боковыми приводит к образованию сколов.

Формула [4] для радиуса образовавшейся трещины имеет вид

$$l = \sqrt[3]{\left(\frac{U_k^2}{(dK_{ID})^2}\right)}, \quad (3)$$

где  $K_{ID}$  – коэффициент интенсивности напряжений [4];  $U_k$  – кинетическая энергия удара [4].

Механизм хрупкого разрушения указанных материалов позволяет прийти к выводу о возможности многократного повышения производительности шлифования при выполнении условия, когда абразивные зерна будут однократно создавать на поверхности кольцевые трещины радиусом  $l$  на расстоянии друг от друга, равном  $1,22 \dots 1,75d$ , в зависимости от марки обрабатываемого материала и припуска на обработку.

Указанное может быть достигнуто путем подбора параметров режущей части инструмента, режимов обработки, а также параметров дополнительных относительных колебательных движений.

С другой стороны, стекло склонно к хрупкому разрушению, вибрации, сопутствующих шлифованию, что приводит к образованию дефектного поверхностного слоя, имеющего трещины и сколы [2]. Эти особенности процесса шлифования стекла затрудняют достижение требуемого качества изделий при высокой производительности и требуют применения дорогостоящего специального инструмента и дополнительных средств технологического оснащения, в том числе и адаптивных.

Для снижения интенсивности колебаний шлифовальный круг (ШК) оснащают виброгасителями различных типов [3]. При этом тип виброгасителя определяет колебательное поведение механической системы ШК, качество и производительность процесса шлифования, а также ресурс и другие эксплуатационные свойства ШК.

Теория и практика показывают, что при использовании однокаскадного виброгасителя (имеющего один упругий элемент) в механической системе ШК на определенных скоростях резания, в зависимости от жесткости упругого элемента, возникает резонансное состояние. Это приводит к аварийному состоянию технологической системы (снижению качества обработанной поверхности, разрушению обрабатываемой заготовки). Во избежание таких последствий приходится снижать скорость резания на этапе чистовой обработки, что негативно влияет на производительность шлифования.

Применение ШК, оснащенного двухкаскадным виброгасителем, позволяет, благодаря выбору необходимого соотношения жесткостей упругих элементов, осуществлять шлифование на высоких скоростях, избегая резонансного состояния. Высокие скорости резания в безрезонансной зоне обеспечивают достаточно высокое качество обрабатываемой поверхности при относительно высокой производительности.

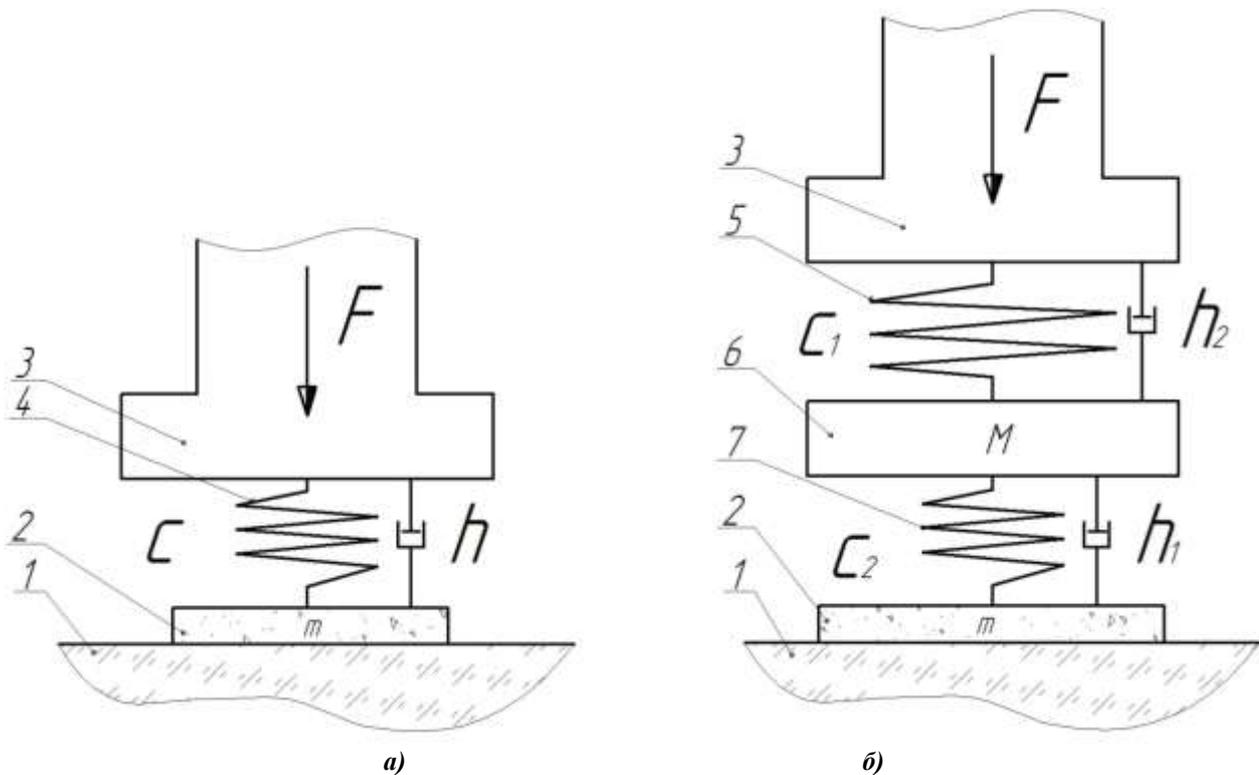
При выполнении технологических задач, целью которых является обеспечение высокого качества обработки, без ограничений по производительности, целесообразным является применение ШК с однокаскадным виброгасителем.

В условиях, когда выполняется совмещенная (по качеству и производительности) технологическая задача, целесообразным является применение ШК с двухкаскадным виброгасителем.

Таким образом, актуальной является задача по созданию технологического процесса, совмещающего в себе возможности обеспечения высокопроизводительного предварительного и финишного шлифования одним инструментом.

Решение задачи по достижению требуемого качества изделий при высокой производительности на различных этапах обработки возможно за счет применения ШК, совмещающего в своей конструкции преимущества указанных двух типов ШК и лишённого их недостатков. Кроме того, уровень вибраций должен быть достаточен для достижения максимальной величины напряжения  $\sigma_{\max}$  и при этом не вызывать появления магистральных трещин, приводящих к разрушению обрабатываемых заготовок [4].

В тоже время вариант использования ШК с виброгасителем, число каскадов у которого более двух, был исследован и отвергнут авторами [3] из-за сложности колебательного поведения и, как следствие, проблематичности точного выбора параметров процесса шлифования.



**Рис. 2. Расчетные схемы механических систем ШК с одно- (а) и двухкаскадным (б) виброгасителем:**

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — абразивный сегмент ШК; 3 — шпиндель станка с закрепленным на нем корпусом ШК; 4, 5, 7 — упругие элементы виброгасителей; 6 — промежуточный элемент двухкаскадного виброгасителя

Для описания колебательных процессов в системе «инструмент-заготовка» при использовании ШК, оснащенных одно- и двухкаскадным виброгасителями, целесообразно применять методы теоретической механики, в частности, элементы теории малых колебаний.

Упрощенные схемы для расчета механических систем рассматриваемых ШК приведены на рис. 2. Считаем, что на ШК действует сила  $F$ , вызывающая колебания с амплитудой  $A$ ; коэффициент демпфирования и жесткость упругого элемента 4 однокаскадного виброгасителя соответственно равны  $h$ ,  $c$ ; жесткости и коэффициенты демпфирования упругих элементов 5 и 7 первого и второго каскадов двухкаскадного виброгасителя — соответственно  $c_1$ ,  $h_1$  и  $c_2$ ,  $h_2$ . Вращающаяся часть 3 станка (в данном случае шпиндель) с закрепленным на ней корпусом ШК имеет массу, большую по сравнению с массой виброгасящей системы, и в расчетах

не учитывается, а промежуточный элемент  $b$  двухкаскадного виброгасителя, установленный между упругими элементами первого и второго каскадов, — массу  $M$ , шлифовальные сегменты 2 имеют общую массу  $m$ .

Для ШК с однокаскадным виброгасителем расчетная схема (рис. 2, *a*) сведена к механической системе с одной степенью свободы. При этом зависимость амплитуды  $A$  колебаний рабочей части ШК от круговой частоты  $\omega$  имеет вид [1]

$$A = \frac{F_c}{(c - m\omega^2)^2 + h^2\omega^2} \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что для заданных технологических условий, характеризующих определенными значениями  $F$  и  $\omega$ , конструктивно влиять на рассматриваемый колебательный процесс можно только изменением значений жесткости и коэффициента демпфирования упругого элемента виброгасителя.

Механическая система инструмента с двухкаскадным виброгасителем (рис. 2, *б*) имеет две степени свободы. При этом зависимость, характеризующая амплитуду колебательного процесса шлифовальных сегментов, имеет вид [7]

$$A = F_c \sqrt{\frac{c_1^2 + h_1^2\omega^2}{(c_1 + c_2 - m\omega^2)^2 + (h_1 + h_2)^2\omega^2}} \quad (5)$$

Из приведенной зависимости амплитуды колебаний рабочей части ШК от частоты следует, что на параметры колебательного процесса в данном случае можно влиять изменением параметров виброгасителя: жесткостей, коэффициентов демпфирования  $c_1, h_1, c_2, h_2$  и массы  $m$ .

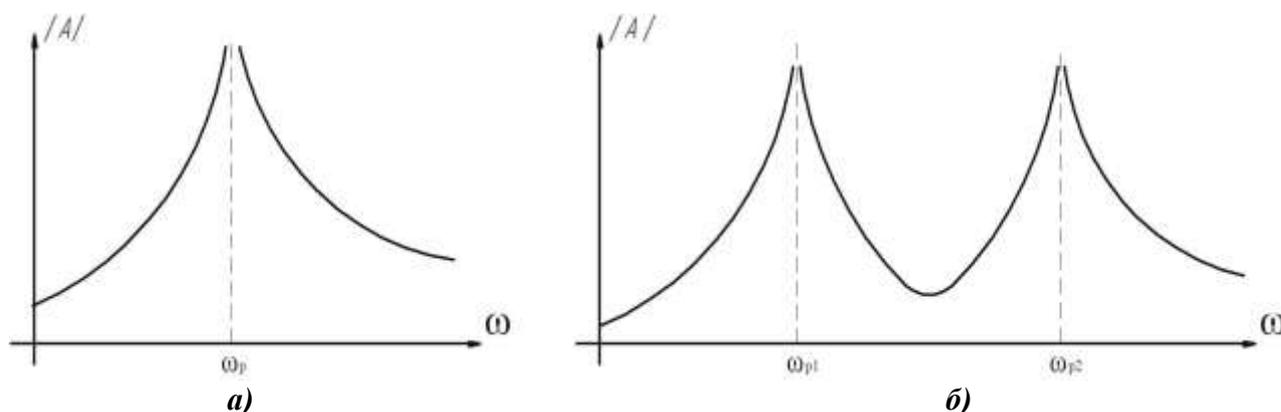


Рис. 3. Зависимость величины  $A$  от круговой частоты  $\omega_c$  ШК с одно- (*a*) и двухкаскадным (*б*) виброгасителем

Далее представлены графики зависимости амплитуды  $A$  рабочей части ШК от круговой частоты  $\omega$  для случая использования одно- (рис. 3, *a*) и двухкаскадного (рис. 3, *б*) виброгасителя.

Практический интерес представляет разность  $\Delta\omega_p$  резонансных частот, которая определяет ширину интервала безрезонансного состояния механической системы ШК [1]:

$$\Delta\omega_p^2 = c_2 \sqrt{\frac{1}{m^2}(1+a)^2 + \frac{1}{M^2} + 2\frac{(1-a)}{Mm}} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что увеличение жесткости  $c_2$  и соотношения жесткостей  $a = c_1/c_2$  приведет к росту значений обеих резонансных частот, а увеличение массы  $m$  — к их уменьшению.

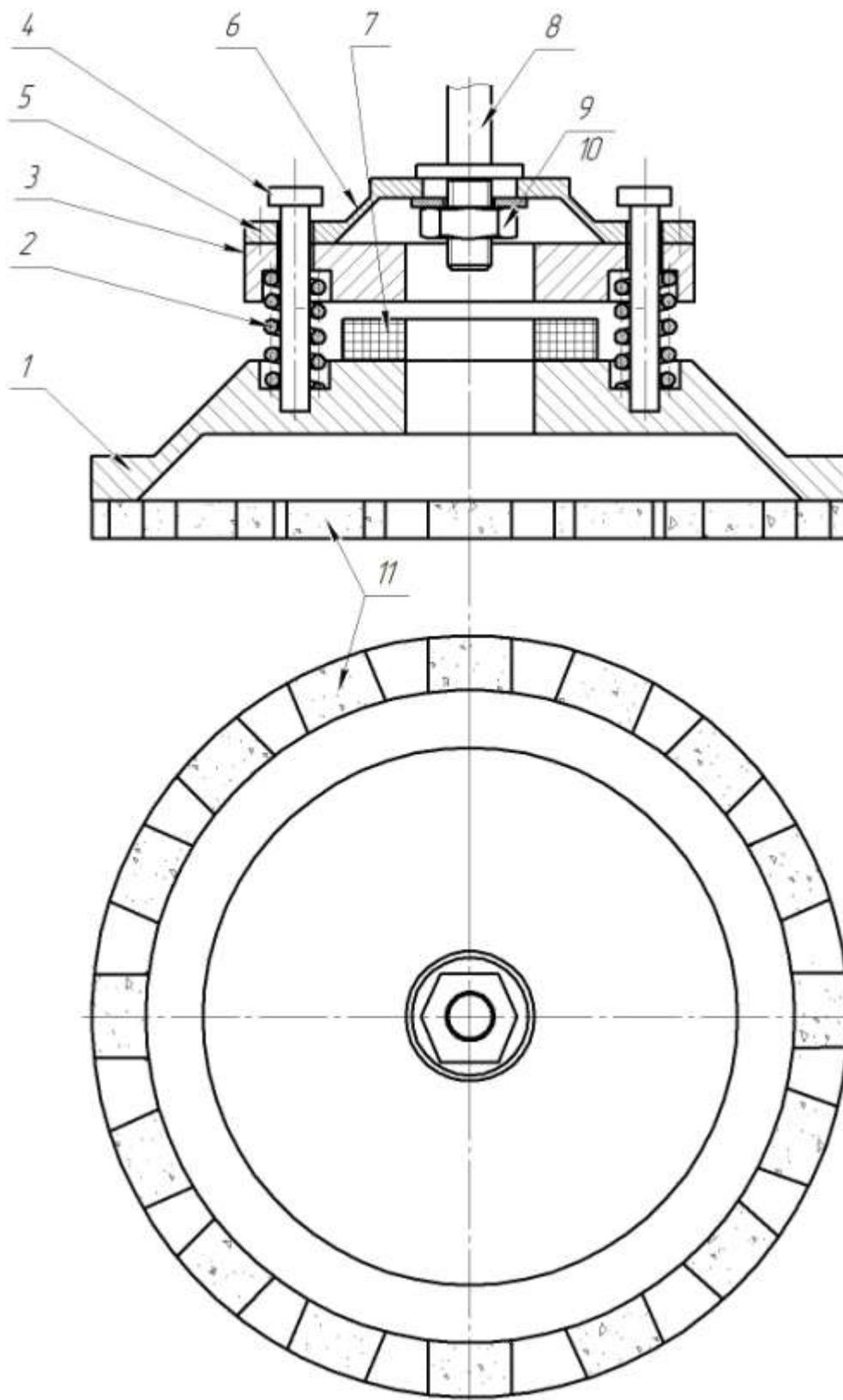


Рис. 4. Инструмент, оснащенный упругим элементом с изменяемой жесткостью

Жесткость  $c_1$  и коэффициенты демпфирования  $h_1$  и  $h_2$  определяются условием обеспечения требуемого амортизационного эффекта при взаимодействии ШК с заготовкой. Несмотря на то, что жесткость  $c_1$  не может изменяться в широком диапазоне, а коэффициенты сопротивления  $h_1$  и  $h_2$  для металлических упругих элементов малы, путем подбора значений жесткости  $c_2$ , а также соотношения жесткостей двух упругих элементов  $a$  и массы рабочей части  $m$  возможно обеспечить работу ШК вне зоны резонанса во всем диапазоне значений  $\omega$  и  $c_1$ . Это позволяет осуществлять поиск оптимальных конструктивных параметров двухкаскадного виброгасителя, изменяя значения  $c_1$  и  $m$ , для выбранного скоростного режима. Представленные зависимости описывают влияние конструктивных параметров виброгасителя на колебательный процесс в системе «инструмент-заготовка» и могут быть использованы при проектировании ШК с учетом конкретных технологических условий.

Таким образом, можно сделать вывод, что две рассматриваемые схемы механической системы ШК характеризуются своими достоинствами и недостатками с технологической точки зрения. Применение гибридной и управляемой схем виброгашения позволило бы на разных технологических этапах обработки использовать сочетание двух рассмотренных схем. Конструкция инструмента, позволяющая изменять в процессе обработки жесткость  $c_2$ , обеспечивает возможность управления его колебательным поведением как при необходимости повышения производительности с обеспечением определенного значения амплитуды  $A$ , так и при обеспечении высокого качества обработки на финишном этапе, когда значение амплитуды  $A$  минимизируется.

Вариант конструктивного исполнения такого инструмента представлен на рис. 4. Он состоит из металлического корпуса 1 с присоединенным через винтовые цилиндрические пружины 2, массивным ферромагнитным кольцом 3, которое свободно перемещается по направляющим 4 в вертикальном направлении. К ферромагнитному кольцу с помощью винтов 5 присоединена тарельчатая пружина 6. Через монтажное отверстие в тарельчатой пружине 6 ШК закрепляется на шпинделе станка 8 с помощью гайки 9 и кольца 10. На корпусе 1 с одной стороны жестко закреплены шлифовальные сегменты 11, образующие прерывистую рабочую часть, с другой – силовой электромагнитный элемент 7.

В процессе работы ферромагнитное кольцо и электромагнитный силовой элемент могут свободно перемещаться в вертикальном направлении, обеспечивая возможность колебаний рабочей части инструмента в соответствии с выбранным значением амплитуды  $A$ .

ШК предназначен для обработки плоских поверхностей. Удаление припуска с обрабатываемой поверхности осуществляется в результате контакта шлифовальных сегментов с обрабатываемой поверхностью при вращении и при продольной или круговой подаче заготовки в направлении, перпендикулярном оси вращения ШК, при приложении к нему постоянной или плавно изменяющейся статической нагрузки в направлении оси вращения. Он может использоваться при проведении совмещенного предварительного и финишного шлифования в технологических условиях, при которых обеспечивается постоянный контакт всей рабочей поверхности круга с поверхностью обрабатываемой заготовки или группы заготовок.

#### Библиографический список

1. Вибрации в технике: справочник: в 4-х т. / под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
2. **Глебов, В.В.** Шлифовальный инструмент с виброгасителем для обработки и ремонта плоских поверхностей на деталях из хрупких неметаллических материалов / В.В. Глебов, В.М. Сорокин, Д.А. Игнатьев // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й международной практической конференции выставки. Ч. 1. – СПб.: СГПУ. 2006. – С. 356–362.

3. **Глебов, В.В.** Анализ и совершенствование шлифовальных кругов с виброгасителем для обработки хрупких материалов / В.В. Глебов [и др.] // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2005. Вып. 1. – С. 63–66.
4. **Марков, А.И.** Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков, А.М. Дальский // Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.02.2010*

**V.V. Glebov, D.A. Ignatyev, M.E. Yegorov**

### **THE MANAGEMENT OF VIBRATORY CONDUCT OF THE FOR GRINDING OF FRAGILE NON-METALLIC MATERIALS**

High fragility of non-metallic materials determines complexity of a choice of optimum conditions of machining. Non-metallic constructional materials are widely used at creation of modern machines. To processing the specified materials are applied in the basic methods of grindings which are carried out by intensive cracking. Criteria of origin and distribution of a crack in a body of a detail from fragile non-metallic materials are considered. It is suggested to use special instrument supplied with vibration damper with guided elastic properties.

*Key words:* glass, grinding, crack, non-metallic constructional materials, vibration damper, hardness, damping.

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин, И.Л. Лаптев, А.В. Хрипунов

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА НА НАДЕЖНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты производственных экспериментов по точению закаленной стали 20ХГНМ пластинами с кубическим нитридом бора трех различных способов изготовления. Показано, что способ крепления уголка из кубического нитрида бора влияет на картину изнашивания.

*Ключевые слова:* закаленная сталь, кубический нитрид бора, способ крепления, надежность работы пластины.

Одним из важнейших способов получения деталей является обработка металлов резанием. Разработки ведущих станкостроительных и инструментальных фирм, представляемые в последнее время на крупнейших мировых выставках: ЕМО (г. Ганновер), IMTS (г. Чикаго), «Металлообработка» (г. Москва) – свидетельствуют о наличии трех основных тенденций, это:

- 1) высокоскоростная обработка (*HSC – High Speed Cutting*);
- 2) «сухое резание» – обработка без СОТС (*Dry machining*);
- 3) «твердая обработка» – обработка закаленных материалов – из группы *H (Hard machining)*.

Эти тенденции обусловлены стремлением подняться на новую ступень развития металлообработки в целом и решением ряда задач экономии ресурсов в различных отраслях промышленности. Основными критериями при разработке технологических процессов для современного машиностроения являются:

- надежность;
- производительность;
- экономическая эффективность;
- гибкость.

Следует отметить, что надежность в значительной степени определяет производительность и экономическую эффективность режущего инструмента, в частности, недостаточная надежность инструмента снижает его экономическую эффективность.

Современные производители инструмента все чаще в последнее время представляют на рынке разнообразный инструмент из кубического нитрида бора (*CBN-Cubic Boron Nitride*) для обработки материалов из группы *H*. Варианты исполнения и технологии изготовления пластин, покрытия, составы субстрата *CBN* различны и зачастую рекламируются фирмами как наилучшее решение в данном сегменте механообработки. Также неоднозначны рекомендуемые режимы резания. Для расчета затрат на инструмент данных каталога явно недостаточно, так как величина стойкости, как правило, не оговаривается. Зависимость периода стойкости от режимов резания также можно определить только опытным путем.

Таким образом, как показывает практика, к вопросу выбора той или иной конструкции пластины следует подходить крайне ответственно, так как просчеты на данном этапе могут повлечь за собой существенные финансовые затраты в дальнейшем.

Задачей работы является исследование надежности процесса работы *CBN*-пластинами различных способов изготовления. Для этого были проведены:

- производственные испытания;
- математическая обработка результатов эксперимента;

- анализ полученных результатов.

Варианты и технологии изготовления пластин, режимы их эксплуатации у разных фирм-производителей могут существенно различаться [4, 5, 7–10]. Определение наиболее рационального способа изготовления пластин для твердого точения позволит выбрать инструмент с наиболее предсказуемым периодом стойкости и надежностью работы.

### Проведение производственных испытаний

Эксперимент проводился на производственной площадке ОАО «ГАЗ» (г. Нижний Новгород) в ПААГ ЗАТМ («Производство автомобильных агрегатов Завода автомобильных трансмиссий и моторов»).

На станке фирмы «Boehringer» мод. NG-200 велась обработка ведомой шестерни из стали 20ХГНМ ГОСТ 4543-71, после химико-термической обработки, твердость HRC 58-60 единиц. Эскиз детали приведен на рис. 1.

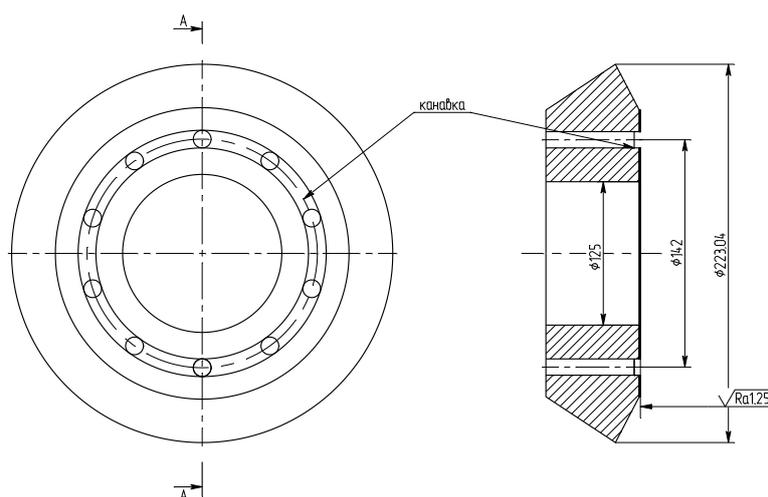
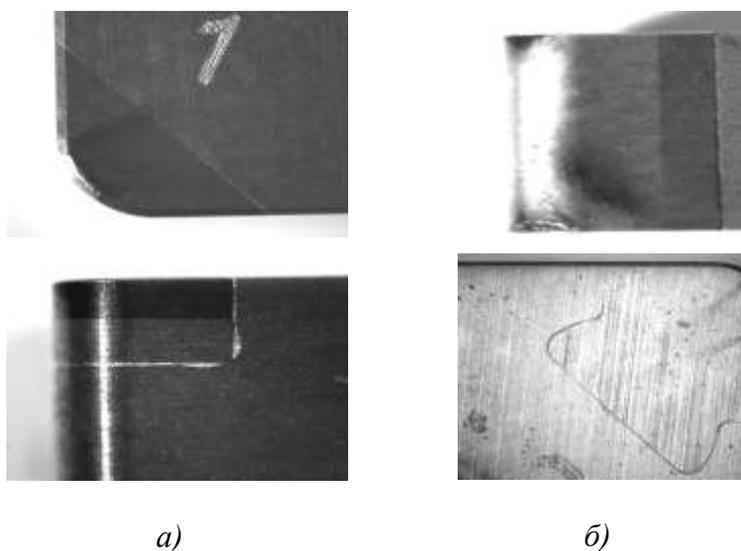


Рис. 1. Эскиз детали



а)

б)

Рис. 2. Внешние различия между креплением СВН типа «шлифование + пайка» (а) и «ласточкин хвост» (б)

В ходе исследования влияния способа изготовления пластины на надежность процесса резания испытывалось по четыре пластины трех видов:

- 1) SNGA 120412 T01020 (ТИП 1) – двухсторонняя, восемь режущих кромок, способ изготовления CBN уголка – «ласточкин хвост», с покрытием TiN;
- 2) SNMA 120412 T01020 (ТИП 2) – односторонняя, одна режущая кромка, шлифование и пайка в ТВЧ, без покрытия;
- 3) SNGA 120412 S-DL (ТИП 3) – односторонняя, четыре режущие кромки, эрозия проволокой и пайка в вакууме, без покрытия,

Внешние различия способа крепления типа «ласточкин хвост» и «шлифование + пайка» приведены на рис. 2.

Режимы резания для каждой однородной партии были неизменными: скорость  $V_c=130$  м/мин, подача  $f = 0,22$  мм/об и глубина резания  $a_p = 0,2$  мм. Критерий замены режущей вершины – снижение качества обработки детали – превышение  $Ra$  1,25 мкм. Измерение шероховатости обработанной поверхности деталей производилось прибором "СЕЙТРОНИК ПШ8-3 С.С.". Блок-схема эксперимента приведена на рис. 3.

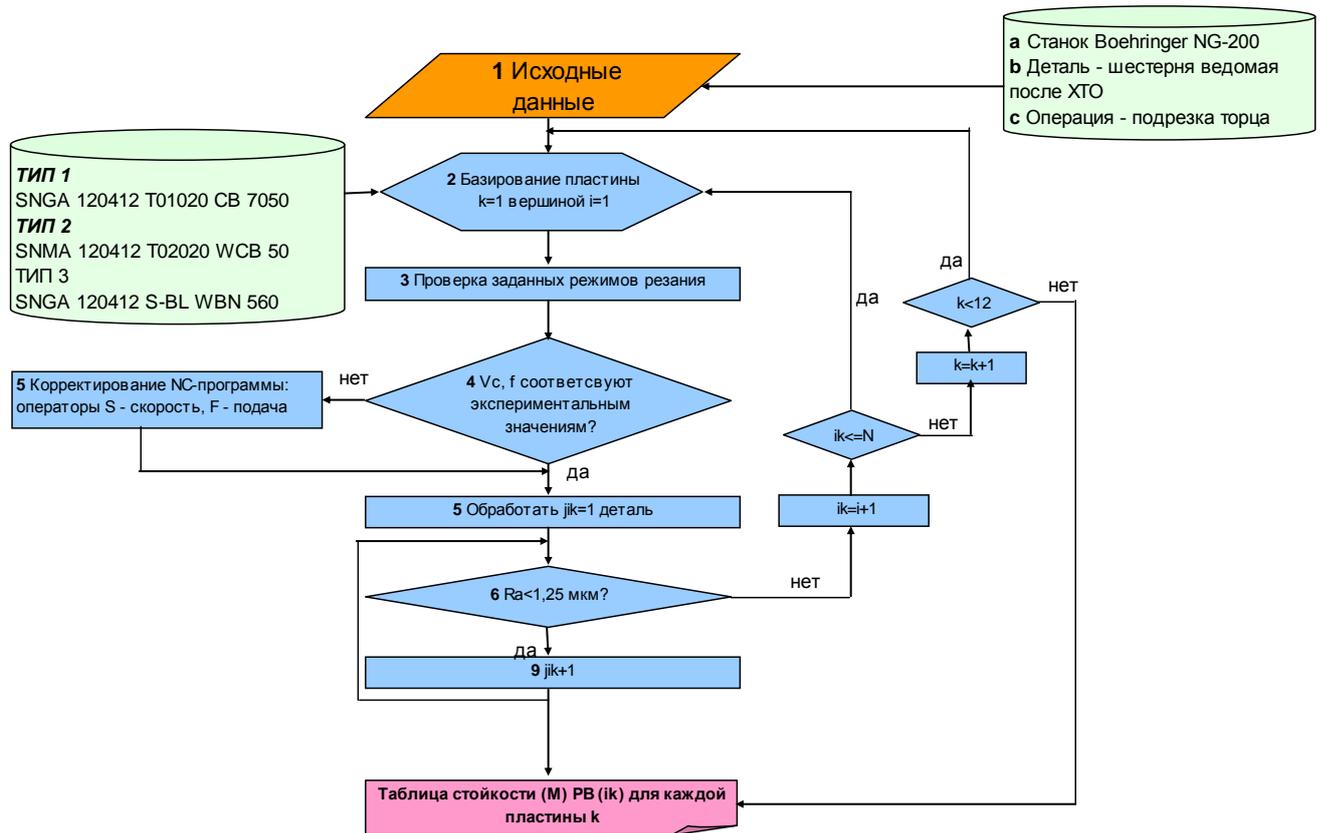


Рис. 3. Блок-схема эксперимента

Данный эксперимент позволил получить данные по стойкости пластин различной технологии изготовления.

### Математическая обработка результатов эксперимента

Для оценки надежности работы инструмента различного способа изготовления использовано распределение Вейбулла [1]. С помощью математического аппарата MathCAD были получены данные, необходимые для построения графиков плотности, функции распределения и функции риска (табл. 1).

В результате получены графики надежности, плотности распределения и функции риска для пластин разного способа изготовления (рис. 4–6).

Таблица 1

Величины параметров, описывающих надежность процесса

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Выборка значений стойкости пластин		
			ТИП 1	ТИП 2	ТИП 3
1	Выборочное среднее арифметическое значение	$X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}$	$X_{cp} = 39.418$	$Y_{cp} = 46.906$	$Z_{cp} = 84.76$
2	Выборочное среднее квадратичное значение	$S, S_1, S_2$	$S = 12.027$	$S_1 = 9.638$	$S_2 = 16.684$
3	Значение отношения $V_b$	$V_b, V_{b1}, V_{b2}$	$V_b = 0.305$	$V_{b1} = 0.205$	$V_{b2} = 0.197$
4	Коэффициент параметра формы $K_b$	$K_b, K_{b1}, K_{b2}$	$K_b := 0.5$	$K_{b1} := 0.89$	$K_{b2} := 0.89$
5	Параметр формы $b$	$b, b_1, b_2$	$b := 3.6$	$b_1 := 2.9$	$b_2 := 2.9$
6	Уточненный параметр формы $b_{корр}$	$b_{d2}, b_{k3}, b_{l4}$	$bd2 = 4.039$	$bk3 = 5.495$	$bl4 = 7.693$
6	Нижняя доверительная граница $b$	$b_b, b_{h1}, b_{h2}$	$bdh = 3.062$	$bdh1 = 3.58$	$bdh2 = 2.768$
7	Верхняя доверительная граница $b$	$b_v, b_{v1}, b_{v2}$	$bdv = 4.902$	$bdv1 = 7.091$	$bdv2 = 11.264$
8	Параметр масштаба $a$	$a, a_1, a_2$	$a = 43.797$	$a_1 = 52.645$	$a_2 = 95.023$
	Уточненный параметр масштаба $a_{корр}$	$ad1, ad2, ad3$	$ad1 = 43.608$	$ad2 = 47.445$	$ad3 = 49.216$
9	Нижняя доверительная граница $a_h$	$ah, ah1, ah2$	$ah = 40.256$	$ah1 = 43.477$	$ah2 = 42.62$
10	Верхняя доверительная граница $a_v$	$av, av1, av2$	$av = 47.273$	$av1 = 51.861$	$av2 = 57.877$

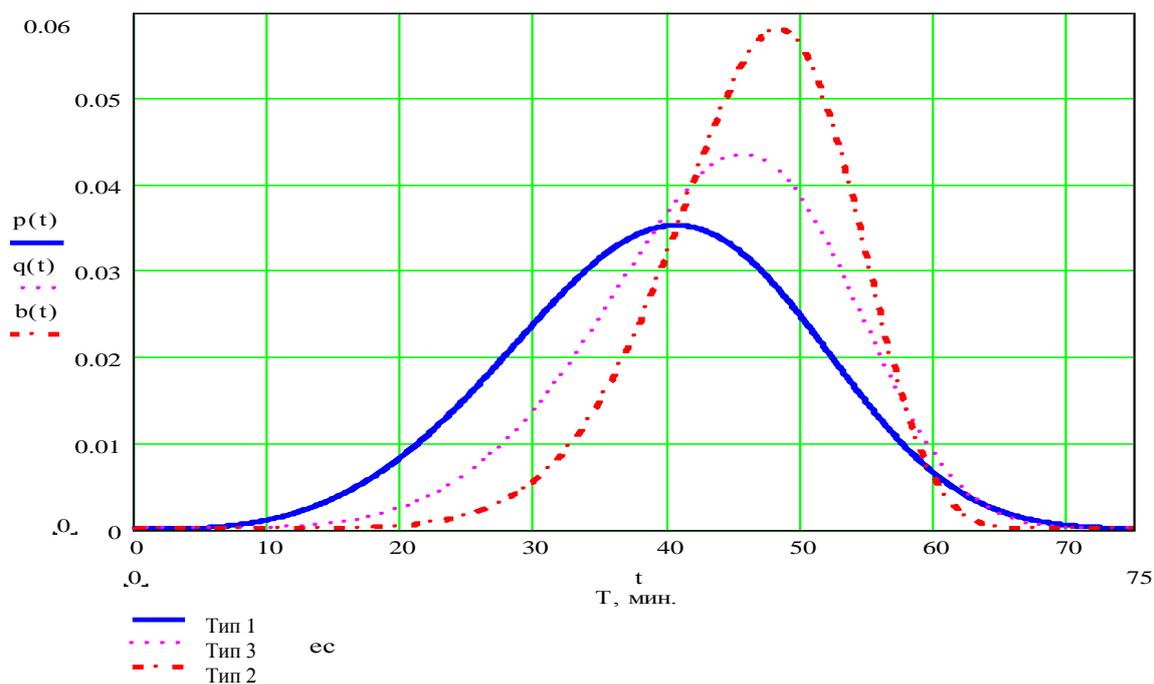


Рис. 4. График плотности распределения стойкости пластин

Для закона Вейбулла-Гнеденко плотность распределения, или дифференциальная функция распределения стойкости, для выборок  $N$ ,  $N_1$  и  $N_2$  описывается следующими уравнениями:

$$p(t) = \frac{bd2}{ad1} \cdot \left(\frac{t}{ad1}\right)^{bd2-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{ad1}\right)^{bd2}},$$

$$b(t) = \frac{bl4}{ad3} \cdot \left(\frac{t}{ad3}\right)^{bl4-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{ad3}\right)^{bl4}}$$

Из рис. 4 видно, что среднее значение периода стойкости из всех пластин выше у пластин с твердосплавной подложкой – *ТИП 2*, также ниже вероятность разброса значений стойкости. Плотнее относительно среднего значения лежат результаты измерений стойкости пластин *ТИПА 2*, затем *ТИП 3* и в конце *ТИП 1*. График вероятности безотказной работы пластин различного способа изготовления представлен на рис. 5.

Вероятность безотказной работы, или интегральная функция распределения стойкости, для выборок  $N$ ,  $N_1$  и  $N_2$  описывается следующими уравнениями:

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{ad1}\right)^{bd2}},$$

$$Q(t) = e^{-\left(\frac{t}{ad2}\right)^{bk3}},$$

$$B(t) = e^{-\left(\frac{t}{ad3}\right)^{bl4}}$$

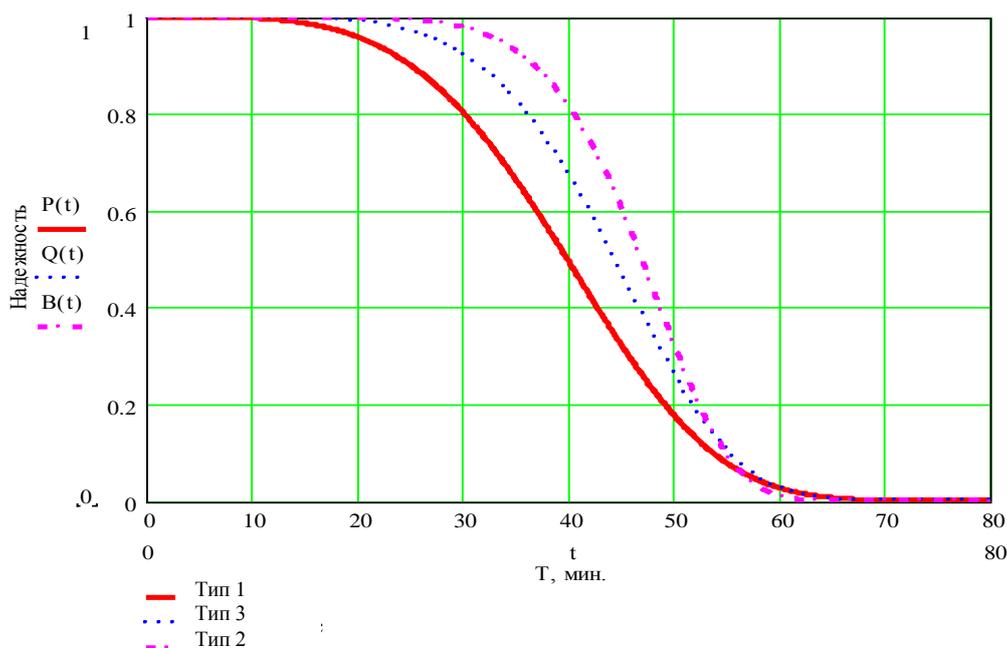


Рис. 5. График вероятности безотказной работы пластин

По приведенному графику время безотказной работы пластин со 100%-ной надежностью соответственно равно: *ТИП 1* – 12 мин, *ТИП 3* – 18 мин, *ТИП 2* – 25 мин. Менее пологая зависимость интегральной функции распределения для пластин *ТИП 3*, по сравнению с *ТИП 1* и *ТИП 2*, свидетельствует, что величина разброса значений меньше. На

рис. 6 показана функция риска, которая описывает вероятность отказа в течение малого промежутка времени при условии, что до этого момента отказа не произошло.

На основе распределения Вейбулла функция риска имеет следующий вид:

$$h(t) = \frac{P(t)}{p(t)} = \frac{c \cdot (X - a)^{c-1}}{b^c}.$$

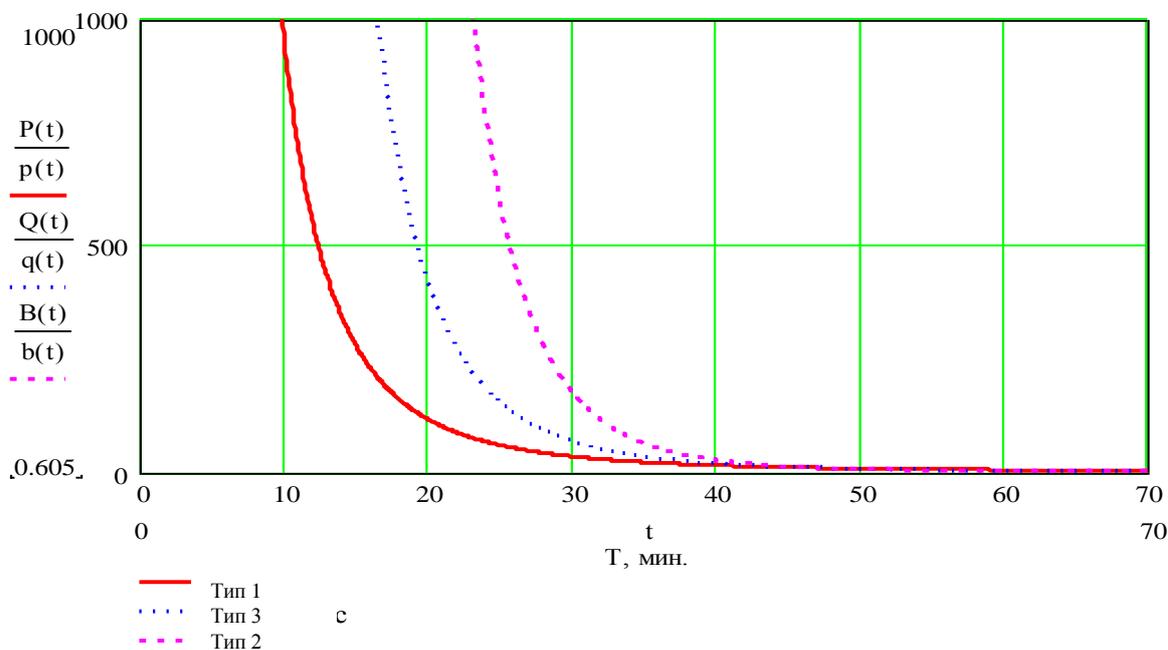


Рис. 6. Функция риска

То есть наименьшие риски прогнозируются при использовании пластин с твердосплавной подложкой *ТИП 2* и *ТИП 3*.

### Выводы

В результате анализа результатов производственных экспериментов были получены следующие выводы:

1) наиболее приемлемым вариантом изготовления пластин, с точки зрения надежности процесса твердого точения и высокой стойкости, является вариант шлифования гнезда под пластину и впайки *CBN* уголка через твердосплавную подложку;

2) столбик кубического нитрида бора при вершине высотой пластины чаще выкрашивается по всей ее высоте, так как материал хрупкий и его разрушению не *препятствует* твердосплавная подложка. Вероятно, подложка является демпфером, ограничивающим разрушение пластины по всей ее толщине;

3) для двух различных вариантов изготовления пластин из аналогичных по процентному содержанию *CBN* сплавов процесс изнашивания отличается.

Следовательно, способ изготовления влияет на картину изнашивания.

### Библиографический список

- ГОСТ 11.007-75. Правила определение оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла. М.: Изд-во стандартов, 1976. – 30 с.
- Грановский, Г.И.** Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
- Лоладзе, Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.

4. **Кабалдин, Ю.Г.** Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов / Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.
5. **Кабалдин, Ю.Г.** Влияние способа изготовления инструмента из наноструктурного кубического нитрида бора (CBN) на надежность его работы / Ю.Г. Кабалдин, И.Л. Лаптев, А.В. Хрипунов // Вестник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Вып. XI. Синергетика. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2008. С. 122–130.
6. **Кабалдин, Ю.Г.** Влияние геометрических параметров CBN-пластин на износ при изменяющихся условиях обработки / Ю.Г. Кабалдин, И.Л. Лаптев, А.В. Хрипунов // Вестник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Вып. XI. Синергетика. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2008. – С. 130–140.
7. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: справочник / В.П. Жедь [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
8. **Ящерицын, П.Н.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.Н. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Высш. шк., 1990. – 512 с.
9. **Carius, A.** PCBN turns the hard stuff // Cutting tool engineering. June 1995. Volume 47. N. 9.
10. **Jochmann, S.** Untersuchungen zur Prozess- und Werkzeugauslegung beim Hochpräzisionshartdrehen / S. Jochmann. - Aachen, Shaker Verlag, 2001.
11. H.K. Tönshoff, C. Arendt, R. Ben Amor: Cutting of hardened steel/ Keynote papers Institute of production Engineering and Machine tools, University of Hannover, Germany. 2004. Pp. 547–580.
12. Chou, Y.K. and Barash, M.M.: Review on hard turning and CBN cutting tools, 1<sup>st</sup> Int'l Machining and Grinding Conference (Dearborn, MI: Society of Mfg. Engineers). 1995. Pp. 949–962.
13. **Хрипунов, А.В.** Исследование влияние изнашивания режущего инструмента из кубического нитрида бора на процесс твердого точения закаленных сталей / Будущее технической науки: материалы Международной молодежной научно-технической конференции. НГТУ. – Нижний Новгород. 2007. – С. 116–117.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**Y.G. Kabaldin, I.L. Laptev, A.V. Khripunov**

## **THE INFLUENCE OF MANUFACTURING METHOD FOR CUBIC BORON NITRIDE TOOL'S ON ITS WORK RELIABILITY**

It is article contain experimental results of hard machining hardness steel 21NiCrMo2 by three different manufacturing method cubic boron nitride inserts. It is shown that method of corner fastening influence of tool wearing.

*Key words:* hardness steel, cubic boron nitride, method of corner fastening, insert work reliability.

УДК 531.535

С.Е. Пилипосян

**ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведено описание экспериментальной установки и методики измерения момента инерции неоднородного твердого тела относительно центральной оси заданного направления с точностью не ниже 0,5% и нахождения точки центра масс с точностью не ниже 1 мм.

Особое внимание уделено оценке погрешностей измерений, проведенных по методу регистрации периодов колебаний. В измерениях применяются обычный секундомер, линейка, угломер и несложная экспериментальная установка. Выявлены условия эксперимента, при которых погрешности минимальны. Приведены графики и таблицы физических величин, наиболее важных для достижения этой цели.

*Ключевые слова:* момент инерции, радиус инерции, главная ось, маятник сравнения, приведенная длина, функция Н.Е. Жуковского, метод параллельных осей, неоднородное твердое тело, жесткий двойной подвес.

**Введение**

Экспериментальное определение центральных моментов инерции, в частности главных моментов инерции, неоднородного твердого тела остаётся актуальной технической задачей [1, 2]. Для снижения центробежных сил инерции, разрушающих, например, опорные подшипники турбины, винта самолета или коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, необходимо как можно точнее определить положение и направление главной оси, являющейся также центральной осью. Сложность геометрических форм и неоднородность таких механизмов затрудняют теоретический расчет моментов инерции. Сегодня успешно применяются различные методы, позволяющие измерить момент инерции и находить точку центра масс как для гигантских гидротурбин, самолетов, экранопланов, вагонов скоростных поездов, автомобилей, так и для миниатюрных элементов часового механизма.

Для каждого изделия применяется определенная методика и создается специальная установка, учитывающая его массу, размеры, форму и обеспечивающая минимальные погрешности в измерениях момента инерции. Каждая из существующих методик имеет свои преимущества и недостатки в определенном диапазоне значений параметров испытуемого тела и позволяет определить искомые величины с той или иной точностью.

Целью этой работы является измерение момента инерции неоднородного твердого тела относительно центральной оси выбранного направления с точностью не ниже 0,5% и нахождение точки центра масс с точностью не ниже 1 мм.

**Метод измерения**

Колебания математического маятника удовлетворяют дифференциальному уравнению второго порядка  $\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin\varphi = 0$ , которое в случае малых колебаний ( $\varphi_{\max} \rightarrow 0$ ), когда  $\sin\varphi \rightarrow \varphi$ , принимает вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0 \quad (1)$$

и имеет решение:  $\varphi = \varphi_{\max} \cos(\omega_0 t + \alpha)$ . Угловая частота  $\omega_0$  и связанный с ней период гармонических колебаний  $T_0$  соответственно равны

$$\omega_0 = \sqrt{g/l} \quad \text{и} \quad T_0 = 2\pi / \omega_0 = 2\pi \sqrt{l/g} . \quad (2)$$

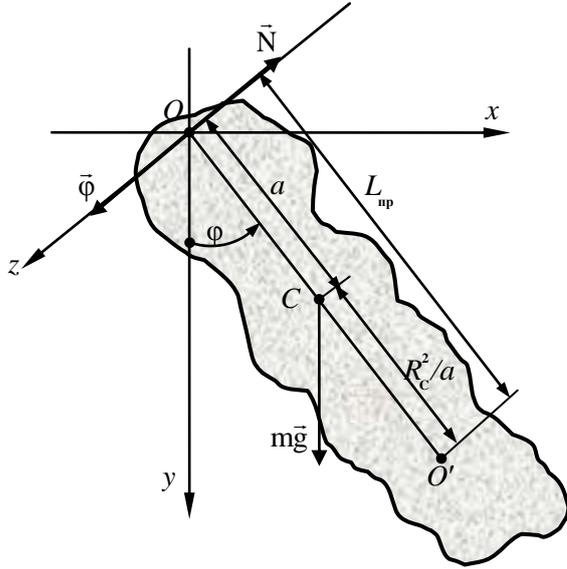


Рис. 1. Физический маятник

Колебания твёрдого тела зического маятника), также ются уравнением (1). В этом случае  $\omega_0 = \sqrt{mga/J} = \sqrt{g/L_{np}}$ , где  $J$  – момент инерции тела относительно заданной оси вращения,  $a$  – расстояние точки центра масс тела от точки его подвеса (от оси вращения);  $m$  – масса твёрдого тела,  $L_{np} = J/(ma)$  – приведенная длина физического маятника (рис. 1). Согласно теореме Гюйгенса – Эйлера,

$$J = J_c + ma^2, \quad (3)$$

где  $J_c$  – момент инерции тела относительно центральной оси, параллельной к оси вращения.

Следовательно,

$$L_{np} = \frac{J}{ma} = a + \frac{J_c}{ma} > a \quad (4)$$

$$T = 2\pi\sqrt{L_{np}/g} = 2\pi\sqrt{(J_c + ma^2)/(mga)}, \quad L_{np} = (g/\pi^2)(T/2)^2. \quad (5)$$

$$J_c = ma(L_{np} - a) = ma[(g/\pi^2)(T/2)^2 - a] = ma(0,99456(T/2)^2 - a) = mR_c^2. \quad (6)$$

Величина  $R_c$  – радиус инерции тела для данной центральной оси.

Очевидно, что, измерив величины  $m, a, T$  или  $m, a, L_{np}$ , можно определить значение  $J_c$  после проведения одного единственного измерения.

Однако для неоднородного твёрдого тела или для однородного тела произвольной формы значение  $a$  неизвестно и для нахождения центрального момента инерции проведение только одного измерения недостаточно.

Если направление центральной оси твёрдого тела с массой  $m$  уже выбрано, то  $R_c$  является константой и величины  $a$  и  $T$  ( $a$  и  $L_{np}$ ) не являются независимыми переменными. Они жестко связаны равенством (6):  $J_c = mR_c^2 = \text{const}$ .

Измеряя  $J$  относительно двух осей вращения, параллельных к выбранной центральной оси и находящихся с ней в одной плоскости, получим

$$\begin{cases} J_c = ma_1(gT_1^2/(4\pi^2) - a_1) \\ J_c = ma_2(gT_2^2/(4\pi^2) - a_2) \\ b = a_1 - a_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{a_1(gT_1^2/(4\pi^2) - a_1)}{a_2(gT_2^2/(4\pi^2) - a_2)} = 1 \\ b = a_1 - a_2 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\pi, g, T_1, T_2, b = a_1 - a_2$  – известные величины.

Решив эту систему уравнений, для неизвестных  $a_1$  и  $a_2$  получим

$$\begin{cases} a_2 = \frac{b(4\pi^2 b - T_1^2 g)}{(T_1^2 - T_2^2)g - 8\pi^2 b} = \frac{b(T_1^2 g - 4\pi^2 b)}{(T_2^2 - T_1^2)g + 8\pi^2 b} \\ a_1 = a_2 + b = \frac{b(T_1^2 g - 4\pi^2 b)}{(T_2^2 - T_1^2)g + 8\pi^2 b} + b = \frac{b(T_2^2 g + 4\pi^2 b)}{(T_2^2 - T_1^2)g + 8\pi^2 b} \end{cases}. \quad (8)$$

Подставив известные значения  $m, T_1, a_1$  или  $m, T_2, a_2$  в (6), получим два значения для  $J_c$ , отличающихся в пределах допущенных погрешностей измерений величин  $b, T_1, T_2$ . Если погрешности этих измерений равны нулю, то и  $(J_c)_1 = (J_c)_2$ . Такой метод определения момента инерции произвольного твердого тела был впервые предложен французским учёным Мари Риш де Прони в 1792 году.

Если значение массы тела фиксировано и направление центральной оси выбрано, то, согласно (6), величина  $J_c$  является функцией двух жестко связанных между собой (коррелированных) переменных  $a$  и  $T$ , которые измеряются с погрешностью  $\Delta a$  и  $\Delta T$  в независимых измерениях. Следовательно,  $a$  и  $T$  являются случайными величинами с истинно средними значениями  $\bar{a}$  и  $\bar{T}$ , удовлетворяющими равенству (6), то есть

$$\bar{J}_c = m\bar{a} \left( g\bar{T}^2 / (4\pi^2) - \bar{a} \right) = mR_c^2 = \text{const.} \tag{9}$$

Предположим, что они подчиняются нормальному закону распределения случайных величин. Погрешность измерения  $J_c$  является погрешностью косвенных измерений случайной величины  $J_c$ , зависящей от коррелированных нормальных случайных величин  $a$  и  $T$ . В таких случаях возникает необходимость найти закон распределения случайной величины  $J_c$  из формулы (6) и ее среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{J_c}$ , если среднеквадратичные отклонения коррелированных нормальных случайных величин  $a$  и  $T$  равны  $\sigma_a$  и  $\sigma_T$  соответственно. Мы будем считать, что  $J_c$  подчиняется закону нормального распределения.

Равенства (5) с учетом (6) можно записать в виде

$$T = 2\pi\sqrt{L_{np} / g} = 2\pi\sqrt{R_c (\lambda + \lambda^{-1}) / g}, \quad L_{np} = R_c (\lambda + \lambda^{-1}), \tag{10}$$

где безразмерный параметр  $\lambda = a / R_c$  определен в области  $0 \leq \lambda < \infty$ .

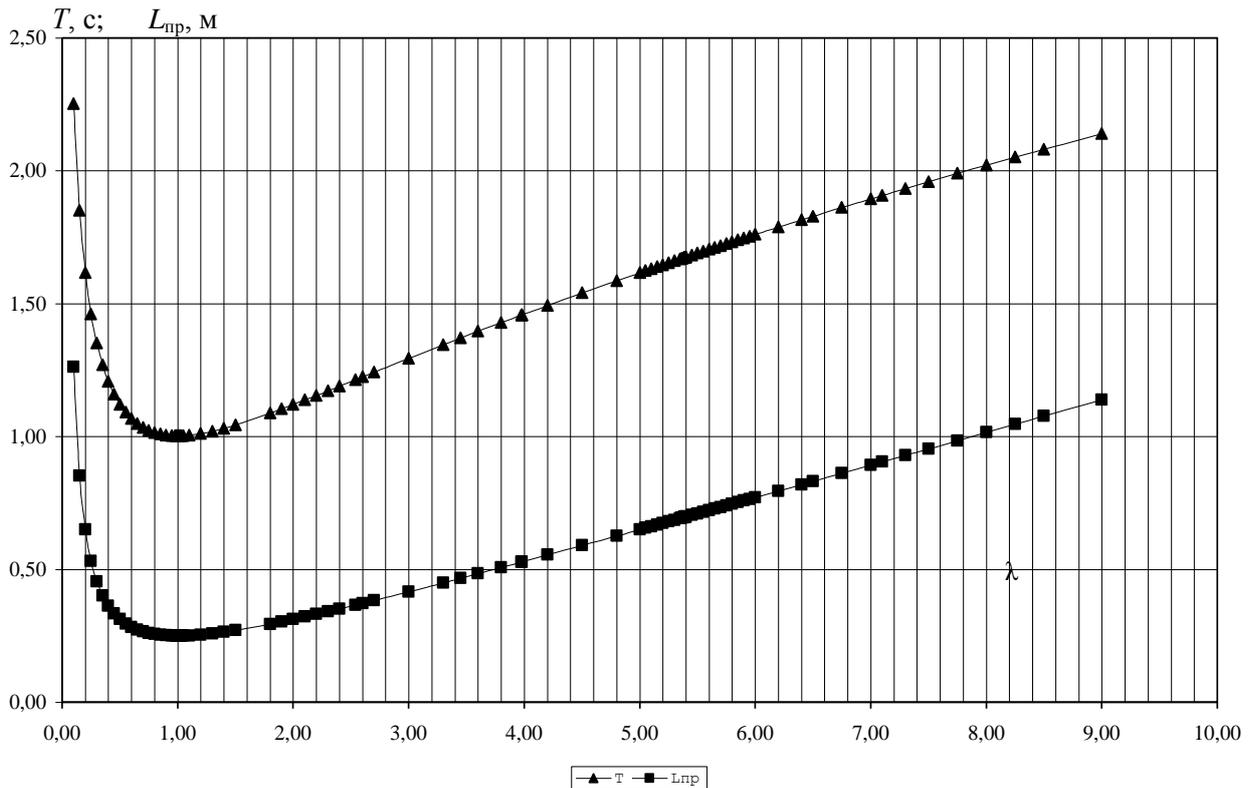


Рис. 2. Период колебаний и приведенная длина физического маятника

Период колебаний и приведенная длина физического маятника обладают минимумом, совпадающим с минимумом функции Н.Е. Жуковского [4]:  $w=0,5(\lambda+1/\lambda)$ ;  $w_{\min}=1,0$  при  $\lambda=1,0$  (рис. 2). Следовательно, согласно (10),

$$T(R_c, \lambda) = 2\pi\sqrt{(2R_c w)/g} = 2\pi\sqrt{L_{\text{пр}}/g}, \quad L_{\text{пр}} = 2R_c w$$

$$T_{\min} = 2\pi\sqrt{2R_c/g}, \quad (L_{\text{пр}})_{\min} = 2R_c. \quad (11)$$

То есть при  $R_c \cong 0,125$  м:  $T_0(R_c, \lambda) = \sqrt{\pi^2/g}\sqrt{w}$  с и  $L_{\text{пр}} = 0,25w$  м.

Измерения  $J_c$  можно провести также, синхронизируя качания математического маятника с колебаниями физического маятника и оценив приведенную длину физического маятника из формулы (6) для двух расстояний  $a_1$  и  $a_2$ .

Напомним, что когда направление центральной оси фиксировано, то значение  $J_c$  фиксировано и не зависит от значения  $a$ . При  $\lambda=1,0$  функции  $T(\lambda)$  и  $L_{\text{пр}}(\lambda)$  обладают минимумом, и небольшие изменения  $\lambda$  (или  $a$ ) не влияют на значения  $T(\lambda)$  и  $L_{\text{пр}}(\lambda)$ , а значит, и на значения  $J_c$ .

Следовательно, погрешности измерения  $\delta(J_c)_T$  и  $\delta(J_c)_{L_{\text{пр}}}$  в этой особой точке не зависят от погрешности  $\Delta a$  измерения расстояния  $a$  от оси вращения.

Определим отношение относительных погрешностей измерения центрального момента инерции  $J_c$  при  $\lambda=1,0$ , обусловленных прямым измерением периода колебаний и косвенным измерением приведенной длины физического маятника. Ввиду того, что измерения величин  $T$ ,  $L_{\text{пр}}$ ,  $b$  проводятся независимо и с небольшими погрешностями  $\Delta T$ ,  $\Delta L_{\text{пр}}$ ,  $\Delta b$  соответственно, согласно формуле (6) (см. [3, с. 17]), получим

$$\delta(J_c)_T = \frac{\Delta(J_c)_T}{J_c} = \frac{1}{J_c} \frac{\partial J_c}{\partial T} \Delta T = \frac{1}{J_c} ma \frac{g}{4\pi^2} 2T\Delta T,$$

$$\delta(J_c)_{L_{\text{пр}}} = \frac{\Delta(J_c)_{L_{\text{пр}}}}{J_c} = \frac{1}{J_c} \frac{\partial J_c}{\partial L_{\text{пр}}} \Delta L_{\text{пр}} = \frac{1}{J_c} ma \Delta L_{\text{пр}},$$

$$\frac{\delta(J_c)_T}{\delta(J_c)_{L_{\text{пр}}}} = \frac{g}{\pi^2} \frac{T\Delta T}{2\Delta L_{\text{пр}}} = 0,99456 \frac{T\Delta T}{2\Delta L_{\text{пр}}} \cong \frac{T}{2} \left( \frac{\Delta T}{\Delta L_{\text{пр}}} \right). \quad (12)$$

Согласно (12), если  $\Delta T=1$  мс и  $\Delta L_{\text{пр}}=1$  мм, то для тел с радиусом инерции  $R_c \leq 12,5$  см, когда  $T_{\min} \leq 1$  с, метод измерения периода малых колебаний позволяет определить центральный момент инерции, как минимум, в два раза точнее. Тем более, что в таких экспериментах улучшение точности измерения расстояния проблематично, а улучшение точности измерения времени одного колебания более реалистично. Метод измерения периодов малых колебаний при указанных погрешностях  $\Delta T=1$  мс и  $\Delta L_{\text{пр}}=1$  мм обладает преимуществом, если радиус инерции испытуемого тела  $R_c < 50$  см.

Утверждение о том, что с помощью маятника сравнения момент инерции твердого тела можно измерить точнее, чем прямым измерением периода колебаний, является принципиально ошибочным. Оно равносильно утверждению, что длину стола можно измерить точнее не прямым сравнением его длины с длиной эталонного метра, а измерив сначала длину стола с помощью некоторой гибкой нити и только потом измерив длину соответствующего отрезка нити с помощью эталонного метра. При сравнении преимуществ этих двух методов в [3] приведен некорректный вывод (см. [3, с. 17, рис. 3]). Если в XVII- XVIII веках примене-

ние метода маятника сравнения было оправдано, то со второй половины XX века стало возможным измерение интервалов времени с точностью  $\Delta t = 10^{-6} \div 10^{-12}$  с и этот метод устарел.

### Экспериментальная установка

Для фиксации ориентации тела относительно оси вращения в этой работе используется жёсткий двойной подвес (рис. 3). На эксперименте точка центра масс  $C$  испытываемого тела оказывается на некотором расстоянии  $d$  от выбранного направления  $AA_1$ . Поэтому закрепляем тело в точках пересечения заданного направления  $AA_1$  с поверхностью тела с помощью винтов, имеющих конусные наконечники, далее чуть-чуть расслабляем крепёжный винт  $A_1$ , вследствие чего тело свободно вращается в гравитационном поле притяжения земли вокруг оси  $AA_1$ . Таким образом, точка  $C$  всегда оказывается внизу от прямой  $AA_1$  на расстоянии  $d$  от неё в вертикальной плоскости  $AA_1BB_1$ .

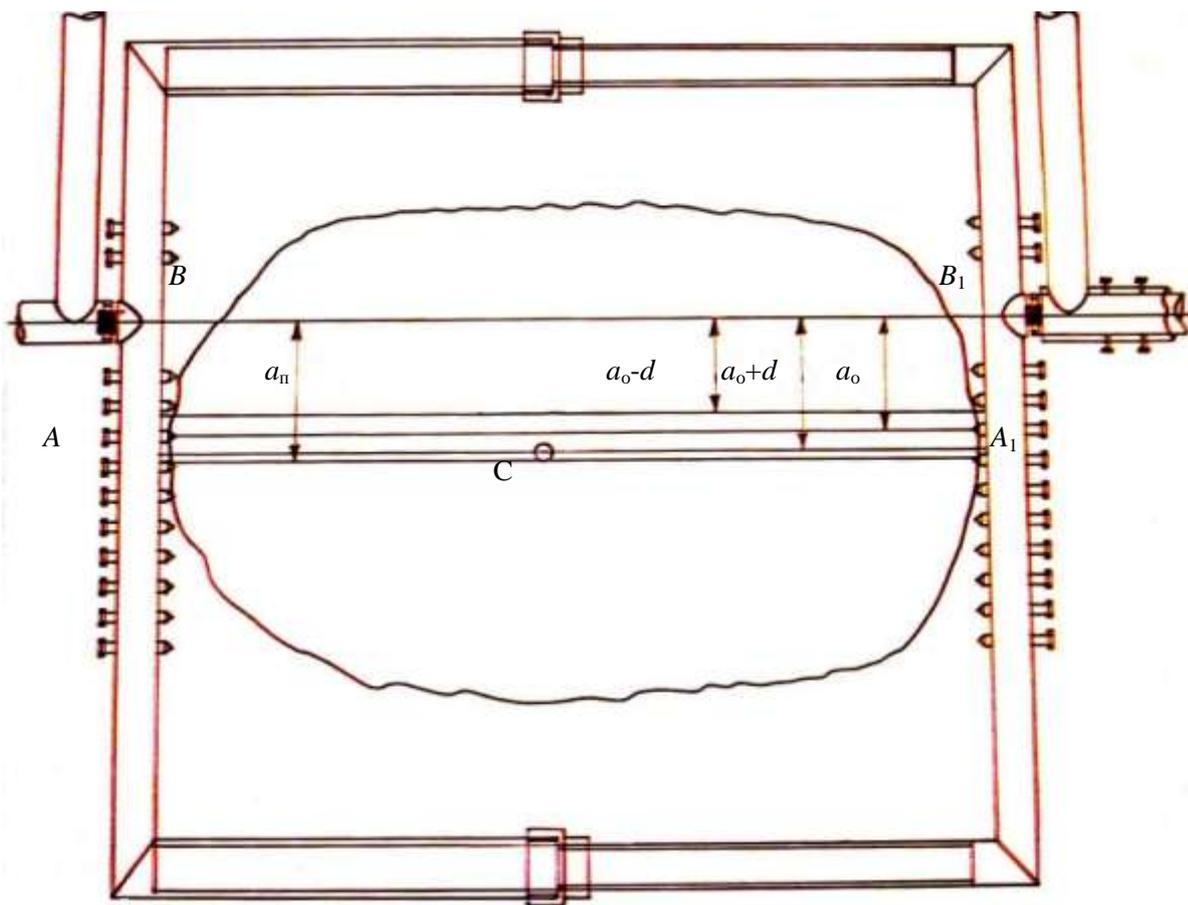


Рис. 3. Схематический вид жёсткого подвеса с опытным образцом

С помощью двух пар дополнительных крепёжных винтов, имеющих конусные заострения и симметрично расположенных по отношению к точкам  $A$  и  $A_1$ , фиксируем это положение (положение 1) образца. Регистрируем расстояние  $a_0$  оси  $AA_1$  от оси вращения  $BB_1$ . Далее выводим из равновесия систем  $U$  (образец + жёсткий подвес) на определенный угол  $\varphi_{\max 1} \approx 20^\circ$  и измеряем суммарное время  $N \gg 1$  колебаний, регистрируя амплитудное значение угла отклонения  $\varphi_{\max N}$  после  $N$  колебаний. Находим период её колебаний  $T_1$ . Поворачивая образец на угол  $180^\circ$  вокруг оси  $AA_1$ , закрепляем его в новом положении (положение 2) и аналогичным образом измеряем период колебаний  $T_2$ .

Далее образец поворачиваем на угол  $90^\circ$  вокруг оси  $AA_1$  по часовой стрелке или против часовой стрелки, закрепляем его в этом положении (положение 3) и снова измеряем период колебаний  $T_3$  физического маятника. Поскольку на эксперименте обычно хорошо выполняется неравенство  $d \ll a_0$ , то в положении 3 обычно хорошо выполняется равенство  $a_3 \approx a_0$ . Поэтому результаты измерения в этом положении могут служить приближенной оценкой для величины  $J_c$ .

Во всех трёх положениях стараемся измерять совокупное время как можно большего числа  $N$  колебаний при соблюдении условия, что угол  $\varphi_{\max N}$  поддается наблюдению невооруженным глазом. В каждом положении измерение повторяем три раза и определяем среднее значение периода  $\langle T_i \rangle$ .

Периоды  $T_1$  и  $T_2$  соответствуют расстояниям  $a_1 = a_0 + d$ ,  $a_2 = a_0 - d$  от выбранной центральной оси тела до оси вращения  $BB_1$ . В данном случае известна сумма расстояний параллельных осей от выбранной центральной оси твердого тела  $a_1 + a_2 = 2a_0$  и необходимо найти  $d = (a_1 - a_2) / 2$ .

Конструкция подвеса позволяет изменять значение величины  $a_0$  дискретно с шагом, равным 15 мм. Равенство  $AB = A_1B_1$  выполняется с точностью 0,5 мм. Силы трения в точках  $B$  и  $B_1$  незначительны (качание на цилиндрических шипах со смазкой). Согласно уравнению (5), для периодов колебаний получим

$$\begin{aligned} T_1 &= 2\pi\sqrt{(J_c + ma_1^2) / (mga_1)} = 2\pi\sqrt{J_1 / (mga_1)}, \\ J_1 &= mga_1 T_1^2 / (4\pi^2) = (mg(a_0 + d)T_1^2) / (4\pi^2) = J_c + ma_1^2 = J_c + m(a_0 + d)^2, \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{(J_c + ma_2^2) / (mga_2)} = 2\pi\sqrt{J_2 / (mga_2)}, \\ J_2 &= mga_2 T_2^2 / (4\pi^2) = (mg(a_0 - d)T_2^2) / (4\pi^2) = J_c + ma_2^2 = J_c + m(a_0 - d)^2, \end{aligned}$$

где учтено, что  $a_1 = a_0 + d > a_2 = a_0 - d$ . Неизвестными являются величины  $d$ ,  $J_c$ , а величины  $a_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  измеряются на эксперименте. Следовательно,

$$\begin{aligned} J_1 - J_2 &= mg(a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2) / (4\pi^2) = m(a_1^2 - a_2^2) = m[(a_0 + d)^2 - (a_0 - d)^2] = 4ma_0 d, \\ a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2 &= (a_0 + d)T_1^2 - (a_0 - d)T_2^2 = a_0(T_1^2 - T_2^2) + d(T_1^2 + T_2^2) = 16\pi^2 a_0 d / g, \\ d &= \frac{a_0(T_1^2 - T_2^2)}{16a_0\pi^2 / g - (T_1^2 + T_2^2)} = \frac{a_0(T_2^2 - T_1^2)}{(T_1^2 + T_2^2) - 16a_0\pi^2 / g}. \end{aligned} \quad (13)$$

В зависимости от конкретных значений величин  $R_c$ ,  $a_0$ ,  $d$  во время измерений возможны три варианта: 1)  $\lambda_2 < \lambda_1 < 1$ ; 2)  $\lambda_2 < 1 < \lambda_1$ ; 3)  $1 < \lambda_2 < \lambda_1$ .

С учетом (13) и того, что  $a_1 > a_2 = a_1 - 2d$ , получим

$$\begin{aligned} \text{Если } 0 < d < a_0 < a_0 + d < R_c &\Rightarrow \lambda_2 < \lambda_1 < 1, \text{ то} \\ T_2 > T_1 > T_{\min} &\Rightarrow T_2^2 - T_1^2 < (T_1^2 + T_2^2) - 16a_0\pi^2 / g. \end{aligned} \quad (14)$$

Следовательно, критерием первого варианта будет

$$a_0 < 0,125 \cdot 0,99456 \cdot T_1^2 = 0,12432 \cdot T_1^2 \text{ м.}$$

Если же  $R_c < a_0 - d < a_0 + d \Rightarrow 1 < \lambda_2 < \lambda_1$ , то

$$T_{\min} < T_2 < T_1 \Rightarrow 16a_0\pi^2 / g - (T_1^2 + T_2^2) > 0.$$

Следовательно, критерием третьего варианта будет

$$a_0 > 0,12432(T_1^2 + T_2^2) / 2 \text{ м.}$$

Наконец, если  $a_0 - d < R_c < a_0 + d \Rightarrow \lambda_2 < 1 < \lambda_1$ ,

$$\text{то } 0,12432(T_1^2 + T_2^2) / 2 \text{ м} < a_0 < 0,12432 \cdot T_1^2 \text{ м.} \quad (15)$$

Это двойное неравенство является критерием второго варианта.

Вычисление значения  $d$  по формуле (13) позволяет определить положение центральной оси, параллельной к заданному направлению  $AA_1$ . Далее определяется момент инерции относительно найденной центральной оси при  $\lambda \approx 1,0$  (второй вариант). Аналогично находится центральная ось в перпендикулярном к  $AA_1$  направлении. Таким же путём определяется направление третьей центральной оси инерции, перпендикулярной к первым двум, и положение точки центра масс. Использованный метод и конструкция подвеса позволяют также определить центробежные моменты инерции испытуемого неоднородного тела для найденной тройки центральных ортогональных осей.

Центр масс жесткого подвеса с массой  $m_{\text{п}}$  находится на расстоянии  $a_{\text{п}} = R_{\text{сн}}$  от оси вращения  $BB_1$ , где  $R_{\text{сн}}$  - радиус инерции подвеса относительно его центральной оси, параллельной к  $BB_1$ . Предусмотрена регулировка горизонтального размера рамки подвеса, позволяющая почти удвоить его минимальную ширину. Перемещения двух половинок рамы подвеса и крепёжных винтов происходят строго параллельно к оси вращения  $BB_1$  и не изменяют момента инерции подвеса  $J_{\text{п}}$  по отношению к оси вращения. Это позволяет использовать данный подвес с неизменными характеристиками для испытуемых тел с массой и размерами в некотором интервале значений.

Масса двойного подвеса считается известным с точностью  $\sim 0,1\%$ , а расстояние его центра масс от оси вращения с точностью  $\sim 0,5$  мм (определяется методом взвешивания). В случае  $a_{\text{п}} = R_{\text{сн}}$ , момент инерции подвеса  $J_{\text{п}}$  можно измерить с точностью  $\sim 0,4\%$ .

Установка снабжена:

- угломером с центром на оси вращения для измерения (рис. 4) угла отклонения маятника и определения углов между различными осями вращения;
- отвесом для юстировки угломера по направлению вектора ускорения  $\vec{g}$ ;
- квазиматематическим маятником для определения  $L_{\text{ип}}$ .

Если подсчет числа колебаний производится невооруженным глазом, то минимальное значение периода колебаний для надежности должно быть  $T_{\text{мин}} \geq 0,4$  с. Следовательно,  $0,4 \text{ с} \leq T_{\text{мин}} \leq 2 \text{ с}$  и соответственно, согласно формуле (11), получим

$$19,9 \text{ мм} \leq R_c = 0,5 \left( L_{\text{ип}} \right)_{\text{мин}} = 0,1243 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot T_{\text{мин}}^2 \leq 497,3 \text{ мм.}$$

Таким образом, при указанных погрешностях метод измерений периода колебаний обладает явным преимуществом по сравнению с другими методами, когда минимальный период колебаний испытуемого тела  $T_{\text{мин}} \leq 2$  с.

### Учет массы и момента инерции жесткого подвеса

Формула (13) для  $d$  получена без учета массы и момента инерции жесткого подвеса. Обозначим массу подвеса через  $m_{\text{п}}$ , а массу тела через  $m_{\text{т}}$ . Расстояние  $a_{\text{п}}$ , точки центра масс подвеса от оси вращения  $BB_1$  определяется с точностью ( $\sim 0,5$  мм). Обозначим суммарную массу системы  $m_{\text{с}} = m_{\text{п}} + m_{\text{т}}$ . На эксперименте обычно выполняется неравенство  $d < 0,1a_0$ .

Расстояния точки центра масс системы от оси вращения  $BB_1$  для перечисленных ранее трёх положений (положение 1, положение 2, положение 3) определяются соотношениями

$$a_{\text{с1}} = \left( a_{\text{п}} m_{\text{п}} + (a_0 + d) m_{\text{т}} \right) / m_{\text{с}}, \quad (16)$$

$$a_{s2} = (a_n m_n + (a_0 - d) m_t) / m_s, \quad (17)$$

$$a_{s3} = (a_n m_n + a_0 m_t) / m_s, \quad (18)$$

где должно выполняться условие  $d < a_0 + a_n m_n / m_t$ , чтобы при поворачивании тела вокруг оси  $AA_1$  на  $180^\circ$ , точка центра масс системы не оказалась на противоположной стороне оси вращения (рис. 3). В правой части этих равенств неизвестной величиной является только  $d$ .

Определение  $a_{s3}$  требует некоторого уточнения. Если выбрать такую прямоугольную правовинтовую систему координат  $XYZ$ , чтобы направление  $OX$  совпало с направлением оси вращения  $BB_1$  (слева направо), плоскость  $XOZ$  совпала с плоскостью  $BB_1A_1A$  и при этом ось  $OZ$  направить вертикально вниз по вектору  $\vec{g}$ , то ось  $OY$  будет направлена перпендикулярно к плоскости чертежа в сторону читателя (рис. 3). В такой ситуации величины  $a_{s1}$ ,  $a_{s2}$ ,  $a_{s3}$  представляют собой  $z$ -координату центра масс – системы в соответствующих положениях. Координата  $x$  – центра масс системы остаётся постоянной во всех трёх положениях и практически не влияет на величину периода  $T$  колебаний системы. В состоянии устойчивого равновесия  $y$ -координата центра масс системы – во всех трёх положениях равняется нулю. Однако, при переходе в положение 3 вращением тела на угол  $90^\circ$  вокруг оси  $AA_1$   $y$ -координата точки центра масс тела – изменяется с нуля до значения  $d$ . Поэтому после равновесия с подвесом его величина станет равной  $d \cdot m_t / m_s$ , если  $z$ -координата центра масс подвеса равна  $a_n \cong a_0$ .

При этом  $y$ -координата центра масс подвеса – будет отрицательной величиной  $-d \cdot m_t / m_s$ . Поэтому  $z$ -координата центра масс тела – в состоянии устойчивого равновесия системы в положении 3 будет не  $a_0$ , а незначительно больше:

$$a_{01} = \sqrt{a_0^2 + (d \cdot m_t / m_s)^2}. \quad (19)$$

Координата  $z$  – центра масс подвеса – будет не  $a_n$ , а незначительно меньше:

$$a_{n1} = \sqrt{a_n^2 - (d \cdot m_t / m_s)^2}. \quad (20)$$

В результате значение  $a_{s3}$  практически не изменится, поскольку на эксперименте хорошо выполняется условие  $(d a_n m_n) / (a_0^2 m_t) \ll 1$ .

Следовательно, измеряя период гармонических колебаний  $T_n$  пустого жёсткого подвеса и зная величины  $m_n$  (взвешиванием) и  $a_n$  (методом взвешивания), можно из равенств (5) и (6) определить значения момента инерции  $J_n$  и центрального момента инерции  $(J_n)_c$  жёсткого подвеса.

Установив исследуемое тело в положение 1, находим период колебаний

$$T_{01} = 2\pi \sqrt{J_{s1} / (m_s a_{s1} g)}. \quad (21)$$

Проверяем выполнение неравенства  $a_0 < 0,125 \cdot 0,99456 \cdot T_1^2 = 0,12432 \cdot T_1^2$  м, являющегося критерием варианта 1:  $\lambda_2 < \lambda_1 < 1$ . Если неравенство не выполняется, то уменьшаем  $a_0$  на один или несколько шагов, снова измеряем  $T_{01}$  и добиваемся выполнения указанного неравенства. Определяем

$$J_{s1} = T_{01}^2 m_s a_{s1} g / (4\pi^2), \text{ поскольку } J_{s1} = J_{t1} + J_n, \text{ то } J_{t1} = J_{s1} - J_n. \quad (22)$$

Установив исследуемое тело в положение 2, находим период колебаний

$$T_{02} = 2\pi \sqrt{J_{s2} / (m_s a_{s2} g)}. \quad (23)$$

Следовательно,

$$J_{s2} = T_{02}^2 m_s a_{s2} g / (4\pi^2), \text{ поскольку } J_{s2} = J_{t2} + J_n, \text{ то } J_{t2} = J_{s2} - J_n. \quad (24)$$

Находим значение разности

$$\begin{aligned} J_{S1} - J_{S2} &= J_{T1} + J_{\Pi} - J_{T2} - J_{\Pi} = J_{T1} - J_{T2} = \\ &= m_T (a_0 + d)^2 + (J_T)_c - m_T (a_0 - d)^2 - (J_T)_c = 4m_T a_0 d. \end{aligned} \quad (25)$$

С другой стороны, из выражений (22) и (24) следует, что

$$\begin{aligned} J_{S1} - J_{S2} &= \frac{m_S g (T_{01}^2 a_{S1} - T_{02}^2 a_{S2})}{4\pi^2} = \frac{g \{ T_{01}^2 [a_{\Pi} m_{\Pi} + (a_0 + d) m_T] - T_{02}^2 [a_{\Pi} m_{\Pi} + (a_0 - d) m_T] \}}{4\pi^2} = \\ &= \frac{g [ a_{\Pi} m_{\Pi} (T_{01}^2 - T_{02}^2) + m_T a_0 (T_{01}^2 - T_{02}^2) + d m_T (T_{01}^2 + T_{02}^2) ]}{4\pi^2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Приравняв правые части (25) и (26), для  $d$  получаем равенство

$$d = \frac{(T_{01}^2 - T_{02}^2)(a_0 + a_{\Pi} m_{\Pi} / m_T)}{16a_0 (\pi^2 / g) - (T_{01}^2 + T_{02}^2)} = (T_{01} - T_{02}) \frac{(T_{01} + T_{02})(a_0 + a_{\Pi} m_{\Pi} / m_T)}{16a_0 (\pi^2 / g) - (T_{01}^2 + T_{02}^2)} = \frac{(T_{01} - T_{02})}{k}. \quad (27)$$

В приближении  $a_{\Pi} m_{\Pi} \ll a_0 m_T$  и с учетом того, что  $\pi^2 / g \cong 1$ , получим

$$d = \frac{(T_{01}^2 - T_{02}^2) a_0}{16a_0 - (T_{01}^2 + T_{02}^2)} = (T_{01} - T_{02}) \frac{(T_{01} + T_{02}) a_0}{16a_0 - (T_{01}^2 + T_{02}^2)} = \frac{(T_{01} - T_{02})}{k} = \frac{(T_{01} - T_{02})}{2(dT / da_T)},$$

где  $k$  - является чувствительностью данного метода и представляется в виде

$$k = \frac{16a_0 - (T_{01}^2 + T_{02}^2)}{(T_{01} + T_{02}) a_0} = \frac{(T_{01} - T_{02})}{d} = 2 \frac{(T_{01} - T_{02})}{\Delta a_T} = 2 \frac{\Delta T}{\Delta a_T} \cong 2 \frac{dT}{da_T}. \quad (28)$$

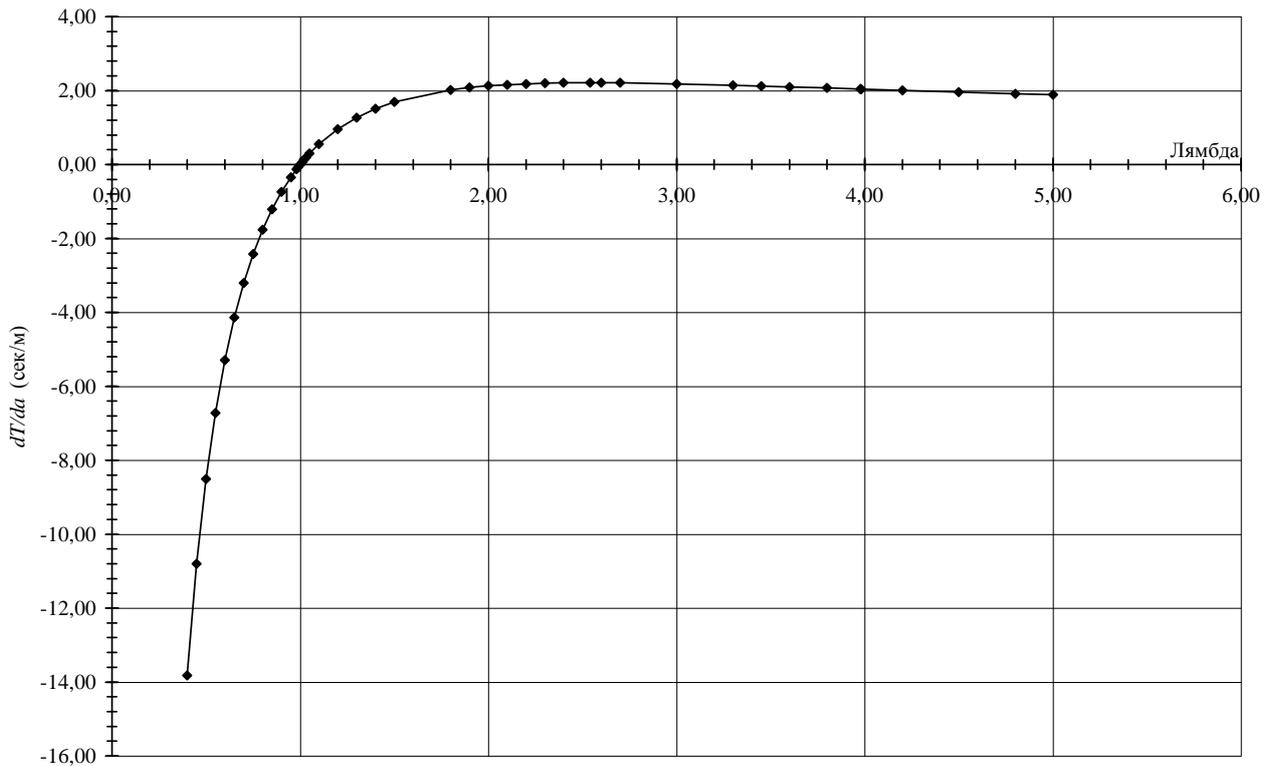


Рис. 4. Зависимость величины  $dT / da$  от безразмерного параметра  $\lambda$

Здесь  $\Delta a_T = 2d$  есть изменение расстояния центра масс испытуемого тела от оси вращения. Чем больше значение  $k$  для подающейся измерению разности периодов  $T_{01} - T_{02}$ , тем

точнее можно определить  $d$ , то есть положение искомой центральной оси, и тем выше будет чувствительность метода. Желательно, чтобы точность определения  $d$  была не ниже точности измерения  $a_0$ .

Таким образом, необходимо исследовать функцию  $k \cong 2(dT / da_r)$  (рис. 4).

Чтобы обеспечить хорошую точность определения момента инерции  $(J_r)_c$ , измерения необходимо провести в условиях, когда значение периода колебаний близко к своему минимальному значению  $T_{01} \cong T_{\min}$ ,  $T_{02} \cong T_{\min}$ , то есть когда  $\lambda_2 < 1 < \lambda_1$  (вариант 2).

Условие,  $a=R_c$ , обеспечивающее наибольшую точность измерения  $J_c$ , то есть  $\Delta J_c / J_c \cong 0,4\%$ , осуществляется при  $dL_{\text{ип}} / da = 0 \Rightarrow dT / da = k / 2 = 0$  или, что то же самое, при  $dL_{\text{ип}} / d\lambda = 0 \Rightarrow dT / d\lambda = R_c \cdot dT / da = R_c / (da / dT) = 0$  (рис. 4).

Это означает, что при точном выполнении условия  $a=R_c$  период колебаний, обладая минимумом, не меняется с изменением  $a$ , то есть  $da / dT = \infty$ . В этой точке небольшие изменения  $a$  не вызывают ощутимые изменения периода колебаний  $T$ , то есть чувствительность метода равняется нулю:  $k=0$ .

Следовательно, требуется некоторый компромисс между точностями определения  $J_c$  и  $d$ , если они измеряются лишь при одном значении  $a_0$ .

Если предположить, что масса и период колебаний физического маятника определяются абсолютно точно, то погрешность измерения момента инерции будет зависеть только от погрешности измерения расстояния  $a$ . На рис. 5 приведены кривая производной  $da / dT$  и график функции  $\Delta J_c / J_c$  для момента инерции твердого тела без учета погрешностей измерения массы и периода колебаний, а также без учета корреляции между величинами  $a$  и  $T$ .

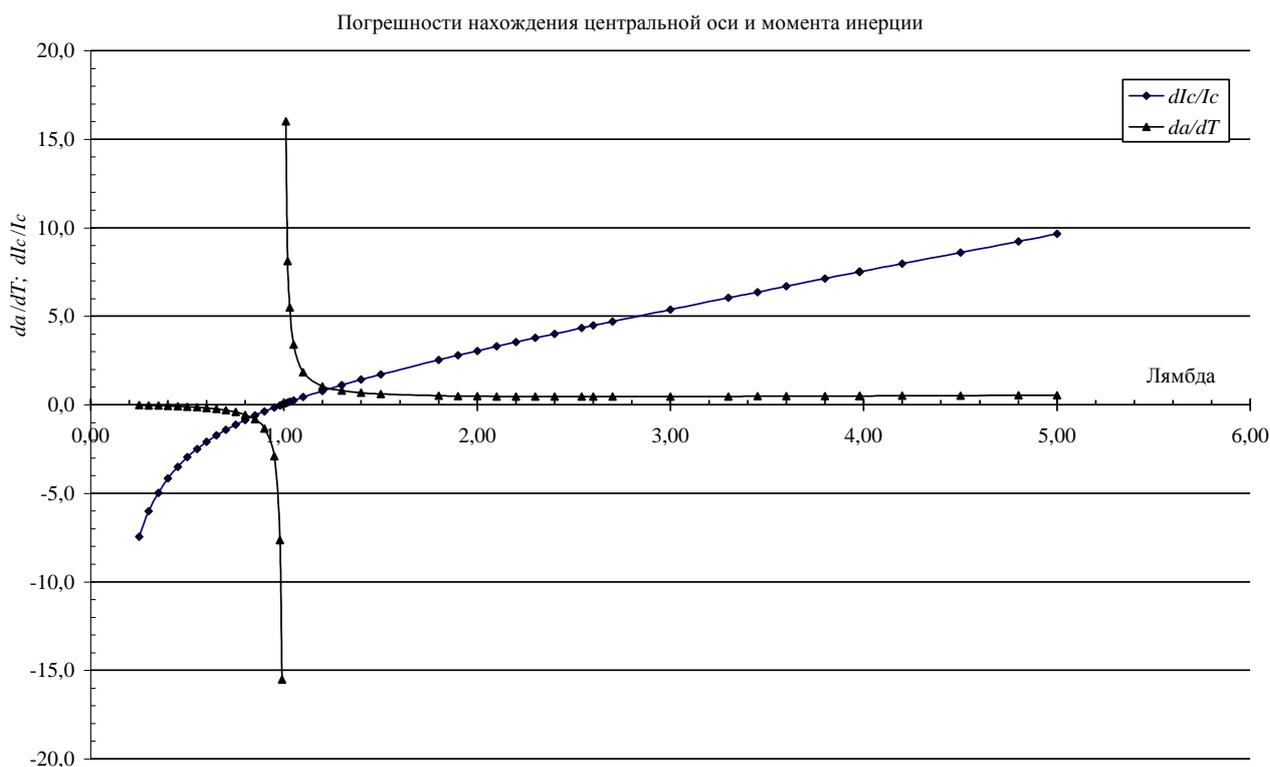


Рис. 5. Зависимость величин  $da / dT$  и  $dI_c / I_c$  от безразмерного параметра  $\lambda$

**Библиографический список**

1. **Стороженко, В.А.** Синхронизация вращения в задаче определения главной центральной оси инерции неоднородного твёрдого тела. Проблемы механики / В.А. Стороженко. – М.: Физматлит, 2003.
2. **Стороженко, В.А.** Определение направлений главных осей инерции в теле произвольной формы/ Киев: Ин-т матем. АН УССР: 86.32, 1986. - 40 с.
3. **Гернет, М.М.** Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобылский. – М.: Машиностроение, 1969. - 315 с.
4. **Лаврентьев, М.А.** Методы теории функции комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.04.2010*

**S.E. Piliposian**

**MEASUREMENT OF RANDOM SOLID BODY MOMENT OF INERTIA**

The article contains a description of experimental facility and measurement procedure for heterogeneous solid body moment of inertia relating to central axis of assigned direction with at least 0.5% accuracy and determination of mass center point with at least 1 mm accuracy.

Special attention is given to estimation of measurement errors performed using the method of recording of vibration periods. The measurements are performed with the use of an ordinary time-interval recorder, a ruler, an angle gage, and a simple experimental facility. Experiment conditions that provide minimum error are defined. The article contains diagrams and tables of physical quantities, which are the most important for the achievement of this goal.

*Key words:* moment of inertia, radius of inertia, main axis, equivalent simple pendulum, equivalent length, Joukowski function, method of parallel axes, heterogeneous solid body, rigid double suspension.

---

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

УДК 621.039

О.Б. Самойлов, А.А. Фальков, О.Н. Морозкин, В.Е. Лукьянов

### УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИЗ ТВСА ВВЭР-1000

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»

Рассмотрены вероятностные методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, используемые зарубежными фирмами при обосновании теплотехнической надежности активных зон водо-водяных реакторов. Представлена вероятностная методика учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны ВВЭР-1000, состоящей из ТВС альтернативной конструкции (ТВСА), в режимах нормальной эксплуатации (НЭ) и режимах нарушения нормальной эксплуатации (ННЭ).

*Ключевые слова:* теплотехническая надежность, коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи, неопределенность параметров, нормальный закон распределения.

#### Введение

При проектировании и эксплуатации топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000 установлены ограничения на нейтронно-физические и теплогидравлические параметры активной зоны реактора в виде проектных пределов (критериев) при нормальной эксплуатации.

Основным критерием теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации является предотвращение кризиса теплоотдачи на поверхности наиболее «горячего» твэла с вероятностью не менее 95% при доверительном уровне 95%. Указанный критерий соответствует основному проектному критерию *NRC* для активных зон ядерных реакторов, принятому в мировой практике для *PWR* [1, 2].

В соответствии с требованиями нормативных документов проверка выполнения проектных пределов проводится в консервативном подходе с учетом:

- отклонения мощности и режимных параметров реактора при эксплуатации от проектных значений;
- технологических отклонений при изготовлении элементов активной зоны;
- методических погрешностей при моделировании нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора;
- отклонений геометрических характеристик активной зоны в процессе эксплуатации;
- погрешности измерений.

В практике обоснования активных зон ВВЭР минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи рассчитывается при наложении предельных отклонений всех определяющих параметров в неблагоприятную сторону. Полученные таким образом значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи являются консервативной оценкой этой вели-

ны и ограничивают возможность улучшения технико-экономических характеристик топливного цикла, требующего увеличения мощности ТВС и твэлов.

Предлагаемая методика статистически учитывает неопределенности в локальном тепловом потоке, подогреве теплоносителя в ячейках и погрешность расчета критического теплового потока при определении запаса до кризиса теплоотдачи, исходя из обеспечения уровня доверительной вероятности не менее 95%, и позволяет снять излишний консерватизм в оценке минимального значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

### Детерминистский подход

При обосновании теплотехнической надежности активных зон ВВЭР-1000 значения коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи рассчитываются при предельных значениях отклонений всех определяющих параметров в неблагоприятную сторону, включая отклонения в критическом тепловом потоке, обусловленные погрешностью расчета, неопределенности в локальном тепловом потоке и подогреве теплоносителя в ячейке ТВС.

Расчет коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи в ТВСА активных зон ВВЭР-1000 проводится с использованием программ поячейкового теплогидравлического расчета ТВС.

Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи определяется для каждого твэла в ТВС из соотношения

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}} \cdot (1 - \Delta q_{\text{кр}})}{q_S \cdot K_{\text{инж}}^q}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{кр}}$  – критический тепловой поток на поверхности твэла, рассчитываемый по локальным параметрам теплоносителя в расчетной ячейке с учетом  $K_{\text{инж}}^{\Delta}$ ;  $\Delta q_{\text{кр}}$  – погрешность расчета критического теплового потока на основе обработки большого массива экспериментальных данных, составляет 15%, определяется с доверительной вероятностью не менее 0,95;  $q_S$  – локальный тепловой поток;  $K_{\text{инж}}^q$  – инженерный коэффициент запаса на тепловой поток с поверхности твэла, учитывающий неопределенности и технологические допуски при изготовлении твэлов, такие как отклонения геометрии оболочек твэлов и топливных таблеток, обогащения и загрузки топлива, осевого зазора в столбе топлива и др., а также погрешности нейтронно-физического расчета полей энерговыделения по кассетам, твэлам в кассете и высоте активной зоны.

При расчете критического теплового потока учитывается возможное отклонение энтальпии теплоносителя в расчетной ячейке от рассчитываемого значения за счет погрешностей расчетных методик и отклонений геометрических характеристик. Учет производится с помощью инженерного коэффициента запаса на локальный подогрев теплоносителя с использованием соотношения

$$\Delta I_{\text{откл}} = \Delta I_{\text{яч}} \cdot K_{\text{инж}}^{\Delta}, \quad (2)$$

где  $\Delta I_{\text{откл}}$ ,  $\Delta I_{\text{яч}}$  – значения изменения относительной энтальпии теплоносителя в рассматриваемой ячейке с учетом и без учета инженерного коэффициента запаса на подогрев теплоносителя;  $K_{\text{инж}}^{\Delta}$  – инженерный коэффициент запаса на локальный подогрев теплоносителя в ячейке.

### Использование вероятностной методики учета отклонений локальных параметров зарубежными фирмами

Вероятностные методики, учитывающие случайный характер отклонений практически всех определяющих параметров, используются за рубежом при обосновании теплотехнической надежности активных зон водо-водяных реакторов [3, 4].

Представление о вероятностных методиках можно получить на примере методики вероятностного учета отклонений параметров – MSG, разработанной фирмой FRAMATOME, в основе которой лежит выделение «вероятностной» составляющей в отклонениях рассматриваемых параметров и ее учет в соответствии с правилами статистики (рис. 1).

Диаграмма (рис. 1, а) отвечает детерминистскому подходу к расчету коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

Предельное проектное значение минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи  $DNBR_{DL}$ , отвечающее условию отсутствия кризиса теплоотдачи на поверхности твэлов, определяется с учетом погрешности расчета критического теплового потока (17%) и проектного запаса на искривление ТВС ( $DP_{RB}=6,1\%$ ).

В детерминистском подходе фирмы FRAMATOME  $DNBR_{DL} = 1,25$ , причем этот коэффициент не зависит от параметров реакторной установки и является пределом, с которым сравниваются полученные коэффициенты запаса до кризиса теплоотдачи.

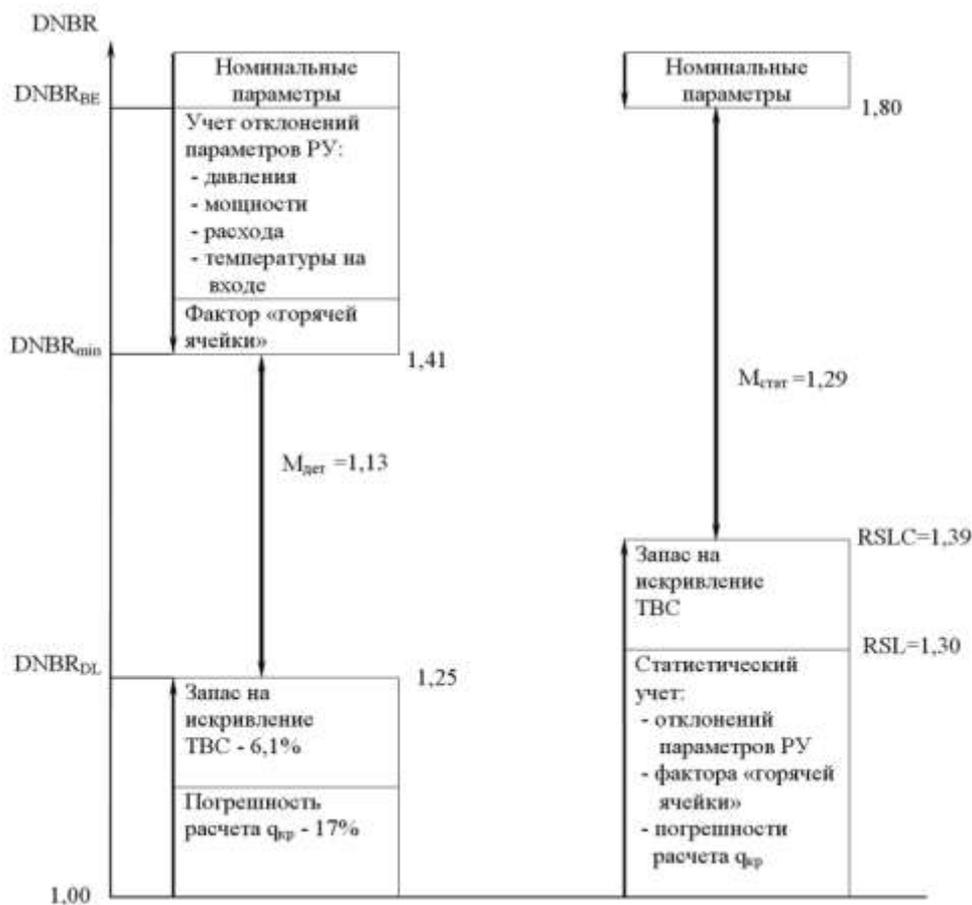


Рис. 1. Детерминистская и статистическая методики расчета коэффициента запаса (FRAMATOME)

а – детерминистский подход; б – статистический подход MSG

Значение минимального коэффициента запаса  $DNBR_{min}$  в детерминистском подходе определяется при отклонениях параметров эксплуатации реакторной установки в неблагоприятную сторону, учитывается также фактор «горячей ячейки» – увеличение локального энерговыделения до предельных значений.

Степень теплотехнической надежности активной зоны характеризуется отношением  $M$  минимального коэффициента запаса  $DNBR_{min}$  к предельному проектному значению  $DNBR_{DL}$ :

$$M = \frac{DNBR_{\min}}{DNBR_{DL}}. \quad (3)$$

В статистическом подходе (рис. 1, б) определяется  $DNBR_{BE}$  – минимальный коэффициент запаса при номинальных параметрах работы реакторной установки без учета отклонений.

Учет неопределенностей параметров реакторной установки (РУ), ядерных и тепловых параметров, параметров изготовления топлива, включая отклонения, накладываемые для «горячей ячейки», проводится статистическим суммированием указанных отклонений. В эту же сумму входит неопределенность теплогидравлического расчета по используемому ячейковому коду FLICA III-F и погрешность корреляции для расчета критического теплового потока. Полученная таким образом величина представляет собой полное среднеквадратичное отклонение ( $\sigma_t$ ), на основе которого в соответствии с приведенным далее соотношением определяется статистический предельный проектный запас  $RSL$ :

$$\sigma_t = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}, \quad (4)$$

$$RSL = 1 + 1,645 \cdot \sigma_t. \quad (5)$$

Коэффициент 1,645 отвечает односторонней вероятности исполнения события 95% для нормального закона распределения.

В методике фирмы FRAMATOME используются следующие значения отклонений:

- мощности активной зоны: равномерное распределение  $\sigma=1,15\%$ ;
- давления: равномерное распределение  $\sigma=0,121\text{МПа}$ ;
- расхода: равномерное распределение  $\sigma=0,69\%$ ;
- входной температуры: равномерное распределение  $\sigma=1,27^\circ\text{C}$ ;
- локального теплового потока: нормальное распределение  $\sigma=0,0394$ ;
- локального подогрева: нормальное распределение  $\sigma=0,0188$ .

Погрешность расчета критического теплового потока для кода FLICA III-F составляет  $\Delta q_{\text{кр}}=17\%$  при использовании корреляции WRB-1.

Расчет  $RSL$  (без учета искривления ТВС) проводится для восьми состояний, охватывающих полный диапазон изменения параметров РУ (давление, температура, мощность, расход), характерный для НЭ и аварийных режимов, определяющих по условиям охлаждения активной зоны, включая режимы с ростом мощности и уменьшения расхода. Для каждого режима на основе расчетов по ячейковому теплогидравлическому коду FLICA III-F набора 1000 состояний, сформированных методом генерирования случайных чисел типа Монте-Карло, определяется распределение плотности вероятности  $RSL$ .

В данном подходе учета отклонений и неопределенностей полное среднеквадратичное отклонение  $\sigma_t$  составляет 18,2%, а предельный проектный запас  $RSL=1,30$  [3].

Проектный запас на искривление ТВС учитывается детерминистически:

$$RSLC = \frac{RSL}{1 - DP_{RB}} = 1,39. \quad (6)$$

Коэффициент  $RSLC$  представляет собой аналог предельного проектного запаса  $DNBR_{DL}$  в детерминистском подходе. Выполнение условия  $DNBR_{BE} > RSLC$  обеспечивает отсутствие кризиса теплоотдачи для наиболее горячего твэла с уровнем доверительной вероятности не менее 95%.

В качестве примера рассмотрено определяющее по теплотехническим запасам состояние в режиме с потерей расхода при номинальной мощности и расходе 80% от номинального для типичного трехпетлевого реактора PWR фирмы FRAMATOME мощностью 900 МВт(э).

В статистическом подходе отношение минимального коэффициента запаса  $DNBR_{BE}$  к предельному проектному запасу  $RSLC$  составляет  $M_{\text{стат}}=1,29$ , что на 16% выше, чем в детерминистском подходе.

Аналогичный рассмотренному подход применен фирмой WESTINGHOUSE для обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР-1000 АЭС «Темелин» с тепловыделяющими сборками VVANTAGE6.

В основе использования фирмой WESTINGHOUSE вероятностной методики RTDP (Revised Thermal Design Procedure) лежит статистический учет неопределенностей параметров РУ, параметров горячей ячейки, неопределенностей расчета локальных параметров и критического теплового потока [4].

Статистическому учету, согласно методике RTDP, подлежат отклонения входной температуры  $\Delta T_{\text{вх}}=1,2^\circ\text{C}$ , давления  $\Delta P=0,3$  МПа, тепловой мощности активной зоны  $\Delta N=4\%$ . В отличие от неопределенностей локальных параметров, распределение которых соответствует нормальному закону, для отклонений параметров РУ принимается равномерный закон распределения.

На расход теплоносителя статистический учет не распространяется. Расход теплоносителя через активную зону принимается минимальным.

Обоснование теплотехнической надежности АЭС «Темелин» проводилось с использованием ячейкового кода VIPRE, представляющего трехмерный код с включением уравнений для поперечных потоков теплоносителя и предназначенного для теплогидравлических расчетов как в стационарных, так и в динамических режимах. Погрешность расчета критического теплового потока для кода VIPRE составляет  $\Delta q_{\text{кр}}=18,5\%$  при использовании корреляции WX1H (работа реактора на четырех и трех главных циркуляционных насосах (ГЦН)).

Проектный предел  $DNBR_{DL}$  в режиме работы на четырех ГЦН, включающий запас на искривление твэлов, составляет  $DNBR_{DL}=1,30$ .

### Усовершенствованная методика учета отклонений локальных параметров при расчете коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи

Расширение вероятностного подхода с учетом случайного характера отклонений параметров дает снижение консерватизма в оценке минимального значения коэффициента запаса, по сравнению с применяемым детерминистским подходом [5].

В методике статистического учета отклонений локальных параметров коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}} \cdot (1 - \Delta K_{\text{зап}})}{q_S}, \quad (7)$$

где  $q_{\text{кр}}$  – критический тепловой поток, рассчитанный при предельных значениях отклонений в неблагоприятную сторону всех определяющих параметров, за исключением отклонения, обусловленного погрешностью расчета  $q_{\text{кр}}$ , локального подогрева  $\Delta I$  и отклонения локального теплового потока  $q_S$ ;  $\Delta K_{\text{зап}}$  – погрешность расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, статистически учитывающая погрешность расчета критического теплового потока, локального подогрева и отклонения локального теплового потока.

При односторонней доверительной вероятности 95% для нормального закона распределения отклонений связь полной погрешности  $\Delta K_{\text{зап}}$  со среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  дается соотношением

$$\Delta K_{\text{зап}} = 1,645 \cdot \sigma. \quad (8)$$

Следует отметить, что для уровня односторонней доверительной вероятности 95% различные законы распределения, включая равномерное, треугольное, нормальное и др., дают близкие значения неопределенности  $\Delta/\sigma \approx (1,60 \pm 0,05)$  [6]. Так что, строгое выполнение нормального закона для рассматриваемых распределений не является обязательным при учете отклонений, соответствующих уровню односторонней доверительной вероятности 95%.

Полное отклонение для коэффициента запаса определяется через отклонения локальных параметров ( $x_i$ ) при рассмотрении их статистически независимыми:

$$\Delta K_{\text{зап}}(x_1, x_2, \dots, x_i) = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2}. \quad (9)$$

В силу того, что отклонения подогрева и локального теплового потока являются зависимыми величинами, связанными с отклонениями мощности твэлов  $\Delta N_{\text{ТВ}}$ , следует выделить независимую от  $\Delta N_{\text{ТВ}}$  часть отклонения локального подогрева  $\Delta \tilde{I}$ .

В этом случае в качестве статистически независимых составляющих погрешности расчета  $K_{\text{зап}}$  рассматриваются следующие [7]:

- корреляции критического теплового потока –  $\Delta q_{\text{корт}}$ ;
- определения линейной нагрузки в части изменения аксиальной неравномерности энерговыделения  $\Delta K_z$ ;
- определения мощности твэла –  $\Delta N_{\text{ТВ}}$ ;
- независимая от мощности твэла часть отклонения локального подогрева теплоносителя  $\Delta \tilde{I}$ .

В качестве независимых переменных рассматриваются КТП, аксиальная неравномерность энерговыделения  $K_z$ , мощность твэла  $N_{\text{ТВ}}$  и независимая часть локального подогрева  $\Delta \tilde{I}$ , а выражение для расчета погрешности  $\Delta K_{\text{зап}}$  принимает вид

$$\Delta K_{\text{зап}}^2 = \left( \frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial q_{\text{корт}}} \right)^2 \cdot \Delta q_{\text{корт}}^2 + \left( \frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial K_z} \right)^2 \cdot \Delta K_z^2 + \left( \frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I} \right)^2 \cdot \Delta \tilde{I}^2 + \left( \frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial N_{\text{ТВ}}} \right)^2 \cdot \Delta N_{\text{ТВ}}^2. \quad (10)$$

Значения величин  $\Delta q_{\text{корт}}$ ,  $\Delta K_z$ ,  $\Delta \tilde{I}$ ,  $\Delta N_{\text{ТВ}}$  принимаются исходя из обеспечения односторонней доверительной вероятности 95%.

При определении неопределенностей  $\Delta K_z$  и  $\Delta N_{\text{ТВ}}$  учитывается связь между ними из соотношения для величины отклонения локального теплового потока:

$$\Delta q_s = \sqrt{\Delta K_z^2 + \Delta N_{\text{ТВ}}^2}. \quad (11)$$

Значения коэффициентов связи  $\frac{\partial \Delta I}{\partial N_{\text{ТВ}}}$ ,  $\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I}$ , неравные 1, 0, меняются в зависимости

от параметров режима работы РУ, для которого определяется запас до кризиса теплоотдачи. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [1, 2] применительно к обоснованию безопасности эксплуатации реакторов типа ВВЭР-1000 с использованием статистических методов коэффициенты связи определяются для стационарных и переходных режимов нормальной эксплуатации, определяющих режимов нарушения нормальной эксплуатации и аварийных режимов с нарушением теплоотвода от активной зоны. Из полученного набора выбираются наихудшие, определяющие максимальную величину  $\Delta K_{\text{зап}}$ , значения  $\frac{\partial \Delta I}{\partial N_{\text{ТВ}}}$ ,  $\frac{\partial K_{\text{зап}}}{\partial \Delta I}$ .

При определении отклонения  $\Delta K_{\text{зап}}$  используются результаты предварительно выполненных расчетов режимов, являющихся определяющими по условиям охлаждения активной зоны.

Из проведенной серии расчетов выбираются состояния, при которых имеет место минимальный коэффициент  $K_{\text{зап}}$ .

Для набора состояний, диапазон изменения основных параметров (расход, мощность, давление, входная температура) в которых отвечает диапазону изменения определяющих по условиям  $K_{\text{зап}}$  параметров теплоносителя в рассматриваемых режимах работы РУ (включая пределы Core Limits), определяются коэффициенты чувствительности и определяется максимальное значение  $\Delta K_{\text{зап}}$ .

### Эффект снижения консерватизма расчета теплотехнического запаса за счет использования уточненного вероятностного подхода

Определение  $\Delta K_{\text{зап}}$  проводится для режимов нормальной эксплуатации, определяющих режимов нарушений нормальной эксплуатации и аварийных режимов с нарушениям охлаждения активной зоны, включая обесточивание одного из четырех ГЦН, обесточивание АЭС, заклинивание одного из четырех ГЦН, непреднамеренное извлечение органа средств управления и защиты.

Основные теплогидравлические параметры изменяются в следующих диапазонах:

- мощность -  $80\% \leq N_1 \leq 105\%$ ;
- расход теплоносителя по первому контуру -  $64\% \leq G_1 \leq 100\%$ ;
- давление теплоносителя -  $12,7 \text{ МПа} \leq P \leq 16,6 \text{ МПа}$ ;
- температура на входе в активную зону -  $272^\circ\text{C} \leq T_{\text{вх}}^{\text{аз}} \leq 304^\circ\text{C}$ .

Анализ результатов расчетов  $\Delta K_{\text{зап}}$  в основных режимах нарушений нормальной эксплуатации и проектных авариях, показывает, что максимальное значение отклонения  $\Delta K_{\text{зап}}$  имеет место в режиме с заклиниванием одного из четырех ГЦН.

Определенное по уточненной методике значение погрешности расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи  $\Delta K_{\text{зап}}$  с использованием принятых отклонений в локальном тепловом потоке и погрешностей определения критического теплового потока [8, 9] и локального подогрева с учетом режимов нарушений нормальной эксплуатации составляет  $\Delta K_{\text{зап}}=0,24$ .

Выражение для расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи принимает вид:

$$K_{\text{зап}} = \frac{q_{\text{кр}}}{q_s} \cdot 0,76. \quad (12)$$

Расчет коэффициентов запаса, проведенный для активной зоны из ТВСА 1 блока Калининской АЭС в режиме  $100\% N_{\text{ном}}$ , показал, что совместный учет вероятностного характера погрешности расчета критических тепловых потоков и отклонений локального теплового потока и локального подогрева приводит к увеличению минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, по сравнению с предельным детерминистским подходом на  $\sim 15\%$ , и обеспечивает снижение консерватизма при анализе теплотехнической надежности активных зон ВВЭР-1000.

Следует отметить, что величина  $\Delta K_{\text{зап}}=0,24$  получена для инженерных коэффициентов запаса для активных зон с ТВС без перемешивающих устройств. При применении в ТВС решеток-интенсификаторов теплообмена погрешность определения локального подогрева уменьшается, по сравнению с ТВС без перемешивающих устройств, за счет того, что возмущение подогрева распространяется на большее число ячеек и величина повышения подогрева в наиболее напряженной ячейке снижается.

Таким образом, для ТВС с перемешивающими решетками можно ожидать некоторого

уменьшения погрешности определения  $\Delta K_{\text{зап}}$  и увеличения минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

### Статистический учет отклонений путем прямых вычислений

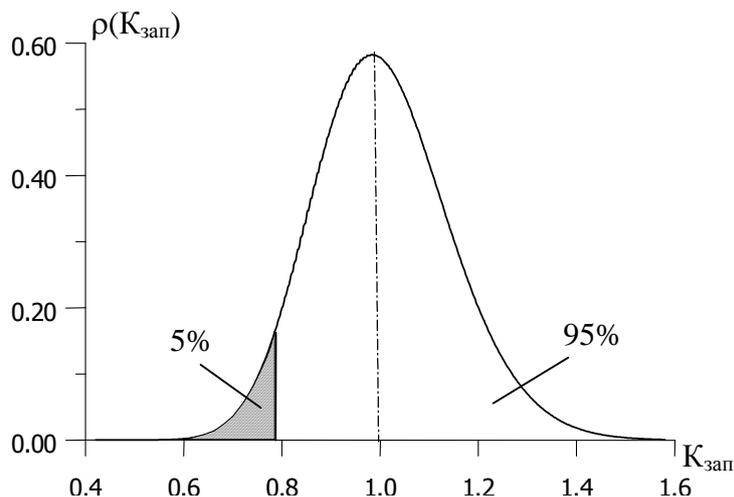
Расчет  $\Delta K_{\text{зап}}$  на основе соотношения (10) подтвержден для режима работы на номинальной мощности путем прямого определения распределения плотности вероятности  $K_{\text{зап}}$  для набора из  $\sim 10^5$  состояний, формируемых путем изменения каждого из рассматриваемых в статистическом подходе параметров в соответствии с распределением вероятности их неопределенностей.

Принят нормальный закон распределения отклонений рассматриваемых параметров. Перебором всех возможных значений (в интервале  $\pm 4\sigma$ ) отклонений параметров определяется распределение коэффициентов запаса до кризиса теплоотдачи, которые могут реализоваться в ТВС при данных параметрах РУ.

Полученное таким образом распределение коэффициента запаса приведено на рис. 2.

Как можно видеть из рис. 2, полученное по методу перебора распределение  $K_{\text{зап}}$  относится к классу экспоненциальных распределений (близко к нормальному распределению). Распределение характеризуется среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{K_{\text{зап}}} = 0,133$ . Уровню односторонней доверительной вероятности 95% соответствует величина отклонения  $\Delta K_{\text{зап}} = 0,235$ .

Проведенный по методу перебора расчет показал хорошее совпадение значений  $\Delta K_{\text{зап}}$  с результатами расчета по соотношению (10).



**Рис. 2. Распределение относительного значения коэффициента запаса при учете отклонений локальных параметров (метод прямого перебора)**

### Выводы

Рассмотрены вероятностные методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, используемые при расчетах теплотехнической надежности активных зон водоводяных реакторов зарубежными фирмами, которые учитывают вероятностный характер отклонений интегральных и локальных параметров и позволяют исключить консерватизм при определении теплотехнических запасов, по сравнению с детерминистским подходом, на  $\sim 16\%$ .

Применение усовершенствованной методики расчета коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, обеспечивающей совместный учет случайного характера погрешности расчета критического теплового потока, отклонений локального теплового потока и подогрева теп-

лоносителя, позволяет повысить расчетное значение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи на ~15%, по сравнению с прежним предельным детерминистским подходом, за счет снижения избыточного консерватизма расчета. Это дает возможность реализации на энергоблоках ВВЭР-1000 эффективных топливных циклов с уменьшенной утечкой нейтронов, требующих увеличения допустимых неравномерностей энерговыделения в активной зоне.

На дальнейшей стадии в методике расчета коэффициента запаса целесообразно учесть вероятностный характер отклонений мощности, расхода, давления, входной температуры, исходя из обеспечения уровня доверительной вероятности 95%.

#### Библиографический список

1. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide No.SSG-2. IAEA. Safety Standards. 2009.
2. Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation. Safety Reports Series No. 52. IAEA. 2008.
3. J.P. Bourteele, J. Greige, M. Missaglia. The FRAMATOME generalized statistical DNBR method (MSG). Proc. NURETH-6, Grenoble, Oct. 5-8. 1993. Vol. 1. P. 355.
4. S. Ray, A.J. Friedland, E.H. Novendstern, «Westinghouse Advanced Statistical DNB Methodology – The Revised Thermal Design Procedure», Third Int. Topical Meet. On Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, November 1988. Seoul. Korea.
5. **Левин, Е.И.** Предложения по методологии определения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи по тепловому потоку // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации. – Сосновый Бор: НИТИ, 2000.
6. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
7. **Фальков, А.А.** Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000 / А.А. Фальков [и др.] // WWER fuel performance, modeling and experimental support: сб. докладов 6-й международной конференции. Albena, Bulgaria, 2005.
8. **Безруков, Ю.А.** Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Астахов, В.Г. Брантов / Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80-82.
9. **Астахов, В.И.** Учет аксиальной неравномерности тепловыделения при определении запасов по кризису теплообмена в реакторах типа ВВЭР / В.И. Астахов, Ю.А. Безруков, С.А. Логвинов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып. 5. № 9. С. 161–168.

*Дата поступления  
в редакцию 02.11.2010*

**O.B. Samoylov, A.A. Falkov, O.N. Morozkin, V.E. Lukyanov**

#### **THE REVISION OF THE METHOD TAKING INTO ACCOUNT OF THE DEVIATIONS OF LOCAL PARAMETER FOR SUBSTANTIATION OF RELIABILITY OF CORE VVER-1000 WITH TVSA**

The statistical DNBR methods used by foreign companies for substantiation of reliability of the cores cooling are considered. The statistical method taking into account the deviations of local parameters for substantiation of reliability of cooling of the VVER-1000 cores with alternative design fuel assemblies in modes of normal and abnormal operation is presented.

*Key words:* reliability of the cores cooling, departure from nucleate boiling ratio (DNBR), uncertainty of parameters, normal law of distribution.

УДК 621.039

С.М. Дмитриев<sup>1</sup>, О.Б.Самойлов<sup>2</sup>, В.Е. Лукьянов<sup>2</sup>, О.Н. Морозкин<sup>2</sup>**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ  
РЕШЕТОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ  
СБОРКАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>1</sup>,  
ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»<sup>2</sup>

Представлены результаты экспериментальных исследований перемешивания теплоносителя и кризиса теплоотдачи в ТВСА-Т с комбинированными дистанционирующими и перемешивающими решетками-интенсификаторами на аэродинамическом и теплофизических стендах. На основе полученных результатов выполнено уточнение коэффициента межъячейкового перемешивания теплоносителя и разработана корреляция для расчета критического теплового потока. Показана высокая эффективности применения комбинированных решеток в ТВСА-Т в реакторах ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции, перемешивающие решетки-интенсификаторы, коэффициент перемешивания, кризис теплоотдачи, корреляция критического теплового потока.

**Введение**

Тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции (ТВСА) для реакторов ВВЭР-1000 имеет жесткий каркас, формируемый шестью уголками жесткости и дистанционирующими решетками.

Угловая конструкция ТВСА, с точки зрения реакторной теплогидравлики, имеет положительные качества: невысокое гидравлическое сопротивление, более оптимальное для охлаждения ТВЭЛов распределение расхода по ячейкам за счет меньшего диаметра направляющего канала (НК) и наличия уголков жесткости, вытесняющих часть расхода из ненагруженного межкассетного пространства в ячейки ТВСА [1].

Теплотехнические характеристики ТВСА подтверждены опытом успешной эксплуатации на 17 блоках ВВЭР-1000 Калининской АЭС, АЭС Украины и Болгарии [2, 3]. Внедрение ТВСА обеспечило улучшение технико-экономических и эксплуатационных характеристик топлива для ВВЭР-1000.

Проводится совершенствование ТВСА в целях повышения технико-экономических показателей и конкурентоспособности топлива для ВВЭР-1000 [4]. Разработана усовершенствованная модификация ТВСА с перемешивающими решетками-интенсификаторами – ТВСА-Т. Тепловыделяющая сборка ТВСА-Т характеризуется увеличенными до 510 мм шагом расположения и до 35 мм высотой дистанционирующих решеток (ДР).

Конструкция перемешивающих решеток (ПР) – пластинчатая решетка с дефлекторами потока без функции дистанционирования ТВЭЛов. Расположение дефлекторов в ПР организовано таким образом, чтобы обеспечивать закрутку потока вокруг ТВЭЛов.

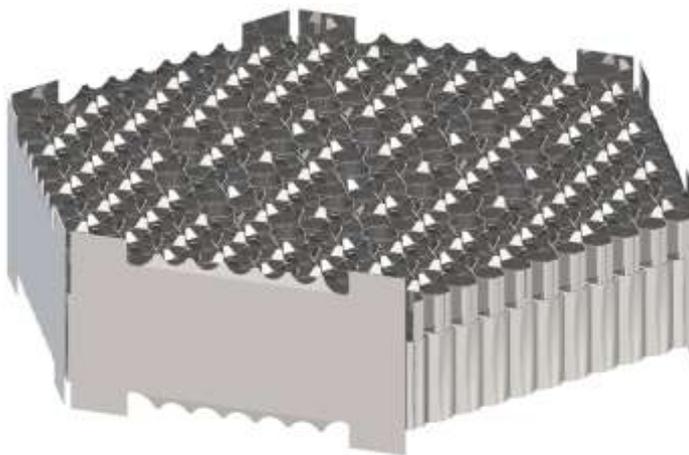
В ТВСА-Т ПР применяются в составе комбинированных дистанционирующих решеток (КДР). Комбинированная дистанционирующая двухъярусная решетка состоит из ячейковой ДР и пластинчатой ПР, расположенных в одном обходе (рис. 1).

Исследование эффективности и теплогидравлическое обоснование применения ПР выполнялось совместно ОАО «ОКБМ Африкантов», ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского и НГТУ им. Р.Е. Алексева и включало:

- исследование перемешивающих свойств на крупномасштабных моделях методом пропанового трассера в НГТУ им. Р.Е. Алексева;

- исследование кризиса теплоотдачи и температуры теплоносителя на 19-стержневых моделях в ОАО «ОКБМ Африкантов» и ГНЦ РФ-ФЭИ;
- разработка и обоснование корреляции для критического теплового потока (КТП) в ТВСА-Т с ПР и уточнение методики расчета на основе полученных результатов исследований, верификация ячейкового кода «КАНАЛ».

С использованием уточненной методики выполнен анализ теплотехнических характеристик ТВСА-Т с ПР в составе активной зоны ВВЭР-1000.



**Рис. 1. Комбинированная дистанционирующая решетка**

### **Исследование эффективности перемешивания теплоносителя на аэродинамическом стенде методом «пропанового трассера»**

На аэродинамическом стенде НГТУ выполнены исследования эффективности перемешивания теплоносителя на крупномасштабных моделях ТВСА-Т с ПР.

Стенд представляет собой гидравлически разомкнутый контур с рабочим участком на выходе, через который вентилятором высокого давления прокачивается воздух. Рабочий участок включает в себя экспериментальную модель в шестигранном кожухе с устройствами подачи трассера и отбора пробы.

Для исследования межячейкового массообмена использовался метод инъекции трассера. В качестве трассера применялся пропан, который подавался в заданные ячейки модели.

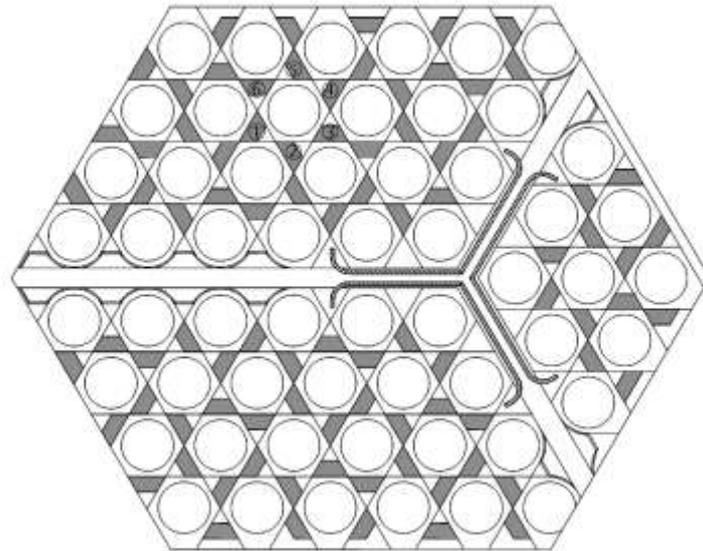
Исследования выполнены на 57-стержневой модели, включающей фрагменты трех соседних ТВСА-Т (рис. 2).

Модели ТВСА с ПР изготавливались в масштабе 4,4:1 и по основным элементам, определяющим условия межячейкового массообмена, геометрически подобна натурным. Длина модели составляет 3 м.

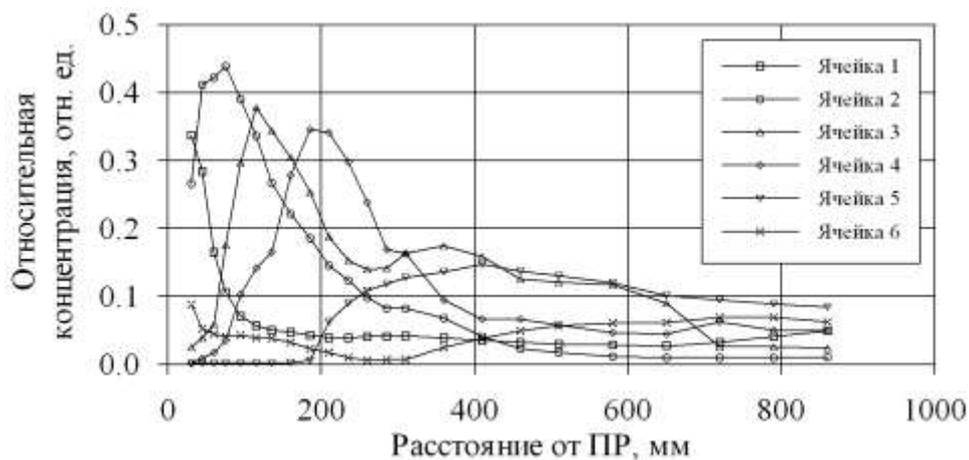
Представительность экспериментальных исследований на стенде обеспечивалась:

- использованием масштабных фрагментов ТВСА и фрагментов ДР и ПР;
- проведением исследований при параметрах теплоносителя, соответствующих автомодельному режиму течения теплоносителя (число Рейнольдса  $Re \approx 90000$ );
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Проведенные исследования показали, что за перемешивающей решеткой в 6-ячейковых областях с расположением дефлекторов по схеме «закрутка потока вокруг твэлов» происходит винтообразное постепенно затухающее по длине течение воздуха, обеспечивающее эффективный конвективный массообмен между ячейками этой области (рис. 3).



**Рис. 2. Схема поперечного сечения 57-стержневой модели:**  
 ① – ячейка подачи трассера и измерения концентрации трассера;  
 ② - ⑥ – ячейки измерения концентрации трассера



**Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели**

Длина участка модели за ПР, на котором конвективный перенос играет определяющую роль, составляет 330–440 мм (70–100 мм в пересчете на натурные условия). На большем расстоянии от ПР основным механизмом массообмена является турбулентный перенос, интенсифицированный дефлекторами решетки.

Расчетный анализ результатов исследований межячейкового массообмена показал, что в модельной сборке на участке за ПР длиной ~860 мм (~200 мм в пересчете на натурные условия) коэффициент перемешивания в 7,0-8,0 раз больше коэффициента перемешивания в пучке твэлов без ПР.

### **Исследование кризиса теплоотдачи и распределения температуры теплоносителя на теплофизических стендах**

Исследование кризиса теплоотдачи и распределения температуры теплоносителя выполнялось на двух стендах в ОАО «ОКБМ Африкантов» и ГНЦ РФ-ФЭИ. Целью проведения исследований являлось определение эффекта увеличения критической мощности при использовании ПР и формирование массива экспериментальных данных для разработки корреляции КТП.

Экспериментальный стенд Л-186 ОКБМ включает два замкнутых водяных контура:

- основной контур, рассчитанный на рабочее давление до 19,6 МПа;
- вспомогательный контур, служащий для снятия тепла с основного контура.

Давление в обоих замкнутых контурах создается воздушным компрессором и подпиточными насосами.

Основные характеристики стенда Л-186:

– давление теплоносителя	до 19,6 МПа;
– температура теплоносителя на входе	до 310 °С;
– расход теплоносителя	до 6 кг/с.

Стенд СВД-2 ГНЦ РФ-ФЭИ включает три контура. Тепло основного контура передается промежуточным контуром в контур оборотного водоснабжения, из которого тепло в капельной градирне передается атмосферному воздуху.

Основные характеристики стенда СВД-2:

– давление теплоносителя	до 25,5 МПа;
– температура теплоносителя на входе	до 450 °С;
– расход теплоносителя	до 27 кг/с.

Все узлы, арматура и трубопроводы стендов, имеющие контакт с теплоносителем, изготовлены из коррозионностойкой стали.

В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Экспериментальные модели представляли собой электрообогреваемые пучки имитаторов ТВЭЛов. Электрическое напряжение подводилось в верхней и нижней частях экспериментальных моделей ТВС по медным токоподводящим участкам.

Представительность экспериментальных исследований на теплофизических стендах обеспечивалась:

- использованием моделей ТВС с натурными геометрическими характеристиками элементов;
- использованием фрагментов натурной КДР;
- проведением исследований при натуральных параметрах теплоносителя;
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Исследования на стенде Л-186 проведены на шести 19-стержневых моделях ТВСА-Т, на стенде СВД-2 – на четырех 19-стержневых моделях ТВСА-Т, включая модели с радиальной и аксиальной неравномерностью энерговыделения.

Диапазон режимных параметров, в котором выполнены исследования кризиса теплоотдачи:

– давление теплоносителя	9,0-18,0 МПа;
– температура теплоносителя на входе	150-310 °С;
– массовая скорость теплоносителя	500-5500 кг/(м <sup>2</sup> ·с).

В результате проведенных исследований кризиса теплоотдачи получено, что критическая мощность модели ТВСА-Т на 10-15% выше критической мощности модели ТВСА.

Сопоставление критической мощности 19-стержневых моделей ТВСА-Т и ТВСА с центрально-симметричным радиальным и равномерным аксиальным энерговыделением, исследованных на стенде Л-186, при давлении 15,7 МПа и температуре на входе в модель 290°С представлено на рис. 4.

В результате исследований распределения температуры на выходе моделей ТВС с центрально-симметричным радиальным энерговыделением получено, что при использовании ПР в модели ТВСА-Т происходит практически полное выравнивание температуры по сечению модели, в отличие от модели ТВСА, где разность температуры в центре и на периферии составляет ≈10% от среднего подогрева в сборке.

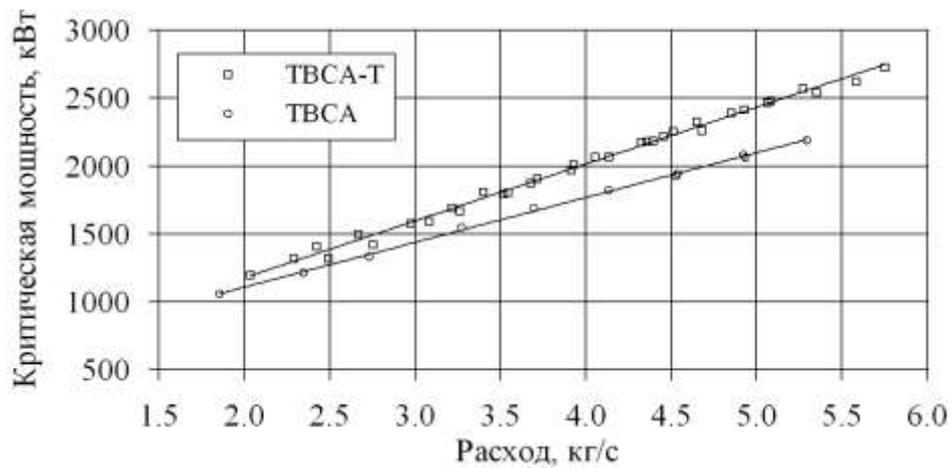


Рис. 4. Зависимость критической мощности от расхода теплоносителя

Сопоставление температуры теплоносителя в ячейках на выходе 19-стержневых моделей ТВСА-Т и ТВСА с центрально-симметричным радиальным и равномерным аксиальным энерговыделением, исследованных на стенде Л-186, при давлении 15,7 МПа, температуре на входе в модель 290°C, расходе 5,7 кг/с и мощности 1650 кВт представлено на рис. 5. Схема расположения термопреобразователей в ячейках экспериментальной модели показана на рис. 6.

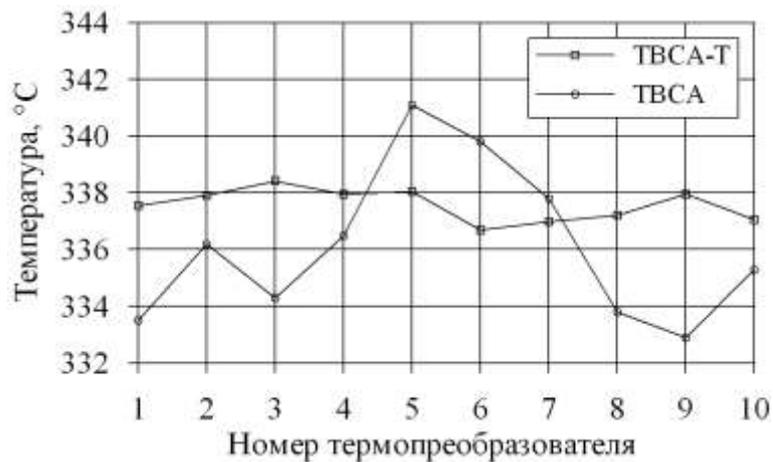


Рис. 5. Распределение температуры теплоносителя в ячейках экспериментальной модели

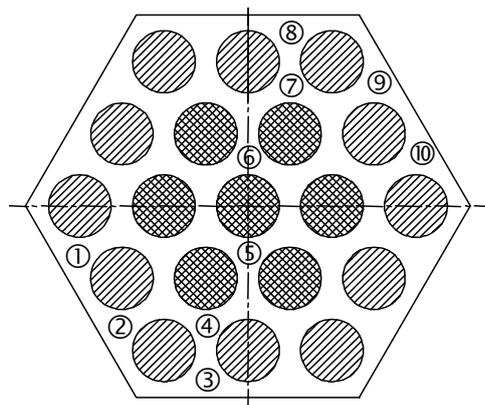


Рис. 6. Схема расположения термопреобразователей в ячейках экспериментальной модели

### Разработка и обоснование корреляции для критического теплового потока и уточнение коэффициента межъячейкового обмена

В настоящее время в отечественной практике отсутствуют корреляции для расчета критического теплового потока в ТВС с перемешивающими решетками-интенсификаторами. Наличие увеличенного шага расположения ДР и использование ПР в ТВСА-Т, учитывая полученные результаты исследований, потребовало разработки новой корреляции КТП, а также уточнения коэффициента межъячейкового обмена.

Область применения корреляции КТП выбрана на основе опыта анализа безопасности АЭС с ВВЭР-1000 и соответствует важным для анализа безопасности режимам с минимальным коэффициентом запаса до кризиса теплоотдачи, включая режимы работы установки на 2, 3 и 4 петлях:

– давление теплоносителя	13,0÷17,0 МПа;
– массовая скорость теплоносителя	1000÷4000 кг/(м <sup>2</sup> ·с);
– относительная энтальпия теплоносителя	–0,1÷+0,3.

Разработка и обоснование корреляции КТП включало несколько этапов, основными из которых являются:

- формирование массива экспериментальных данных;
- выбор вида (формы) корреляции;
- оптимизация коэффициентов, учитывающих влияние отдельных параметров;
- анализ отклонений экспериментальных данных от расчетных значений, исключение ошибочных результатов расчета, возможных аномальных отклонений и др.;
- определение окончательных погрешностей корреляции;
- обоснование погрешности расчета КТП в составе ячейкового кода «КАНАЛ».

Для разработки и обоснования корреляции были использованы результаты исследований КТП, полученные на моделях ТВСА-Т, которые включают экспериментальные данные по кризису теплоотдачи в характерных ячейках ТВСА-Т: стандартной ячейке, ячейке около НК и уголкового ячейке.

После предварительного анализа данных, выявления режимов с повышенными отклонениями и их исключения для разработки корреляции КТП был сформирован массив из ≈700 значений КТП и локальных параметров теплоносителя в ячейках.

Расчет локальных параметров теплоносителя в ячейках проводился по программе «КАНАЛ», аттестованной в Ростехнадзоре РФ.

С учетом имеющегося опыта обобщений результатов исследований кризиса теплоотдачи для корреляции КТП была принята зависимость в виде полинома с эмпирическими коэффициентами. В результате получена следующая зависимость для критического теплового потока (корреляция CRT-1):

$$q_{кр} = B_0 \cdot (1 - B_1 \cdot x + B_2 \cdot P_1 + B_3 \cdot x^2 + B_4 \cdot P_1^2 + B_5 \cdot x \cdot P_1 + B_6 \cdot x \cdot W_1 - B_7 \cdot P_1 \cdot W_1) \cdot (1 + B_8 \cdot P_1^{B_9} \cdot W_1^{B_{10}}) \cdot P_1^{B_{11}} \cdot W_1^{B_{12}} \cdot F_{SC} \cdot F_F, \text{ кВт/м}^2, \quad (1)$$

где  $B_0 - B_{12}$  – эмпирические коэффициенты;  $x$  – относительная энтальпия теплоносителя;  $P_1 = P/10$ ;  $W_1 = \rho w/1000$ ;  $P$  – давление теплоносителя, МПа;  $\rho w$  – массовая скорость теплоносителя, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $F_{SC}$  – поправочный коэффициент, учитывающий геометрические характеристики ячеек.

Форм-фактор для корреляции CRT-1 имеет вид

$$F_F = \left[ \frac{C}{q_z \cdot [1 - \exp(-C \cdot l_z)]} \int_0^{l_z} q(z) \cdot \exp(-C \cdot (l_z - z)) dz \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $C = C_0 \cdot (1-x)^{C_1} \cdot \left(\frac{P}{10}\right)^{C_2}$  – эмпирический коэффициент, 1/м;  $q_z$  – тепловой поток в расчетном сечении;  $q(z)$  – тепловой поток в сечении с координатой  $z$ ;  $l_z$  – координата расчетного сечения, м;  $C_0$  -  $C_2$  – эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты полиномов определены из условия минимального значения среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных значений КТП.

Общее количество полученных экспериментальных точек, входящих в область применения корреляции CRT-1, составляет  $\approx 900$  (в том числе  $\approx 50$  экспериментальных точек в области отрицательных паросодержаний).

В результате сопоставления расчетных и экспериментальных значений КТП для общего массива данных получены следующие погрешности:

- среднеарифметическое отклонение  $\bar{\Delta} = 0,1\%$ ;
- среднеквадратичное отклонение  $\bar{\sigma} = 10,0\%$ .

Погрешность расчета КТП по корреляции CRT-1 в составе кода «КАНАЛ», соответствующая одностороннему интервалу 95% при доверительной вероятности 95%,  $\Delta_{corr} = \bar{\Delta} + k_{95/95} \cdot \bar{\sigma} = 17,2\%$  ( $k_{95/95} \approx 1,71$  – для одностороннего интервала и количества экспериментальных точек  $n \approx 900$ ).

Сопоставление КТП, рассчитанных по корреляции CRT-1 и корреляции Ю.А. Безрукова [5] при давлении 15,7 МПа и относительной массовой скорости 4000 кг/(м<sup>2</sup>·с), представлено на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость критического теплового потока от относительной энтальпии теплоносителя

В настоящее время в ячейковых теплогидравлических кодах, используемых при обосновании теплотехнических характеристик и запаса до кризиса теплоотдачи активных зон, для учета тепло- и массообмена используется эмпирический коэффициент межъячейкового обмена.

В программе «КАНАЛ» коэффициент межъячейкового обмена между стандартными ячейками на единицу длины определяется по соотношению [6]:

$$K_{\text{ТО}}^{\text{СТ}} = \frac{0,03}{d_{\text{ТВ}} \cdot \text{Re}_{\text{ТВС}}^{1/12}}, \quad (3)$$

где  $\text{Re}_{\text{ТВС}}$  – число Рейнольдса при средних параметрах теплоносителя в ТВС;  $d_{\text{ТВ}}$  – наружный диаметр твэла, м.

Коэффициент турбулентного обмена  $K_{\text{ТО}}$  кода «КАНАЛ» связан с коэффициентом тепловой диффузии  $TDC$  соотношением

$$TDC = \frac{w'}{w} = K_{\text{ТО}} \cdot \frac{f}{\delta}, \quad (4)$$

где  $w'$  – скорость теплоносителя в поперечном направлении, м/с;  $w$  – скорость теплоносителя в аксиальном направлении, м/с;  $f$  – площадь проходного сечения ячейки, м<sup>2</sup>;  $\delta$  – зазор между соседними твэлами, м.

Среднее значение коэффициента межъячейкового перемешивания в пучках твэлов, дистанционируемых решетками без смесительных элементов, обосновано и составляет 1,12 м<sup>-1</sup> (коэффициент тепловой диффузии  $TDC=0,012$ ).

Определение и обоснование коэффициента межъячейкового обмена для ТВСА-Т с КДР выполнено на основе анализа результатов исследований эффективности перемешивания на крупномасштабных моделях ТВСА трассерным методом, а также распределения температуры на 19-стержневой модели на теплофизическом стенде.

Для учета повышения тепло- и массообмена в пучках твэлов с ПР в коде «КАНАЛ» используется эффективный коэффициент межъячейкового обмена  $K_{\text{эфф}}$ , равный отношению коэффициента перемешивания в пучке твэлов с ПР к коэффициенту перемешивания в пучке твэлов с ДР без смесительных элементов, рассчитываемому по соотношению (3).

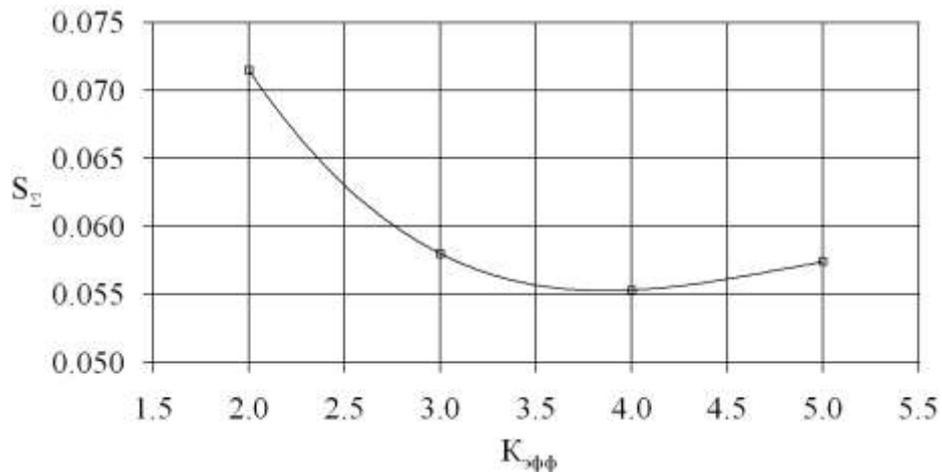
Эффективный коэффициент межъячейкового обмена определялся исходя из обеспечения минимального отклонения расчетных и экспериментальных значений локальных параметров для всей серии экспериментальных режимов. Для определения средней эффективной величины коэффициента межъячейкового обмена использовался метод наименьших квадратов. При этом для различных значений  $K_{\text{эфф}}$  рассчитывалась суммарная величина квадратов отклонения расчетных и экспериментальных значений температуры в ячейках для всей серии экспериментальных режимов:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{N_P - 1} \cdot \frac{1}{N_{\text{ТП}} - 1} \cdot \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{i=1}^{N_{\text{ТП}}} \left( \frac{t_i^{\text{расч}} - t_i^{\text{эксп}}}{\overline{\Delta t}_i} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $N_P$  – количество экспериментальных режимов;  $N_{\text{ТП}}$  – количество термопреобразователей, установленных в ячейках;  $t_i^{\text{расч}}$  – расчетное значение температуры;  $t_i^{\text{эксп}}$  – экспериментальное значение температуры;  $\overline{\Delta t}_i$  – средний подогрев теплоносителя в экспериментальной сборке.

Графическая зависимость  $S_{\Sigma} = f(K_{\text{эфф}})$  представлена на рис. 8.

Получено, что, по данным исследований на водяном теплофизическом стенде минимальная величина  $S_{\Sigma}$  имеет место при увеличении коэффициента межъячейкового обмена на длине пролета 510 мм в 3,8 раза по сравнению со значением, рассчитываемым по соотношению (3).



**Рис. 8. Зависимость суммарной величины квадратов отклонений от эффективного коэффициента обмена**

Этот результат подтверждается результатами исследований на аэродинамическом стенде с использованием *пропанового трассера*. Величина коэффициента межъячейкового обмена в ТВСА-Т на длине пролета 510 мм в 3,5-4,0 раза больше, чем в ТВСА.

Учитывая полученную по результатам статистического анализа погрешность расчета локальных температур теплоносителя по программе «КАНАЛ», для проведения теплогидравлических расчетов и обоснования теплотехнической надежности ТВСА-Т ВВЭР-1000 принята консервативная величина коэффициента межъячейкового обмена. Значение коэффициента межъячейкового обмена для ТВСА-Т с КДР на длине 510 мм принято в 3,0 раза большим, по сравнению со значением для пучков твэлов с ДР без смесительных элементов (коэффициент тепловой диффузии  $TDC=0,036$ ).

### **Анализ эффективности применения перемешивающих решеток в ТВСА-Т в реакторах ВВЭР-1000**

Конструкция ТВСА-Т с перемешивающими решетками была разработана с целью увеличения эффективности топливоиспользования, повышения показателей надежности, экономичности и технологичности при эксплуатации активных зон реакторов ВВЭР-1000.

Применение перемешивающих устройств позволяет обосновать эксплуатацию тепловыделяющих сборок с увеличенной ураноемкостью и улучшенными теплогидравлическими характеристиками при повышении мощности тепловыделения активных зон и увеличении предельной тепловой нагрузки на твэл.

В обоснование активных зон ВВЭР-1000 с ТВСА-Т, учитывая результаты экспериментальных исследований гидродинамики потока теплоносителя и кризиса теплоотдачи, проведен анализ условий охлаждения тепловыделяющих элементов в условиях эксплуатации топливных циклов с уменьшенной утечкой нейтронов.

Анализ теплотехнических характеристик активной зоны с ТВСА-Т выполнен с использованием расчетного кода «КАНАЛ». Расчетная область содержала все ячейки ТВСА-Т, включая уголки и межкассетные зазоры. Фрагмент схемы разбиения ТВСА-Т на расчетные ячейки приведен на рис. 9.

Основным критерием теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации является предотвращение кризиса теплоотдачи на поверхности наиболее «горячего» твэла с вероятностью не менее 95% при доверительном уровне 95%.

Расчет коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи проводился для предельных энерговыделений твэлов с учетом отклонений параметров и неопределенностей. Значение максимально допустимой линейной нагрузки на твэл составляло 448 Вт/см на высоте 50%

активной части твэла и 375 Вт/см на высоте 80% активной части твэла при максимально допустимой относительной мощности твэлов  $Kr = 1,63$ .

Данные значения линейных нагрузок и мощности твэлов соответствуют характерным значениям показателей неравномерности энергораспределения топливных загрузок перспективных топливных циклов (5·12 мес., 3·18 мес.).

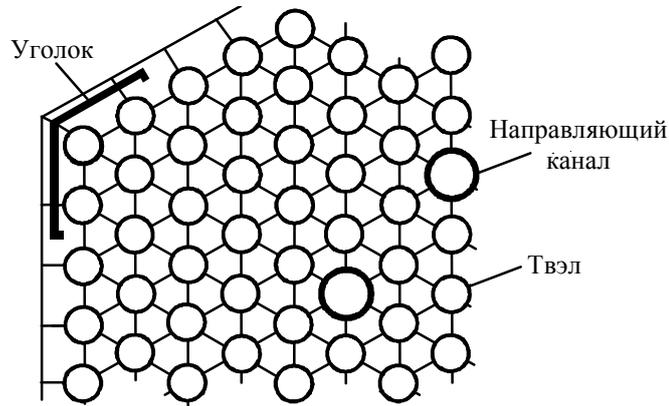


Рис. 9. Фрагмент схемы разбиения ТВСА-Т на расчетные ячейки

При расчете условий охлаждения твэлов в ТВСА-Т принималась во внимание неоднородность в размещении дефлекторов по сечению ПР: их отсутствие в ячейках вблизи НК, что приводит к перераспределению расходов таким образом, что условия охлаждения твэлов вблизи НК улучшаются, по сравнению со стандартными ячейками.

Таким образом, в отличие от ТВСА без перемешивающих устройств, где определяющими являются ячейки вблизи НК, для ТВСА-Т определяющими по запасу до кризиса теплоотдачи становятся стандартные ячейки.

Результаты расчета минимального коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи для активной зоны с ТВСА-Т применительно к характерным параметрам РУ ВВЭР-1000 с учетом отклонений параметров и неопределенностей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики активной зоны ВВЭР-1000 с ТВСА-Т

Характеристика	Значение
Тепловая мощность, МВт	3150
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	293,8
Давление, МПа	15,34
Средняя линейная нагрузка, Вт/см	156,3
Максимальная относительная мощность твэлов	1,63
Максимальная относительная мощность ТВСА-Т	1,45
Коэффициент гидравлического сопротивления ТВСА-Т	15,2
Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи	1,5

Минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи в стандартной ячейке реализуется для аксиального поля энерговыделения косинусоидального типа на высоте 65-80% от полной высоты активной части твэлов и составляет 1,5. Эта величина обосновывает надежное охлаждение твэлов при эксплуатации топливных загрузок с ТВСА-Т в режимах нормальной эксплуатации.

Сравнительный расчет эффективности применения перемешивающих решеток в составе ТВСА проведен на примере пределов активной зоны Core Thermal Limits – граничных значений параметров теплоносителя для защиты активной зоны от возникновения кризиса

теплоотдачи, устанавливающих максимально допустимые значения температуры на входе в активную зону в зависимости от уровня мощности тепловыделения активной зоны.

На рис. 10 для параметров РУ ВВЭР-1000 приведены две зависимости пределов активной зоны Core Thermal Limits: для ТВСА-Т с перемешивающими решетками и для ТВСА без перемешивающих решеток, рассчитанные в одинаковых условиях эксплуатации активной зоны. Линия  $T_s$  является ограничивающей по условию отсутствия объемного кипения теплоносителя в среднем по сечению активной зоны.

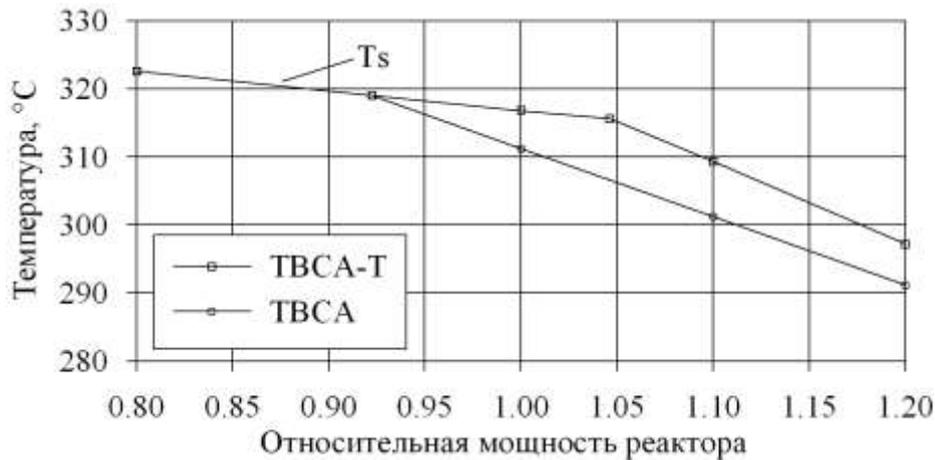


Рис. 10. Пределы активной зоны Core Thermal Limits

Как видно из рис. 10, для активной зоны из ТВСА-Т с перемешивающими решетками в оперативном диапазоне эксплуатационных параметров РУ ВВЭР-1000 выигрыш по мощности, по сравнению с активной зоной из ТВСА без перемешивающих решеток, составляет  $\approx 8\%$ . Это позволит обосновать безопасность эксплуатации активных зон с ТВСА-Т на повышенных уровнях мощности, в том числе и для перспективных реакторов ВВЭР-1200 (проектное значение тепловой мощности РУ ВВЭР-1200 составляет 107% от тепловой мощности РУ ВВЭР-1000).

Следует отметить, что применение перемешивающих решеток в ТВСА-Т также способствует улучшению условий охлаждения твэлов, по сравнению с ТВСА без перемешивающих решеток. Например, для натурных параметров РУ ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток доля поверхности твэлов с поверхностным кипением теплоносителя в напряженной ТВС сокращается на 10%. Уменьшение площади кипения теплоносителя на поверхности твэлов приводит к снижению толщины оксидной пленки на оболочке твэлов и имеет большое значение с точки зрения увеличения ресурса работоспособности топлива при достижении высоких значений выгорания.

### Выводы

Выполнен комплекс экспериментальных исследований для определения эффективности использования перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена и обоснования характеристик тепловыделяющей сборки ТВСА-Т. В результате проведенных исследований получено, что применение ПР позволяет существенно повысить критические тепловые нагрузки ТВСА-Т и улучшить условия охлаждения твэлов по сравнению с ТВСА без перемешивающих решеток.

Применение перемешивающих решеток в составе тепловыделяющей сборки ТВСА-Т решает задачу обоснования эксплуатации загрузок с увеличенной ураноемкостью в перспективных топливных циклах с уменьшенной утечкой нейтронов, характеризующихся увеличением предельной тепловой нагрузки на твэл.

Повышенные теплотехнические запасы активных зон из ТВСА-Т с решетками-интенсификаторами теплообмена позволяют увеличить допустимое энерговыделение твэлов и дают возможность эксплуатации активных зон на повышенных уровнях мощности с сохранением неравномерности энергораспределения.

Выполненные экспериментальные исследования и результаты теплогидравлических расчетов подтверждают надежное охлаждение твэлов в ТВСА-Т в условиях повышенных значений показателей неравномерности энергораспределения в активной зоне ВВЭР-1000.

#### Библиографический список

1. **Самойлов, О.Б.** Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2004. Вып. 2. С. 47–55.
2. **Фальков, А.А.** Расчетные и экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000 / А.А. Фальков [и др.] // WWER fuel performance, modeling and experimental support: сб. докладов 6-й международной конференции. Albena, Bulgaria. 2005.
3. **Самойлов, О.Б.** Технические характеристики и результаты эксплуатации ТВСА ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. трудов 5-й Международной научно-технической конференции. Подольск. 2007.
4. **Самойлов, О.Б.** Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование перемешивающих решеток-интенсификаторов для ТВСА ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов [и др.] // Теплофизика 2008: сб. тезисов докладов. Обнинск. 2008.
5. **Безруков, Ю.А.** Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Астахов, В.Г. Брантов // Теплоэнергетика. 1976. № 2. С. 80–82.
6. **Полянин, Л.Н.** Тепло- и массообмен в пучках стержней при продольном обтекании турбулентным потоком жидкости // Атомная энергия. 1969. Т. 26. Вып. 3.

*Дата поступления  
в редакцию 02.11.2010*

**S.M. Dmitriev, O.B. Samoylov, V.E. Lukyanov, O.N. Morozkin**

#### **ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING OF THE MIXING SPACER GRIDS IN ALTERNATIVE DESIGN FUEL ASSEMBLIES IN REACTORS VVER-1000**

The results of the experimental investigations of coolant mixing and departure from nucleate boiling in TVSA-T with combined spacer grids and mixing grids on aerodynamic and thermal test facilities are presented. As a result of the obtained experimental data, the determination of mixing coefficient was carried out and the CRT-1 correlation for the critical heat flux calculation was developed. The high efficiency of the using the combined spacer grids in TVSA-T in reactor VVER-1000 is shown.

*Key words:* alternative design fuel assembly, mixing spacer grids, mixing coefficient, departure from nucleate boiling, critical heat flux correlation.

УДК 536/662 99

Р.М. Лапшин

## О ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Показано существование ограничений по теплоотводу в зоне конденсации испарительных термосифонов, используемых в энергетике.

*Ключевые слова:* оптимальная доза заправки, противоточное течение конденсата и пара в охлаждаемых вертикальных трубах, режим «захлебывания».

Испарительные термосифоны находят применение в теплотехнике как надежные и простые аппараты транспортировки тепловой энергии. Особенности течения парожидкостной смеси в контурах естественной циркуляции испарительных термосифонов определяют наличие оптимальных и предельных режимов транспорта тепла и естественных ограничений на интенсивность теплопередачи. Это обусловлено геометрией контура циркуляции, величиной передаваемой мощности, степенью заполнения и взаимодействием потоков теплоносителя внутреннего объема аппарата, а также теплофизическими свойствами теплоносителя в состоянии насыщения.

Скорость движения среды в вертикальном торообразном контуре естественной циркуляции высотой  $h$  с плотностью жидкой среды на опускном участке  $\rho'$  и средним на подъёмном  $\rho_{см}$  зависит от геометрии контура, рода теплоносителя, его давления и интенсивности теплопередачи (рис. 1).

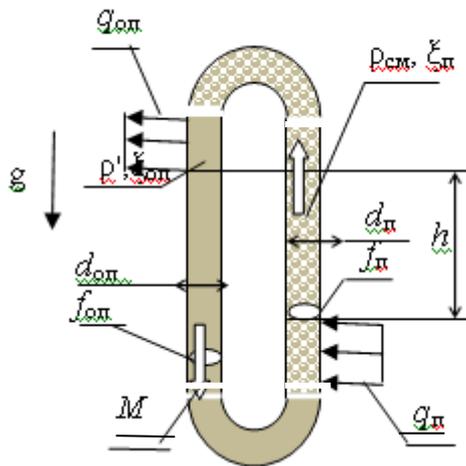


Рис. 1. Схема торообразного испарительного термосифона

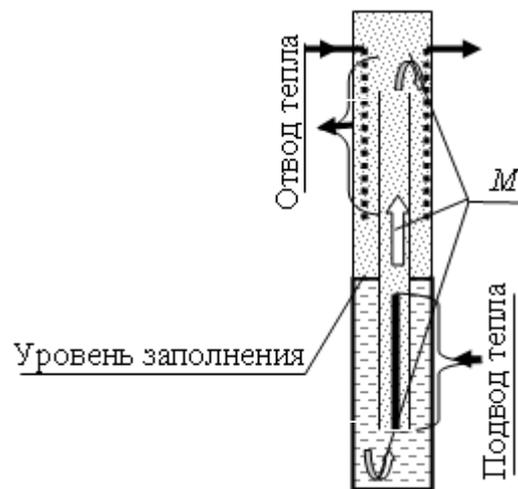


Рис. 2. Испарительный термосифон с циркуляционной вставкой

Исследователями контуров естественной циркуляции и испарительных термосифонов отмечено существование оптимальной величины дозы заправки, т.е. суммарной массы вещества, заполняющего термосифон  $m$ , при которой реализуется максимальная эффективность теплопереноса. В установившемся режиме движения в каждом сечении контура устанавливается массовый расход  $M$ , определяемый равенством движущего напора и суммарного гидравлического сопротивления опускного и подъёмного участков, характеризующихся коэффициентами трения  $\xi_{оп}$  и  $\xi_{п}$ :

$$h g(\rho' - \rho_{см}) = 0,5 h M^2 [(\xi_{оп}/d_{оп} f_{оп}^2) + (\xi_{п}/d_{п} f_{п}^2)], \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $d, f$  – диаметр и площадь проходного сечения опускающего и подъёмного участков.

Учитывая возможное превышение длин участков над величиной  $h$  и потери напора на местных сопротивлениях, в том числе в зонах испарения и конденсации, суммарные коэффициенты сопротивления можно записать в виде:

$$\xi_{оп} = (\lambda_{оп} l_{оп}/h) + \xi_{моп} d_{оп}/h, \quad (2)$$

$$\xi_{п} = (\lambda_{п} l_{п}/h) + \xi_{мп} d_{п}/h, \quad (3)$$

где первые слагаемые определяют потери на трение, а вторые – суммарные местные потери опускающего и подъёмного участков.

Автомодельность течения, приблизительная одинаковость степени шероховатости внутренней поверхности стенок каналов опускающего и подъёмного участков позволяют положить равными коэффициенты трения  $\lambda_{оп}$  и  $\lambda_{п}$ .

При относительно высоком контуре циркуляции и минимизации местных потерь на длинах опускающего и подъёмного участков  $l_{оп}$  и  $l_{п}$  можно без особой погрешности положить  $\xi_{оп} = \xi_{п} = \xi$ , что приводит к простому выражению для скорости жидкости в опускающем участке:

$$W_0^2 = (M/\rho' f_{оп})^2 = 2gd_{оп}[(\rho_{см}/\rho') - (\rho_{см}/\rho')^2]/\xi[(\rho_{см}/\rho') + d_{оп} f_{оп}^2/d_{п} f_{п}^2]. \quad (4)$$

Таким образом, величина скорости циркуляции, характеризующая интенсивность процесса переноса тепла, определяется геометрией трассы и отношением плотностей теплоносителя на опускающем и подъёмном участке трассы. Структура отношения (4) показывает, что  $W_0$  стремится к нулю в двух случаях:

- при  $\rho_{см} \approx 0$ , т.е. когда в подъёмном участке существует только пар;
- $\rho_{см} \approx \rho'$ , т.е. когда паросодержание в подъёмном участке невелико.

Это указывает на наличие максимума функции (4), причём экстремальное значение  $\rho_{см}/\rho'$  зависит от геометрических параметров контура циркуляции. Анализ функции (4) на экстремум даёт оптимальное значение отношения плотностей:

$$(\rho_{см}/\rho')_{опт} = (c^2 + c)^{0,5} - c, \quad (5)$$

где

$$c = d_{оп} f_{оп}^2 / d_{п} f_{п}^2.$$

Для вычисления оптимальной дозы заправки, т.е. суммарной массы вещества, заполняющего термосифон  $m^*$ , соответствующей условию (5), введём в рассмотрение объёмы участка испарения  $V_{и}$ , конденсации  $V_{к}$ , течения конденсата  $V_{ж}$  и течения парожидкостной смеси  $V_{см}$ . Полагая при этом, что плотность среды в объёмах  $V_{и} - \rho_{и}$  и  $V_{к} - \rho_{к}$  определена как среднеарифметическое, т.е. в виде

$$\rho_{и} \approx \rho_{к} \approx 0,5 \rho'(1 + \rho_{см}/\rho'),$$

можно получить расчётное соотношение

$$m = \rho' \{ V_{ж} + 0,5(V_{и} + V_{к}) - (\rho_{см}/\rho') [c - (c^2 + c)^{0,5}] \}. \quad (6)$$

В выражении (6) величина  $m^*$  для определенного вида теплоносителя определяется рабочим давлением, т.е. температурным режимом в контуре циркуляции, и конструктивно заданными геометрическими параметрами контура, что позволяет рационально спроектировать испарительный термосифон.

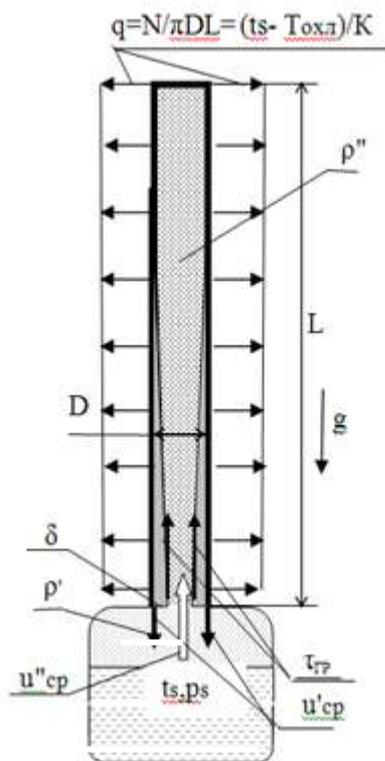
Существование оптимальной дозы заправки имеет место и в термосифонах, выполненных по схеме (рис. 2). В экспериментах с термосифоном высотой 4 м с прозрачным корпусом диаметра 0,12 м наблюдалось снижение давления пароводяной смеси при рабочем объеме, заполненном в соответствии с  $m^*$ . В случае превышения дозы заправки  $m^*$  наблюдалось вытеснение избыточной воды в верхнюю часть корпуса.

Системы теплоотвода ЯЭУ могут оснащаться вертикальнотрубными конденсаторами в виде пучка охлаждаемых снаружи и заглушенных сверху трубок, внутрь которых снизу поступает насыщенный пар. Конденсат плотностью  $\rho'$  образуется на внутренней поверхности

трубки длиной  $L$  и внутренним диаметром  $D$  при воздействии на нее хладагентом температуры  $T_{\text{охл}}$ . Отвод тепловой мощности  $N$  через стенку трубки от конденсирующегося пара при давлении и температуре насыщения  $p_s$  и  $t_s$  характеризуется средней по длине плотностью теплового потока:

$$q = N/\pi DL = (t_s - T_{\text{охл}})/R. \quad (7)$$

Среднее термическое сопротивление  $R$  складывается из термического сопротивления твердой стенки, термического сопротивления теплоотдачи от стенки к хладагенту и термического сопротивления теплопередачи через пленку конденсата, стекающего внутри трубки к входному сечению (рис. 3). Последнее определяется геометрией и характеристикой течения пленки, т.е. гидродинамической обстановкой на входе в охлаждаемую трубку, описываемой распределением скоростей жидкого конденсата  $u'(y)$  по толщине  $\delta$ , формирующейся во входном сечении каждой трубки (рис. 4).



**Рис. 3.** Схема испарительного термосифона с подъемным движением пара и опускным течением конденсата в заглушенной сверху трубке

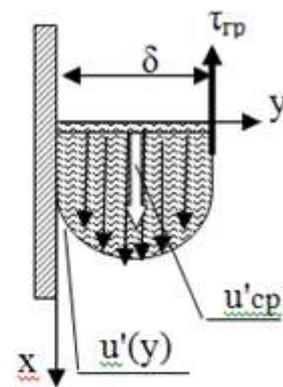
Приводимые в РТМ 108.031.05-81 карты режимов работы устройства включают режим «захлебывания» при подъемном течении пара и опускном конденсата в поле сил тяжести  $g$ . Такой режим обусловлен динамическим воздействием потока пара плотностью  $\rho''$  со средней по сечению трубки скоростью  $u''_{\text{cp}}$  на поверхность пленки конденсата. Это воздействие определяется величиной касательного напряжения трения  $\tau_{\text{гр}}$ :

$$\tau_{\text{гр}} = 0,125 \lambda \rho'' (u''_{\text{cp}})^2, \quad (8)$$

где  $\lambda$  - коэффициент трения.

Распределение скоростей жидкости  $u'(y)$  в начальной стадии процесса «захлебывания» соответствует равенству:

$$u'(y) = 0 \text{ при } y = 0 \text{ и при } y = \delta. \quad (9)$$



**Рис. 4.** Распределение скоростей жидкости по горизонтальному сечению пленки стекающего конденсата в начале процесса «захлебывания»

В установившемся режиме величины средних скоростей течения конденсата  $u'_{cp}$  и  $u''_{cp}$  обеспечивают равенство массовых расходов пара и конденсата:

$$\pi D \delta \rho' u'_{cp} = 0,25 \pi D^2 \rho'' u''_{cp} \quad (10)$$

при выполнении граничных условий (3).

Уравнение движения жидкости при стационарном течении пленки, малости сил инерции, по сравнению с силами тяжести и вязкости, а также постоянстве теплофизических параметров, включая кинематическую вязкость  $\nu$ , имеет вид [1]

$$g(\rho' - \rho'') + \nu' \rho' [d^2 u'(y) dy^2] = 0, \quad (11)$$

где  $u'(y)$  – зависящая от поперечной координаты  $y$  вертикальная компонента скорости течения вязкой жидкости в плёнке конденсата толщиной  $\delta$ . Последовательное интегрирование (5) приводит

$$\begin{aligned} du'(y)/dy &= -y(1 - \rho''/\rho')g/\nu' + C_1, \\ u'(y) &= -y^2(1 - \rho''/\rho')g/2\nu' + C_1 y + C_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Постоянная интегрирования  $C_2 = 0$ , как это следует из (3), а  $C_1$  определяется равенством  $du'(y)/dy = -\tau_{ГР}/\rho' \nu$  при  $y = \delta$ :

$$C_1 = \delta(1 - \rho''/\rho')g/\nu' - \tau_{ГР}/\rho' \nu' = \delta(1 - \rho''/\rho')g/\nu' - 0,125 \lambda \rho'' (u''_{cp})^2 / \rho' \nu'. \quad (13)$$

С учетом изложенного:

$$u'(y) = (\delta y - y^2/2)(1 - \rho''/\rho')g/\nu' - y 0,125 \lambda (\rho''/\rho') (u''_{cp})^2/\nu', \quad (14)$$

а величина средней по толщине  $\delta$  скорости стекания конденсата:

$$u'_{cp} = \delta^2 (1 - \rho''/\rho')g/3 \nu' - \delta (0,125 \lambda (\rho''/\rho') (u''_{cp})^2/2 \nu') \quad (15)$$

Начальная стадия процесса «захлебывания» соответствует нулевой скорости опускного течения на поверхности пленки конденсата, т.е. равенству  $u'(y) = 0$ , при  $y = \delta$ , что реализуется при

$$\delta = 0,25 \lambda (\rho''/\rho') (u''_{cp})^2 / (1 - \rho''/\rho')g, \quad (16)$$

и, соответственно:

$$u'_{cp} = \delta [\delta (1 - \rho''/\rho')g/3 \nu' - 0,125 \lambda (\rho''/\rho') (u''_{cp})^2/2 \nu']. \quad (17)$$

Уравнение сохранения энергии рассматриваемого устройства записывается в виде равенства отводимой от трубки предельной тепловой мощности  $N_{кр}$  потоку тепла, вносимого через рассматриваемое входное сечение потоком насыщенного пара с теплотой парообразования  $r$ :

$$N_{кр} = 0,25 \pi D^2 r \rho'' u''_{cp}. \quad (18)$$

Эта мощность в соответствии с (1) определяет размеры трубы при ее охлаждении средой с температурой  $T_{охл}$ :

$$L_{кр} = RN_{кр} / \pi D (ts - T_{охл}). \quad (19)$$

При фиксированных  $D, R, ts, T_{охл}, r, \rho'', \rho', \nu, \lambda$  система уравнений (15)–(19) позволяет определить неизвестные  $N_{кр}, \delta, u''_{cp}, u'_{cp}$ , и  $L_{кр}$ , т.е. выполнять необходимые инженерные расчеты. На рис. 5 представлен результат расчета  $N_{кр}$  в соответствии с формулой:

$$N_{кр} = 0,715 \pi g^{0,4} D^{2,2} r \lambda^{-0,6} \nu^{0,2} (\rho'')^{0,6} (\rho' - \rho'')^{0,4}. \quad (20)$$

Аналогично выполняются расчеты для

$$\delta = 2,04 \lambda^{-0,2} D^{0,4} g^{-0,2} \nu^{0,4} [1 - \rho''/\rho']^{-0,2} [\rho''/\rho']^{0,2} \quad (21)$$

(график зависимости от  $ps$  – рис. 6),

$$u'_{cp} = 0,1225 D^{0,8} g^{0,6} \nu^{-0,2} \lambda^{-0,4} [1 - \rho''/\rho']^{0,6} [\rho''/\rho']^{0,4} \quad (22)$$

(график зависимости от  $ps$  – рис. 7),

$$u''_{cp} = 2,86 D^{0,2} g^{0,4} \nu^{0,2} [1 - \rho''/\rho']^{0,4} [\rho''/\rho']^{-0,4} \lambda^{-0,6} \quad (24)$$

(график зависимости от  $ps$  – рис. 8).

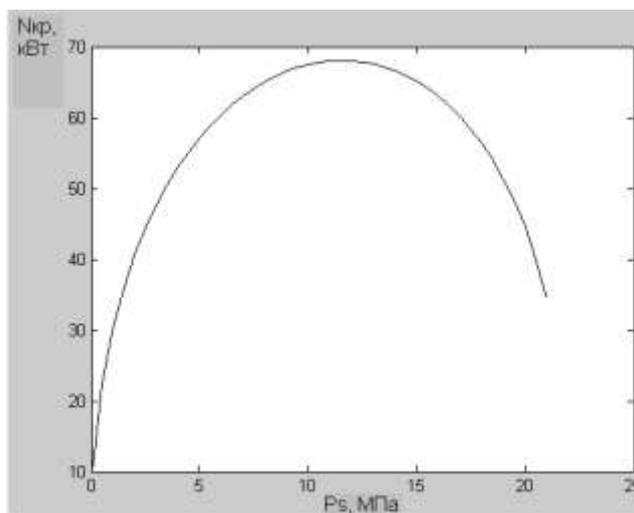


Рис. 5. Предельная мощность конденсации водяного пара для трубки внутреннего диаметра  $D=20$  мм при  $\lambda=0,03$

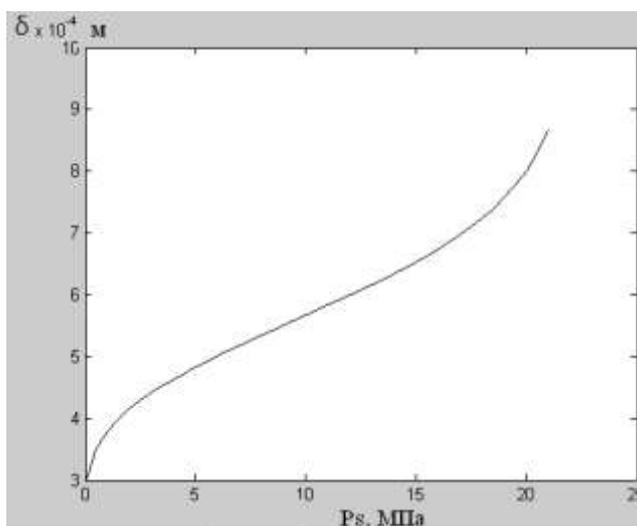


Рис. 6. Толщина пленки водного конденсата для трубки внутреннего диаметра  $D=20$  мм при  $\lambda=0,03$

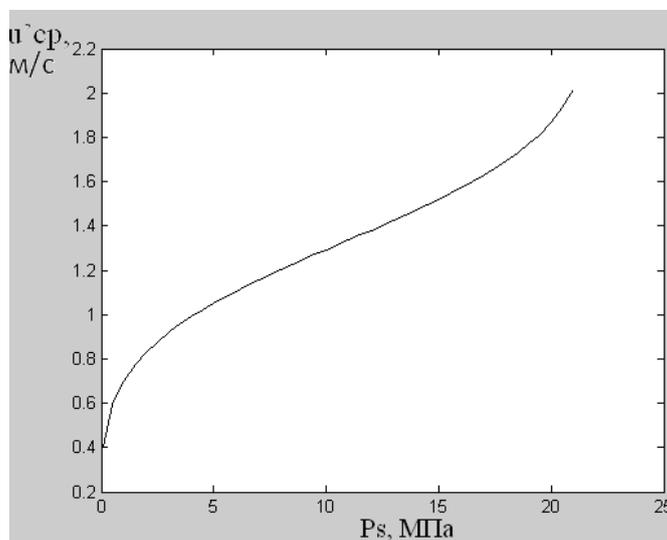
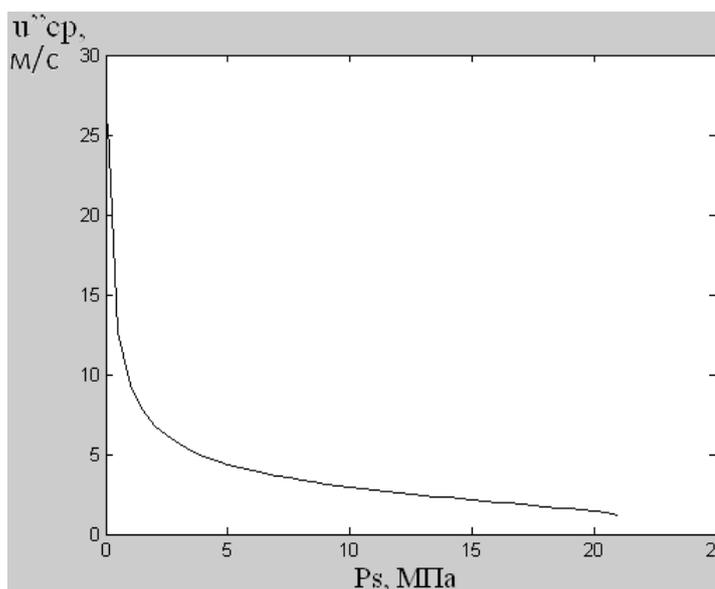


Рис. 7. Средняя скорость нисходящего течения водного конденсата из трубки внутреннего диаметра  $D=20$  мм при  $\lambda=0,03$



**Рис. 8. Средняя скорость подъемного течения водяного пара на входе в трубку внутреннего диаметра  $D=20$  мм при  $\lambda=0,03$**

Наличие оптимальных конструктивных и эксплуатационных характеристик в испарительных термосифонах позволяет усовершенствовать систему управления и регулирования, а так же геометрию их рабочего объема. Полученные результаты могут уточняться при экспериментальной отработке и эксплуатации.

1. **Исаченко, В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.11.2010*

**R.M. Lapshin**

### **ABOUT CRITICAL POWER EVAPORATIVE THERMOSYPHONES**

Analytical method showed the existence of optimal geometric characteristics or the contours a natural circulation and evaporative thermosyphons used in power generation.

*Key words:* flow of two – phase media, optimization dose filling, the countercurrent condensate and steam, flooding regime.

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.11.012

Р.И. Жирный<sup>1</sup>, В.А. Горелов<sup>2</sup>, Г.О. Котиев<sup>2</sup>

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОПОЕЗДА С ЖЕСТКОЙ И ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ МЕЖДУ ЗВЕНЬЯМИ

ООО «Газсеверинвест»<sup>1</sup>,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup>

Представлена математическая модель прямолинейного движения автопоезда по деформируемому грунту. Описаны модели взаимодействия между звеньями для случаев упругой и гибкой связи.

*Ключевые слова:* автопоезд, проходимость, сцепное устройство, буксование, тягово-энергетическая характеристика, математическая модель, имитационное моделирование, трансмиссия.

Большинство разрабатываемых месторождений нефти и газа находятся в труднодоступных районах Крайнего Севера, в условиях вечной мерзлоты и бездорожья, в связи с чем, доступ к ним весьма затруднён. Эти месторождения, в том числе и на п-ове Ямал, требуют обслуживания и доставки тяжёлых крупногабаритных и неделимых грузов. Большие перспективы для решения подобных транспортных задач имеет направление, связанное с применением многоосных большегрузных автопоездов.

В рамках совместных исследований кафедры «Колёсные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «Газсеверинвест» была создана транспортная система (рис. 1), прошедшая предварительные испытания на п-ове Ямал в апреле 2009 года.

Доказано, что в зависимости от характера связи между тягачом и прицепом автопоезд может иметь различные характеристики по проходимости. В связи с этим, необходимо на стадии проектирования решить задачу по прогнозированию характеристик прямолинейного движения автопоезда по бездорожью при буксировании прицепа движущимся тягачом с жесткой связью, буксировании прицепа движущимся тягачом с гибкой связью (односторонней на тресе), буксировании прицепа неподвижным тягачом с использованием лебёдки и анкерно-упорного устройства. Данная задача решается с помощью имитационного математического моделирования.

Вопросам взаимодействия эластичного колёсного движителя и деформируемого опорного основания посвящено достаточно много трудов как отечественных, так и зарубежных авторов. Прежде всего эти работы направлены на описание процесса взаимодействия колеса с грунтом в функции конструктивных параметров движителя и физико-механических свойств опорного основания. Следует отметить, что теория взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием в данном представлении весьма развита и позволяет описывать такие явления, как колеобразование, бульдозерный и экскавационный эффекты, уплотнение грунта и т.д. При таком подходе целью исследований является выбор оптимальных параметров конструкции колеса, как правило, по критериям максимального тягового усилия, минимизации затрат на движение и вредного воздействия на почву.



Буксировка прицепа на жестком дышле с использованием ВТС 6-6 УП-КМ1 "Полярник-Техник" (линейный тягач). Режим применяется при движении по автодорогам



Совместная буксировка прицепа ВТС "Полярник-Буксировщик" и ВТС "Полярник-Техник" на жестком дышле. Режим применяется при на участках маршрута с повышенным сопротивлением движению (переметы, заносы, заболоченные участки)

**Рис. 1. Транспортные системы**

Однако когда движитель уже создан и необходимо исследовать его возможности в составе колёсной машины, например, в случае оценки средней скорости движения на заданном маршруте, с целью решения задачи о рациональном распределении мощности по колёсам для оценки нагруженности элементов трансмиссии представляется целесообразным использовать характеристики тягово-сцепных свойств (рис. 3) и потерь энергии (рис. 2) для различных условий взаимодействия колеса с опорным основанием, полученные при экспериментальных исследованиях в грунтовом канале или на полигоне (рис. 4 – рис. 7).

Характеристиками процесса прямолинейного качения колеса в различных случаях движения являются удельные потери энергии  $f_w$  (потери энергии при качении на единицу пройденного колесом пути при единичной вертикальной нагрузке), удельная свободная тяга  $\varphi$  (продольная сила, приложенная к оси катящегося колеса, при единичной вертикальной

нагрузке на его ось), коэффициент буксования (юз)  $S_B = \frac{\omega_k r_{ko} - V_{xk}}{\omega_k r_{ko}} = 1 - \frac{r_k}{r_{ko}}$ ;  $r_k = \frac{V_{xk}}{\omega_k}$  [1],

где  $\omega_k$  - угловая скорость вращения колеса;  $r_{ko}$  - радиус колеса в свободном режиме;  $r_k$  - радиус качения колеса;  $V_{xk}$  - скорость центра масс колеса в продольном направлении.

Результаты испытаний представляются в виде тягово-энергетических  $f_w = f(\varphi)$  и тягово-сцепных характеристик  $\varphi = f(S_B)$ . Примеры экспериментальных характеристик, виды грунтового канала и экспериментальная установка представлены на рис. 2 – рис. 7 [1, 3].

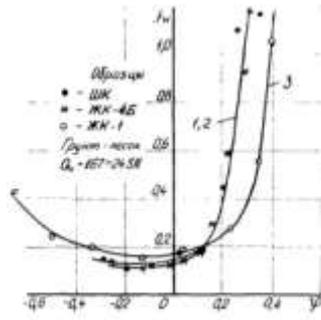


Рис. 2. Удельные потери энергии при качении модификаций колеса

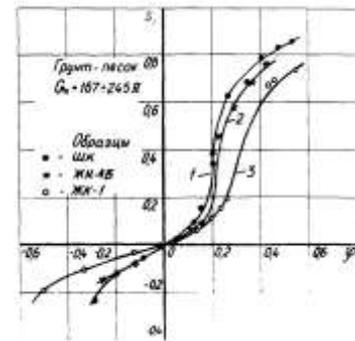


Рис. 3. Тягово-сцепные характеристики модификаций колеса



Рис. 4. Цилиндрическая модификация колеса

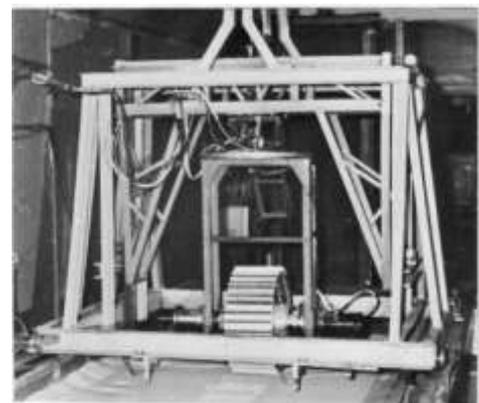


Рис. 5. Образец в грунтовом канале



а



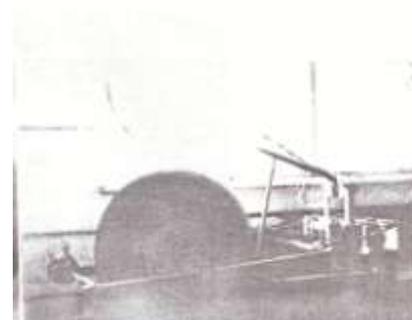
б

Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки для исследования взаимодействия с грунтом крупногабаритного пневматического колеса при нагрузке 100-250 кН:

а – исследование ведомого колеса; б – опыты с ведущим колесом



а



б

Рис. 7. Экспериментальная лабораторная установка для исследования взаимодействия эластичных оболочек с очень слабыми пылевидными и мягко-текучими грунтами:

а – большой канал с пылевидным грунтом; б – малый канал с мягко-сыпучим грунтом

Методика проведения экспериментальных исследований с целью получения представленных характеристик опирается на уравнение энергетического баланса и подробно описывается в [2]. Построение математической модели движения автопоезда рассмотрим на примере трехосного тягача с возможностью реализации индивидуального, дифференциального и блокированного привода колёс и трехосного прицепа в ведомом режиме. Расчётная схема автопоезда, представленная на рис. 8, принята с учётом характера решаемой задачи и описывается соответствующими уравнениями движения для тягача (1) и прицепа (2).

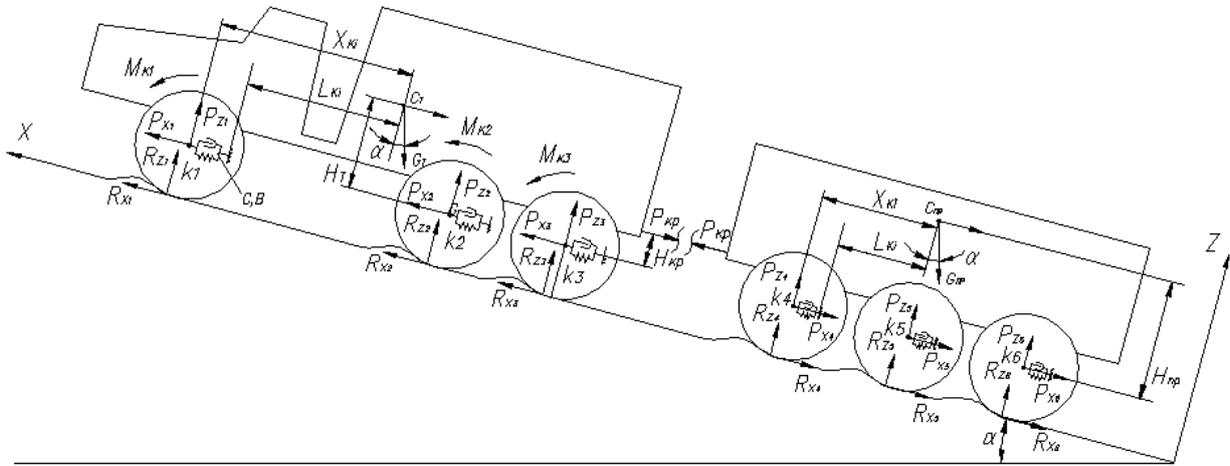


Рис. 8. Расчётная схема движения автопоезда

Для тягача

$$m_T \cdot \dot{V}_{X_T} = 2 \sum_{i=1}^3 P_{X_i} - m_T g \sin(\alpha) - P_{KP} \tag{1}$$

$$I_{k_i} \dot{\omega}_{k_i} = M_{K_i} - (1 - S_{B_i})(f_{w_i} + \varphi_i) R_{Z_i} r_{K_o}$$

$$m_{K_i} a_{X_{K_i}} = \varphi_i R_{Z_i} - P_{X_i} - m_{K_i} g \sin(\alpha),$$

Для прицепа

$$m_{ПП} \dot{V}_{X_{ПП}} = -2 \sum_{i=4}^6 P_{X_i} - m_{ПП} g \sin(\alpha) + P_{KP} \tag{2}$$

$$I_{k_i} \dot{\omega}_{k_i} = (1 - S_{B_i})(\varphi_i - f_{w_i}) R_{Z_i} r_{K_o}$$

$$m_{K_i} a_{X_{K_i}} = P_{X_i} - \varphi_i R_{Z_i} - m_{K_i} g \sin(\alpha),$$

где  $i = 1, \dots, 3$ ;  $m_T$ ,  $m_{ПП}$  - масса тягача и прицепа соответственно;  $m_{K_i}$  - масса колеса;  $I_{k_i}$  - момент инерции колеса;  $i$  - номер колеса;  $\dot{V}_{X_T}$ ,  $\dot{V}_{X_{ПП}}$  - продольное ускорение центра масс тягача и прицепа соответственно;  $\dot{\omega}_{k_i}$  - угловое ускорение  $i$ -го колеса;  $a_{X_{K_i}}$  - продольное ускорение центра масс  $i$ -го колеса;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\alpha$  - угол наклона опорной поверхности.

Связь тягача и прицепа реализуется через силу тяги на крюке  $P_{KP}$ . В случае моделирования упругого или жесткого взаимодействия звеньев сила на крюке определяется по зависимости

$$P_{KP} = (X_{CT} - X_{C_{ПП}})C + (V_{X_T} - V_{X_{ПП}})B, \tag{3}$$

где  $C$  - коэффициент жесткости сцепного устройства в продольном направлении;  $B$  - коэффициент демпфирования сцепного устройства в продольном направлении;  $X_{CT}$  - координаты центра масс тягача.

ната центра масс тягача по оси  $X$ ;  $X_{C_{ПР}}$  - координата центра масс прицепа по оси  $X$ ;  $V_{ХТ}$  - скорость центра масс тягача;  $V_{ХПР}$  - скорость центра масс прицепа.

Таким образом, изменяя коэффициенты жесткости и демпфирования узла сочленения, можно задавать различную связь между тягачом и прицепом.

Для случая соединения звеньев через гибкую связь характер изменения силы тяги на крюке  $P_{КР}$  в зависимости от растяжения троса  $\Delta l = X_{C_{Т}} - X_{C_{ПР}}$  определяется по зависимости (4) с учетом начальных координат положения центров масс звеньев:

$$P_{КР} = (\Delta l - L_0)C, \text{ при } \Delta l \leq 0, P_{КР} = 0, \tag{4}$$

где  $L_0$  - длина троса в недеформированном состоянии;  $\Delta l = (X_{C_{Т}} - X_{C_{ПР}} - L_0)$ .

Сила, действующая на корпус тягача со стороны колеса по оси  $X$

$$P_{X_i} = (X_{K_i} - L_{K_i})C_{\text{подв}} + (V_{X_{K_i}} - V_{X_C})B_{\text{подв}}, \tag{5}$$

где  $C_{\text{подв}}$  - коэффициент жесткости подвески в продольном направлении;  $B_{\text{подв}}$  - коэффициент демпфирования подвески в продольном направлении;  $X_{K_i}$  - расстояние от центра масс до оси колеса по оси  $X$ ;  $L_{K_i}$  - расстояние от центра масс до точки крепления подвески по оси  $X$ ;  $V_{X_C}$  - скорость центра масс автомобиля.

Сила, действующая на корпус прицепа со стороны колеса по оси  $X$

$$P_{X_i} = (L_{K_i} - X_{K_i})C_{\text{подв}} + (V_{X_C} - V_{X_{K_i}})B_{\text{подв}}. \tag{6}$$

Пусть удельная свободная сила тяги соответствует рис. 9 и определяется по зависимости

$$\varphi = \text{sign}(S_B) \cdot \varphi_{\text{max}} \cdot (1 - e^{\frac{-|S_B|}{S_0}}), \tag{7}$$

где  $\varphi_{\text{max}}$  - максимальное значение коэффициента силы сцепления колеса с опорной поверхностью;  $S_0$  - константа.

Удельные потери энергии при качении колеса (рис. 10)

$$f_{w_i} = f_{w_0} - K_f \log\left(1 - \frac{\varphi_i}{\varphi_{i\text{max}}(1 - e^{\frac{-1}{S_0}})}\right), \tag{8}$$

где  $f_{w_0}$  - коэффициент удельных энергетических потерь при отсутствии буксования в свободном режиме качения;  $K_f$  - коэффициент пропорциональности.

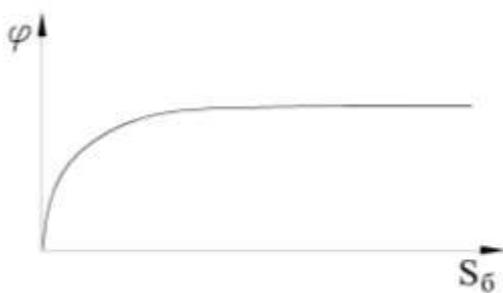


Рис. 9. Зависимость  $\varphi(S_B)$

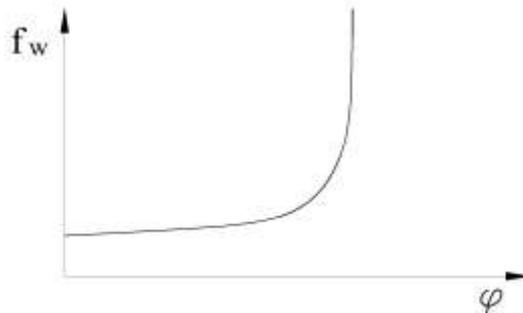


Рис. 10. Зависимость  $f_w = f(\varphi)$

Вертикальная реакция в пятне контакта колес тягача с опорной поверхностью определяется следующей зависимостью:

$$R_{Z_i} = P_{Z_i} + m_{K_i}g \cos(\alpha) \tag{9}$$

$P_{Zi}$  определяются из решения системы уравнений (9):

$$\begin{aligned} P_{Z1} + P_{Z2} + P_{Z3} &= m_C g \cos(\alpha), \\ P_{Z1}L_{K1} + P_{Z2}L_{K2} + P_{Z3} \cdot L_{K3} &= \sum M_{\text{ОТН}} \\ P_{Z1}(L_{K2} - L_{K3}) + P_{Z2}(L_{K3} - L_{K1}) + P_{Z3}(L_{K1} - L_{K2}) &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\sum M_{\text{ОТН}} = -(m_C \cdot a_x \cdot H_C + P_{кр} \cdot H_{кр} + M_{к(1)} + M_{к(2)} + M_{к(3)})$  - сумма крутящих моментов относительно проекции центра масс на линию, соединяющую оси колес;  $H_C$  - высота центра масс;  $H_{кр}$  - высота приложения силы тяги на крюке  $P_{кр}$ ;  $M_{к(i)}$  - крутящий момент, подводимый к соответствующей оси автомобиля.

При определении вертикальных реакций под колёсами прицепа используется такой же подход, как и для тягача, с учетом особенностей, отраженных в расчетной схеме.

Динамика трансмиссии рассмотрена на примере тягача с заблокированной раздачей мощности по колёсам каждого борта и описывается системой дифференциальных уравнений с учетом равенства угловых скоростей колес.

Разработанная математическая модель реализована в среде имитационного математического моделирования динамических систем Simulink программного комплекса Matlab. Схема включает три основных блока: *Tyagach*, в котором реализуется движение автомобиля-тягача (рис. 12), *Pritsep*, в котором реализуется движение прицепа, *Stsepka*, в котором реализуется связь между звеньями автопоезда через силу на крюке. Блок-схема модели представлена на рис. 11.

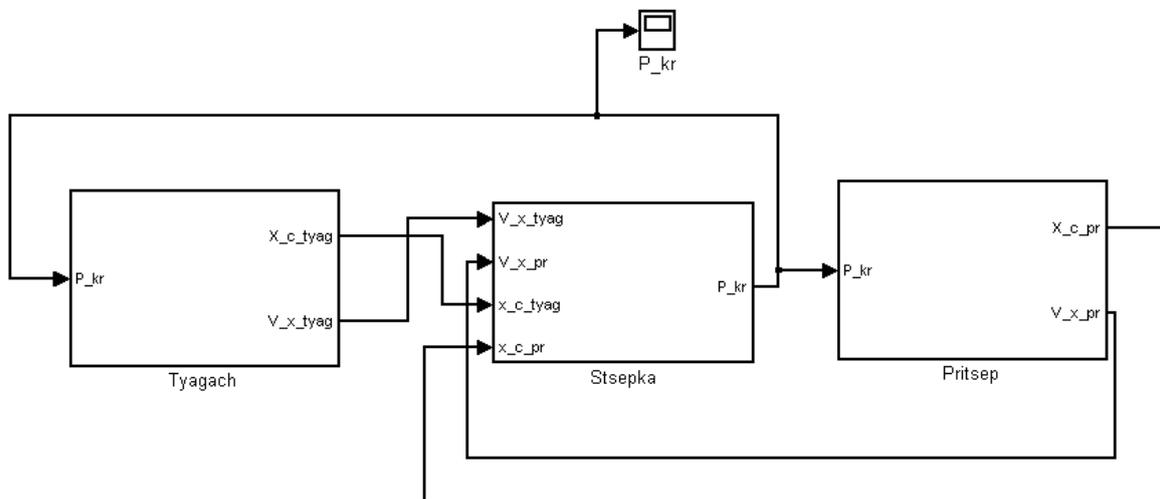


Рис. 11. Блок-схема математической модели

### Выводы

Проведенные предварительные теоретические исследования динамики автопоезда при различных упругих и демпфирующих характеристиках сцепного устройства позволили сделать следующие выводы. В том случае, когда параметры сцепного устройства  $C$  и  $B$  принимаются равными небольшим величинам, тягач «уезжает» от прицепа, скорость которого в определенный момент времени становится равной нулю. В противоположном случае, т.е. когда коэффициенты упругости и демпфирования достаточно велики, тягач оказывается неспособным выполнять транспортировку прицепа. Скорость обеих частей автопоезда в определенный момент равна нулю. При определенных значениях величин  $C$  и  $B$  оказалось возможным выполнить транспортировку тягачом прицепа при тех же массовых, геометрических и энергетических характеристиках. При начале движения за счёт имеющейся упругой связи тягач сначала разгоняется без приложения силы на крюке, а далее полученной инерции хватает для того, чтобы потянуть за собой прицеп.

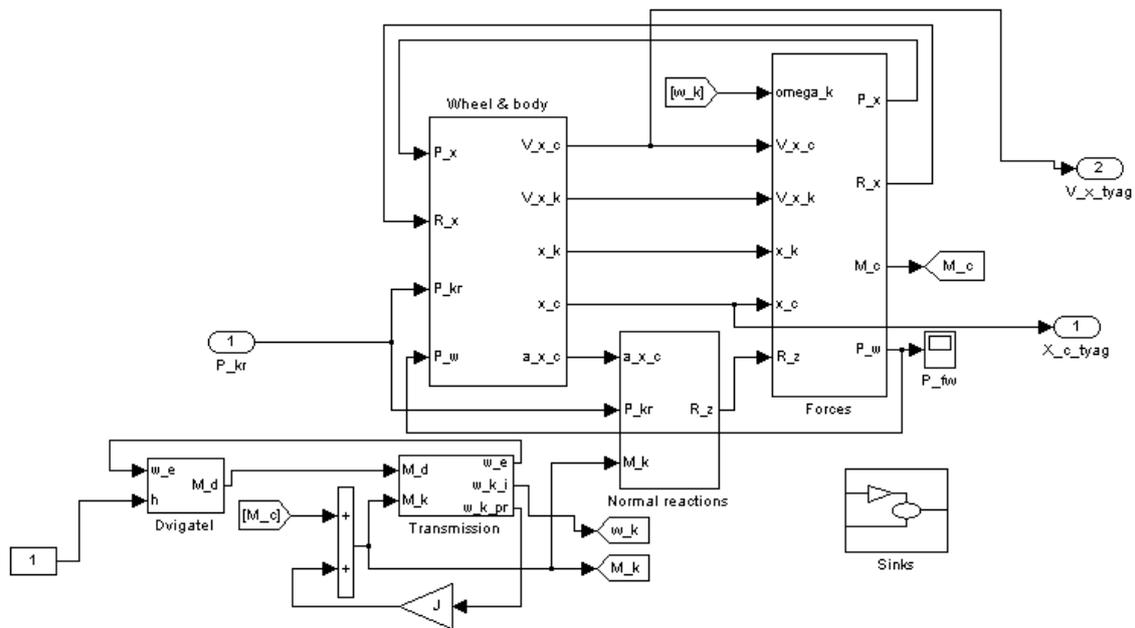


Рис. 12. Схема блока для расчета динамики автомобиля-тягача

На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что жесткость связи между звеньями оказывает существенное влияние на динамику автопоезда. Таким образом, сравнительная оценка возможностей автопоезда при различной связи между звеньями должна быть проведена ещё до натурных испытаний объекта. Результатом этих исследований являются рекомендации по выбору оптимальных параметров сцепного устройства для повышения уровня опорной проходимости.

#### Библиографический список

1. **Наумов, В.Н.** Математическая модель взаимодействия металлоупругого колеса с уплотняющимся грунтом / В.Н. Наумов, Ю.Л. Рождественский // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980. № 339. С. 84–111.
2. **Серебряный, И.В.** Повышение проходимости автомобиля за счёт рационального распределения потоков мощности по колёсам / И.В. Серебряный, Г.О. Котиев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Машиностроение, 2008. С. 193–201.
3. **Кошарный, Н.Ф.** Основы теории рабочего процесса и расчета движителей автомобилей высокой проходимости / Н.Ф. Кошарный: дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03. – Киев, 1978. – 467 с.

Дата поступления  
в редакцию 25.05.10.

R.I. Zhirnyu, V.A. Gorelov, G.O. Kotiev

#### MATHEMATICAL MODEL OF RECTILINEAR DYNAMICS OF THE ARTICULATED LORRY WITH ELASTIC AND FLEXIBLE CONNECTION BETWEEN SECTIONS

In article the mathematical model of rectilinear dynamics of the articulated lorry on a deformable ground is presented. Interaction models between sections for cases of elastic and flexible connection are described.

*Key words:* articulated lorry, passability, coupling, slip, traction-energy characteristic, mathematical model, simulation modeling, transmission.

УДК 629.113

А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов, И.О. Донато, В.А. Шапкин

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА КАК ПОЛОТНА ПУТИ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена проблемам заснеженного бездорожья. Рассмотрены общая схема и основания снежного покрова. Разработан метод, позволяющий по имеющимся характеристикам твердого основания и данным о средней высоте снега, определять поверхность снежного покрова и распределение высоты снега на предполагаемой трассе движения машины.

*Ключевые слова:* снежный покров, твердое основание, поверхность снега, метод расчета.

Полотном пути для машин, эксплуатируемых в зимний период, служит снежный покров в своем естественном состоянии либо в виде уплотненного укатанного слоя. В общем виде снежный покров можно представить как физическое тело [1], имеющее конечную глубину и ограниченное, с одной стороны, поверхностью снега, с другой, – подстилающей поверхностью (основанием снежного покрова) (рис. 1).

Формирование основания снежного покрова (микропрофиля пересеченной местности) происходит под воздействием большого числа факторов: естественной эрозии почвы, размыва талыми и дождевыми водами, естественных уклонов местности, состояния растительного покрова, состава грунта и т.д. Сами эти факторы носят достаточно случайный характер, поэтому и образующийся микропрофиль может быть выражен также случайной функцией.

Рассматривая грунтовые дороги можно отметить, что помимо всех перечисленных факторов на формирование микропрофиля этих дорог влияет еще и характер движения транспорта. Поэтому микропрофиль дорог этого типа отличается от микропрофиля пересеченной местности наличием неровностей, создаваемых транспортом при движении. Возмущение при движении по грунтовым дорогам также может рассматриваться как случайный процесс.

Микропрофиль бездорожья является поверхностью и, следовательно, зависит от двух параметров: длины и ширины.

Аналитически эту поверхность можно выразить следующим образом:

$$q = q(x, y), \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты некоторой средней плоскости, относительно которой изменяются высоты неровностей. При наличии ряда допущений (стационарность, эргодичность, нормальный закон распределения) любую трассу движения (рис. 2) можно представить в виде двух случайных функций: ординаты среднего сечения  $q$  и угла наклона поперечного сечения  $\psi$ , определяемых выражениями [1, 2]

$$q(x) = \frac{q_1(x) + q_2(x)}{2}. \quad (2)$$

где  $q_1(x), q_2(x)$  – функции микропрофиля сечений поверхности полотна пути правой и левой колеи соответственно;  $x$  – расстояние между двумя сечениями.

Тогда статистическими характеристиками поверхности полотна пути будут являться корреляционные функции

$$R_q(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x q(x)q(x+l)dx, \quad (3)$$

$$R_{\Psi}(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x} \int_{-x}^x \Psi(x) \Psi(x+l) dx. \quad (4)$$

Наиболее полные исследования микропрофиля пересеченной местности выполнены в отраслевой научно-исследовательской лаборатории бездорожных машин (ОНИЛВМ) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева (НГТУ). В соответствии с региональным обзором были выбраны следующие зоны: зона тундр и лесотундр с базой в г. Норильске; равнины лесной зоны с базой в г.Н.Новгороде и Пайде; зона степей и лесостепей с базой в г.Кургане; зона пустынь и полупустынь с базой в г. Нукус.

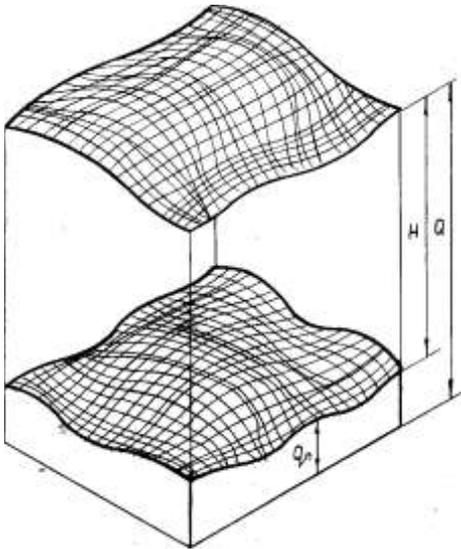


Рис. 1. Общая схема снежного покрова

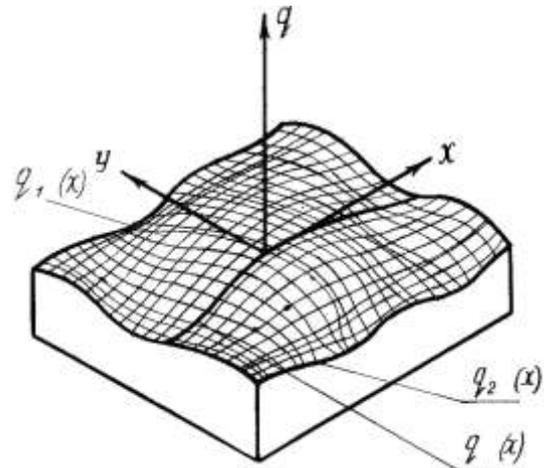


Рис. 2. Основание снежного покрова

В общей сложности было замерено около 200 участков общей протяженностью свыше 40 км. Для каждого участка были рассчитаны корреляционные функции, которые аппроксимировались выражениями типа

$$R_q(l) = \sum_{j=1}^n R_{qj}(0) e^{-\alpha_j l} \cos \beta_j l. \quad (5)$$

В результаты статистической обработки параметров корреляционных функций и их анализа предложены расчетные корреляционные функции микропрофиля бездорожья и грунтовых дорог (табл.1).

Очевидно, что поверхность снежного покрова носит случайный характер, поскольку твердое основание, на которое ложится снег, является случайной поверхностью, а формирование снежного покрова также происходит под влиянием различных случайных факторов. Характеристики самого снега являются функциями ряда независимых переменных: длины  $X$ , ширины  $Y$ , глубины  $H$ , плотности  $\rho$  и т.д. Тогда получим общее представление о снежном покрове как о случайном  $n$ -мерном поле, заданном на  $m$ -мерном пространстве. Приведенная модель математически наглядна, но неудобна для построения теории и использования в расчетах. Более удачным в этом случае является представление снежного покрова как физического тела, имеющего случайные поверхности и глубину (рис. 1) [1, 3]. Тогда он может быть описан с помощью аппарата теории случайных функций как двумерный случайный вектор двух независимых переменных  $X$  и  $Y$ , т.е. как случайное векторное поле.

Выделим следующие компоненты снежного покрова: рельеф снежного полотна пути, т.е. его поверхность; профиль снежного полотна пути, т.е. сечение рельефа по трассе движения; рельеф твердого основания местности; профиль твердого основания по трассе движе-

ния. Введем координату пути  $l$ , пройденного по трассе движения, координату профиля снежного полотна пути  $Q$  и координату профиля твердого основания  $q_n$ , отсчитываемые от единого условно взятого уровня, глубину снежного покрова  $H$ . Тогда все три обозначенные величины  $Q$ ,  $q_n$  и  $H$  будут функциями одного аргумента  $l$ .

Рассмотрим вертикальное сечение снежного покрова, представленного на рис. 3. Глубина снежного покрова  $H$  определится через ординаты  $Q$  и  $q_n$ :

$$H = Q - q_n,$$

где  $Q$ ,  $q_n$ ,  $H$  - случайные стационарные функции аргумента  $l$ .

Математическое ожидание этой функции  $M_H$  в предположении совпадения начала отсчета с математическим ожиданием твердого основания, т.е.  $M_{q_n} = 0$  совпадает с математическим ожиданием  $Q$ , т.е.  $M_H = M_Q$  и по вероятностному смыслу является средней глубиной снежного покрова.

Корреляционная функция глубины снежного покрова  $R_H(l)$ , согласно положениям теории случайных функций, определится зависимостью

$$R_H(l) = R_Q(l) + R_{q_n}(l) - R_{Qq}(l) - R_{qQ}(l), \quad (6)$$

где  $R_Q(l)$  - корреляционная функция микропрофиля снежного покрова;  $R_{q_n}(l)$  - корреляционная функция микропрофиля твердого основания;  $R_{Qq}(l)$ ,  $R_{qQ}(l)$  - взаимные корреляционные функции. Если эти функции четные, то  $R_{Qq}(l) = R_{qQ}(l)$  и  $R_H(l) = R_Q(l) + R_{q_n}(l) - 2R_{Qq}(l)$ .

Дисперсия глубины снежного покрова  $D_H$  определится из соотношения

$$D_H = D_Q + D_{q_n} - 2R_{Qq}(0).$$

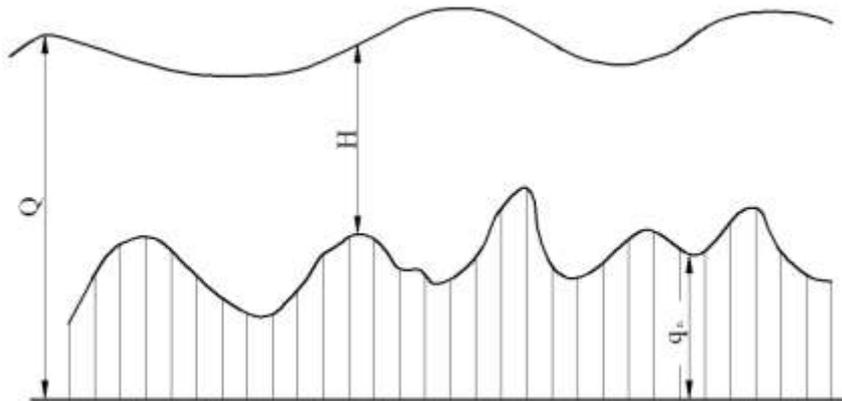


Рис. 3. Вертикальное сечение снежного покрова

Проведенные замеры и их дальнейший анализ показал, что при малых значениях высоты снега ( $M_H$ ), функции  $Q$  и  $q_n$  будут сильно стохастически связаны. Это означает, что поверхность снежного покрова будет практически повторять поверхность твердого основания, фильтруя высокочастотные составляющие и несколько уменьшая дисперсию. При значениях  $M_H$  порядка 80 ÷ 90 см  $Q$  и  $q_n$  практически независимы. Для всех участков непосредственно по реализациям определялись спектральные плотности твердого основания и снежного покрова.

## Расчетные корреляционные функции

Виды полотно пути	Частота			
	Инфранизкая	Низкая	Средняя	Высокая
Местность ровная	$12 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$5,76 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$5,2 e^{0,2l} \cos 0,6l$ $4,3 e^{-0,3l} \cos 0,8l$ $4 e^{0,40l} \cos 1,0l$	$1,69 e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $2,4 e^{-11,5l} \cos 3,0l$
Местность малопересеченная	$4,2 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$67 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$25 e^{-0,20l} \cos 0,6l$ $25 e^{-0,30l} \cos 0,8l$ $16 e^{-0,40l} \cos 1,0l$	$16 e^{-0,85l} \cos 2,0l$ $11 e^{-1,15l} \cos 3,0l$
Местность среднeperесеченная	$184 e^{-0,09l} \cos 0,26l$	$80 e^{-0,12l} \cos 0,4l$	$54 e^{-0,25l} \cos 0,8l$	
Местность сильнопересеченная	$245 e^{-0,21l} \cos 0,26l$	$289 e^{-0,13l} \cos 0,36l$		
Валы	$760 e^{-0,13l} \cos 0,18l$	$760 e^{-0,16l} \cos 0,40l$		
Кочки				$64 e^{-3,4l} \cos 8,0l$
Дороги ровные	$12 e^{-0,09l} \cos 0,24l$	$3 e^{-0,12l} \cos 0,4l$		$2,5 e^{-0,65l} \cos 1,8l$ $1,0 e^{-1,60l} \cos 3,2l$
Дороги разбитые	$140 e^{-0,12l} \cos 0,24l$	$30 e^{-0,10l} \cos 0,4l$	$40 e^{-0,20l} \cos 0,6l$ $50 e^{-0,40l} \cos 0,8l$ $27 e^{-0,55l} \cos 1,0l$	$25 e^{-0,65l} \cos 1,8l$

Чтобы получить поверхность снежного покрова и распределение высоты снега, из спектра твердого основания (подстилающей поверхности) удаляли частоты, начиная с некоторой  $\omega_b$  и заканчивая  $\omega_k - \omega_b$  ( $k$  - количество отсчетов дискретной функции). Затем по полученному спектру при помощи обратного преобразования Фурье восстанавливалась функция, которая и являлась теоретической (расчетной) поверхностью снежного покрова. Для того, чтобы полученная расчетным путем поверхность снежного покрова  $Q(m)$  сходилась к реальной поверхности, очевидно, необходимо минимизировать зависимость

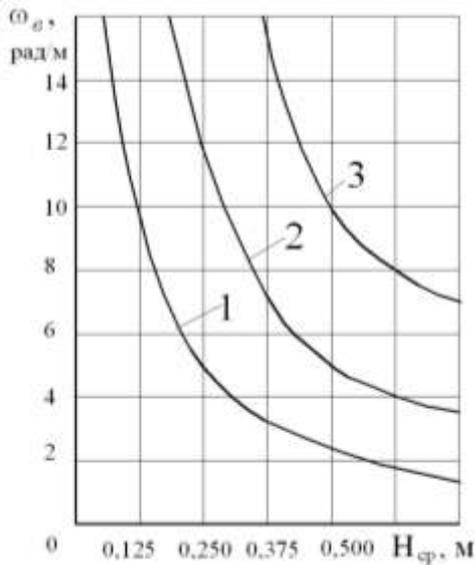
$$\varepsilon(\omega_b) = \xi(N_b) = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{N-1} Q(m) - \bar{Q}(m)}{\sum_{m=0}^{N-1} Q^2(m)}}$$

где  $N_b = \frac{\omega_b}{\Delta\omega}$ ;  $\varepsilon(\omega_b)$ ;  $\xi(N_b)$  – относительная среднеквадратическая ошибка;  $\omega_b$  ( $N_b$ ) – частота (точка) среза спектра;  $\Delta\omega$  – шаг спектра по частоте.

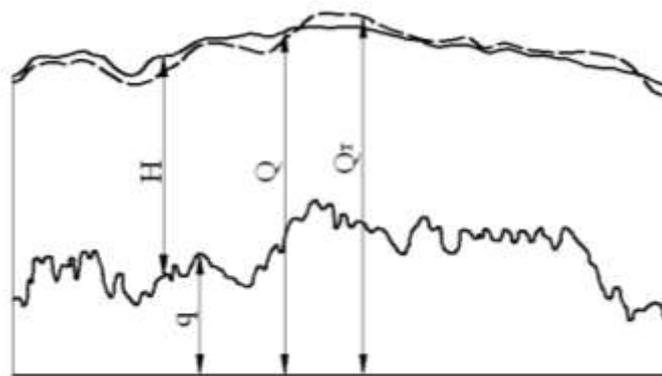
$$\left. \begin{aligned} Q(m) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Q(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} \\ \bar{Q}(m) &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} q_n(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N-N_b+2}^{N-1} q_n(k) e^{j \frac{2\pi}{N} km} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\xi(N_b) = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{N-1} \left[ \sum_{k=0}^{N_b-1} N(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N-N_b+2}^{N-1} H(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} + \sum_{k=N_b}^{N-N_b+1} Q(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} \right]^2}{\sum_{m=0}^{N-1} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} Q(k) e^{j\frac{2\pi}{N} km} \right]^2}},$$

где  $H(k) = Q(k) - q_n(k)$ ,  $q_n(k)$ ;  $Q(k)$  – спектры подстилающей поверхности и снежного покрова соответственно;  $k, m$  – дискретные аргументы.



**Рис.4. Зависимость частоты от средней высоты снега:**  
 1 - малопересеченная местность;  
 2 - среднепересеченная местность;  
 3 - сильнопересеченная местность



**Рис. 5. Расчетная и реальная поверхности снежного покрова**

Приведенное выражение показывает, что поверхность снежного покрова, полученная расчетным путем, будет тем точнее повторять реальную, чем меньше разность между значениями комплексных амплитуд на частотах от 0 до  $\omega_b$  и чем меньше комплексные амплитуды на частотах, выше  $\omega_b$ . Были определены частоты  $\omega_b$ , при которых  $\varepsilon(\omega_b)$  минимальна и получена зависимость частоты  $\omega_b$  от средней высоты снежного покрова. На рис. 4 показана зависимость минимальной частоты неровностей, которые сглаживаются снегом, от средней высоты снежного покрова. Из рис. 4 видно, что с увеличением средней высоты снега частота  $\omega_b$  уменьшается, т.е. неровности длиной до  $l_b$  ( $l_b = 2\pi/\omega_b$ ) сглаживаются снегом данной средней высоты.

В целом методика расчета включает в себя следующие основные этапы. В качестве исходных данных вводится микропрофиль твердого основания. При помощи быстрого преобразования Фурье [4] определяется спектр твердого основания. Задается средняя высота снега, по ней определяется  $\omega_b$  и при помощи обратного преобразования Фурье строится поверхность снежного покрова.

С целью проверки разработанной методики в летний период были проведены замеры микропрофиля бездорожья. Зимой на тех же участках замерялась поверхность снежного покрова. Обработка результатов замеров и дальнейший анализ показали, что поверхности снежного покрова, построенные расчетным путем, близки к реальным, значения среднеквадратической ошибки не превышали  $5 \div 7\%$  (рис. 5).

Таким образом, разработан метод, позволяющий по имеющимся характеристикам твердого основания (подстилающей поверхности) и данным о средней высоте снега в конкретном районе, определять поверхность снежного покрова и распределение высоты снега на предполагаемой трассе движения машины.

#### **Библиографический список**

1. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
2. **Пархиловский, И.Г.** Исследование вероятностных характеристик поверхностей распространенных типов дорог // Автомобильная промышленность. 1968. №8. С. 18–22.
3. **Аникин, А.А.** Проходимость гусеничных машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов, И.О. Донато. – Н. Новгород: Изд-во «Омега», 2009. – 362 с.
4. **Джекинс, Г.** Спектральный анализ и его приложения / Г. Джекинс, Д. Ваттс. – М.: Мир, 1971. – 316 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.06.2010*

**A.A. Anikin, L.V. Barakhtanov, I.O. Donato, V.A. Shapkin**

#### **GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SNOW COVER AS CLOTHS OF THE WAY FOR MOVEMENT OF MACHINES**

The article is devoted to snow off-road problems. Are considered the general scheme and the bases of a snow cover. The method is developed, allowing to define a surface of a snow cover and distribution of height of a snow on a prospective line of movement of the machine.

*Key words:* a snow cover, the firm basis, a surface of a snow, a method of calculation.

УДК 629.113

В.И. Котляренко<sup>1</sup>, С.Е. Манянин<sup>2</sup>, И.А. Соколов<sup>2</sup>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Московский государственный технический университет (МАМИ)<sup>1</sup>,  
ООО «ТрансМаш»<sup>2</sup>

Разработана математическая модель колесного транспортного средства. Рассмотрены методы описания возмущающего воздействия со стороны дорог при помощи вероятностных характеристик микропрофиля и на основе данных, описывающих действительный микропрофиль опорных поверхностей на конкретных маршрутах движения. Построена математическая модель взаимодействия колесной машины с грунтом.

*Ключевые слова:* динамическая система транспортного средства, математическое описание движения, микропрофиль, взаимодействие колесной машины с грунтом.

При описании динамики транспортного средства (ТС) сформулированы следующие основные принципы их математического моделирования:

- принцип комплексности, отражающий необходимость построения математической модели таким образом, чтобы задачи динамического исследования решались с учетом всех значимых характеристик элементов, систем и процессов, влияющих на динамическую систему;
- принцип модульности, позволяющий разбивать динамическую систему на отдельные модули (силовой агрегат, трансмиссия, подвеска, движители) и разрабатывать математические модели для каждого модуля отдельно;
- принцип взаимосвязи, отражающий необходимость учитывать взаимное влияние основных подсистем, входящих в модули, и самих модулей друг на друга: чем больше связность между частными математическими моделями подсистем машины, тем должно быть важнее соединение именно этих подсистем и подробнее их математическое описание;
- принцип задающих воздействий, отражающий необходимость задания и математического описания основных управляющих (оператор, антиблокировочные и противобуксовочные системы и т.п.) и возмущающих воздействий со стороны внешней среды;
- принцип соответствия частотных диапазонов, отражающий соответствие степени детализации расчетной схемы диапазону определяющих возмущающих факторов;
- принцип истинной координаты, величину или значение которой можно непосредственно измерить или получить расчетным путем без использования понятия «приведенная координата».

Последний принцип обеспечивает равные возможности исследования динамической системы машины как при расчетах, так и при натурных испытаниях, с сохранением адекватности при сравнении полученных результатов.

Особенностью модели является то, что в ней внешние и внутренние кинематические и силовые характеристики формируются в микроподвижной системе, то есть задаются от колеса. Это позволяет учитывать одновременно продольно-угловые и поперечно-угловые колебания, буксование колеса, более точно отслеживать воздействие со стороны дороги и т.п. Другой особенностью модели является наличие нескольких систем координат (рис. 1), что объясняется структурой и формой уравнения движения ТС. Положение ТС и его систем в пространстве в любой момент времени определяется взаимным расположением следующих систем координат: подвижной (ПСК) –  $O_c, X_c, Y_c, Z_c$ ; неподвижной (НСК) –  $O_H, X_H, Y_H, Z_H$  и микроподвижной (МСК) –  $O_M, X_M, Y_M, Z_M$ .

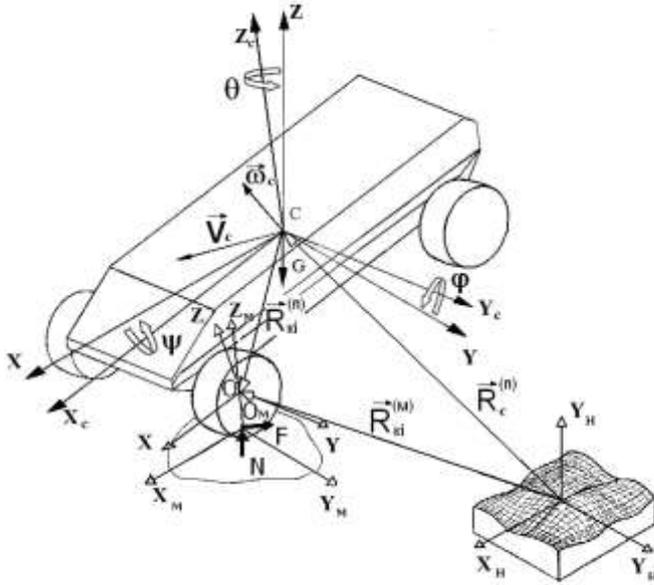


Рис. 1. Модель движения ТС по опорной поверхности

Систему дифференциальных уравнений, описывающих движение ТС, можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 m\dot{V}_{cx} + m(\omega_y V_{cz} - \omega_z V_{cy}) &= G_x + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (N_{ij}^x + F_{ij}^x), \\
 m\dot{V}_{cy} + m(\omega_z V_{cx} - \omega_x V_{cz}) &= G_y + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (N_{ij}^y + F_{ij}^y), \\
 m\dot{V}_{cz} + m(\omega_x V_{cy} - \omega_y V_{cx}) &= G_z + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 (N_{ij}^z + F_{ij}^z), \\
 I_x \dot{\omega}_x + \omega_y \omega_z (I_z - I_y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 [(M_x(N_{ij}) + M_x(F_{ij}) + M_x(R_{fij})], \\
 I_y \dot{\omega}_y + \omega_z \omega_x (I_x - I_z) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 [(M_y(N_{ij}) + M_y(F_{ij}) + M_y(R_{fij})], \\
 I_z \dot{\omega}_z + \omega_x \omega_y (I_x - I_y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^2 [(M_z(N_{ij}) + M_z(F_{ij}) + M_z(R_{fij})],
 \end{aligned} \tag{1}$$

- где  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции вектора угловой скорости ТС на оси ПСК;  
 $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  – проекции вектора углового ускорения ТС на оси ПСК;  
 $V_x, V_y, V_z$  – проекции вектора линейной скорости ТС на оси ПСК;  
 $\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z$  – проекции вектора линейного ускорения ТС на оси ПСК;  
 $G_x, G_y, G_z$  – проекции силы тяжести на оси ПСК;  
 $F_{ij}^x, F_{ij}^y, F_{ij}^z$  – проекции силы взаимодействия между двигателем и опорной поверхностью (ОП) на оси ПСК;  
 $N_{ij}^x, N_{ij}^y, N_{ij}^z$  – проекции нормальной реакции ОП на оси ПСК;  
 $M_x(N_{ij}), M_y(N_{ij}), M_z(N_{ij})$  – проекции момента от нормальной реакции ОП на оси ПСК;

Неподвижная система координат служит для моделирования заданных дорожных условий. Каждая точка поля однозначно описывается тремя координатами неподвижной системы координат.

Подвижная или связанная система координат, используемая для математического описания движения ТС, характеризуется тем, что ее оси совпадают с главными осями инерции машины, а центр находится в центре масс ТС. В этой системе моменты инерции тела являются постоянными.

Микроподвижная система координат связана с центром пятна контакта  $i$ -го колеса.

$M_x(F_{ij}), M_y(F_{ij}), M_z(F_{ij})$  – проекции момента от силы взаимодействия между двигателем и опорной поверхностью на оси ПСК;

$I_x, I_y, I_z$  – моменты инерции ТС относительно осей ПСК.

Положение ТС в НСК определяется взаимным расположением координатных систем, которые характеризуются радиус-вектором центра масс  $\vec{R}_c^{(H)}$  и тремя угловыми координатами. Эти угловые координаты являются углами Эйлера-Крылова:  $\psi$  – угол крена,  $\varphi$  – угол дифферента,  $\theta$  – курсовой угол.

Связь между подвижной и неподвижной системами координат осуществляется с помощью матриц линейного преобразования.

Матрица преобразования из ПСК в НСК:

$$B = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot \cos\varphi - \sin\psi \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta & -\cos\psi \cdot \sin\theta & \sin\varphi \cdot \cos\theta + \cos\varphi \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta \\ \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\psi & \cos\psi \cdot \cos\theta & \sin\varphi \cdot \sin\theta - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi \\ -\cos\psi \cdot \sin\varphi & \sin\psi & \cos\varphi \cdot \cos\psi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица преобразования из НСК в ПСК:

$$B^T = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot \cos\varphi - \sin\psi \cdot \sin\varphi \cdot \sin\theta & \sin\theta \cos\varphi + \cos\theta \sin\varphi \sin\psi & -\cos\psi \sin\varphi \\ -\cos\psi \cdot \sin\theta & \cos\psi \cdot \cos\theta & \sin\psi \\ \sin\varphi \cos\theta + \cos\varphi \cdot \sin\psi \sin\theta & \sin\varphi \sin\theta - \sin\psi \cos\theta \cos\varphi & \cos\varphi \cdot \cos\psi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Полная программная реализация математической модели, учитывающей случайный характер микропрофиля дорог, деформируемость грунтовых поверхностей и криволинейность движения колесных машин, вызывает ряд затруднений. Поэтому при решении конкретных задач вводились дополнительные допущения.

При расчете плавности хода в общей модели сделаны следующие основные допущения: пренебрегаем деформируемостью грунтовых поверхностей и криволинейностью движения, движение машины прямолинейное. Вероятностные характеристики микропрофиля опорной поверхности можно охарактеризовать корреляционной функцией, отражающей вероятностную связь между координатами микропрофиля по длине участка пути, спектральной плотностью, характеризующей частотный состав микропрофиля, и дисперсией, характеризующей разброс случайной величины относительно ее среднего значения:

$$R_q(l) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_q(\omega) \cos\omega l d\omega,$$

$$S_q(\omega) = 2 \int_0^{\infty} R_q(l) \cos\omega l dl,$$

$$D_q = R_q(0).$$

Обширные исследования автомобильных и грунтовых дорог показали, что нормированные корреляционные функции и спектральные плотности ординат среднего сечения могут быть аппроксимированы соответственно следующими выражениями:

$$\rho_q(l) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i |l|} \cos\beta_i l, \quad (4)$$

и

$$\bar{S}_q(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \alpha_i (\alpha_i^2 + \beta_i^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2\omega^2 (\alpha_i^2 + \beta_i^2) + (\alpha_i^2 + \beta_i^2)^2}, \quad (5)$$

где  $\rho_q(l), \bar{S}_q(l)$  – нормированные значения.

Значения коэффициентов аппроксимации  $(\alpha_i, \beta_i)$  корреляционной функции и спектральной плотности микропрофиля некоторых типов дорог приведены в соответствующей технической литературе, которые могут быть использованы для оценки возмущающих воз-

действий на динамические системы ТС. Дифференциальные уравнения движения (1) носят явно выраженный нелинейный характер. Поэтому для их решения применяются численные методы, для которых необходимо задавать конкретные реализации микропрофиля. Кроме этого, в инженерной практике достаточно часто необходимо результаты расчетов проверять экспериментальными исследованиями, здесь возникают определенные трудности, так как практически невозможно идентифицировать предложенные в специальной литературе значения параметров различных типов дорог с конкретными маршрутами движения машины и, следовательно, адекватно оценить результаты расчетов и эксперимента.

Задавать возмущающее воздействие на динамические системы желательно на основе данных, описывающих действительный микропрофиль опорных поверхностей на конкретных маршрутах движения, обладающих достаточным постоянством характеристик дорожной поверхности на всей протяженности участков измерения как по длине, так и по времени. Таким постоянством обладают испытательные дороги автополигонов, в том числе и НИЦИАМТ. После утраты базы данных микропрофиля дорог НИЦИАМТ, записанных на магнитных носителях в 70-х годах прошлого столетия, а также модернизации ряда испытательных дорог работа по определению микропрофиля базовых дорог НИЦИАМТ стала актуальной. Проведенные в 2006–2008 годах замеры микропрофиля ряда дорог ФГУП НИЦИАМТ [1] позволили определить как непосредственно высоты неровностей микропрофиля, так и коэффициенты аппроксимации корреляционной функции, которые приведены в табл. 1 (приведены средние значения коэффициентов аппроксимации).

Таблица 1

## Характеристики базовых дорог НИЦИАМТ

Вид дороги	$D_q, \text{см}^2$	$\alpha$	$\beta$
Асфальтовая (Д) 1	6,6	0,02	0,04
Асфальтовая 2	9,85	0,32	1,53
Булыжная 1	12,7	0,11	0,07
Булыжная 2	21,1	0,17	0,18
Грунтовая 1	39,4	0,2	0,23
Грунтовая 2	52,1	0,05	0,15
Грунтовая 3	70,7	0,04	0,28
Грунтовая 4	97,6	0,12	0,31
Грунтовая 5	123,0	0,16	0,16
Грунтовая 6	140,7	0,07	0,43

Процесс моделирования можно представить в виде следующего пошагового алгоритма. Пусть в момент времени  $t_i$  известны радиус-векторы перемещения и скорости системы (начальные условия моделирования) в проекциях на обобщенные координаты. Тогда в этот момент времени могут быть определены текущие деформации упругих элементов и скорости нагружения демпфирующих элементов и по известным характеристикам вычислены значения силовых факторов, действующих на ТС. Далее по уравнениям динамики и выбранным методам численного интегрирования определяются временные производные высших порядков по обобщенным координатам. Значения производных служат для определения (прогнозирования) положения и скорости системы в момент времени  $t_{i+1} = t_i + h$ , где  $h$  – шаг прогноза или интегрирования. Полученные значения являются начальными условиями на следующем шаге. Далее определяются значения переменных состояния в следующий момент времени и вычисляются силы и моменты, действующие на втором шаге интегрирования, и т.д.

При построении математической модели взаимодействия колесной машины с грунтом и оценке проходимости сделаны следующие основные допущения:

- поверхность движения ровная, т.е. пренебрегаем влиянием микропрофиля дороги;

- связь колес с корпусом машины является абсолютно жесткой во всех направлениях, за исключением относительного вращения колес;
- процесс движения машины установившийся.

Таким образом, при оценке проходимости машин решалась квазистатическая задача. Это вполне допустимо, так как передвижение колесных машин по грунтам с низкой несущей способностью происходит со скоростями движения, не превышающими 20...25 км/ч.

Тогда система уравнений, описывающих движение ТС, записывается в виде

$$\sum_{k=1}^n G_k^{(BH)} - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N F_{ij} = 0,$$

$$G - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N N_{ij} = 0,$$

$$\sum_{k=1}^n M_k^{(BH)} - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N (M_{ij} + N_{ij} L_{cij} + F_{ij} h_{cij}) = 0,$$

где  $\sum_{i=1}^n G_i^{(BH)}$  – сумма продольных внешних сил, приложенных к машине;

$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N F_{ij}$  – сумма продольных реакций полотна пути по всем колесам движителя;

$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N N_{ij}$  – сумма вертикальных реакций полотна пути по всем колесам движителя;

$b_k$  – ширина контакта колеса с полотном пути;

$\sum_{i=1}^n M_i^{(BH)}$  – сумма внешних моментов, приложенных к машине;

$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^N (M_{ij} + N_{ij} L_{cij} + F_{ij} h_{cij})$  – сумма реактивных моментов полотна пути;

$L_{cij}$  – горизонтальное расстояние от точки приложения реакций  $N_{ij}$  до центра масс;

$h_{cij}$  – вертикальное расстояние от точки приложения реакций  $F_{ij}$  до центра масс.

Полученная система должна быть дополнена совокупностью уравнений, определяющих взаимодействие движителя машины с полотном пути [2]:

$$\int_{L_{k1}}^{L_{k2}} (\sigma_{x\kappa} - \sigma_{x\mu}) dx = 0,$$

$$\int_{L_{k1}}^{L_{k2}} (\sigma_{x\kappa} - \sigma_{x\mu}) dx = 0,$$

$$\int_{L_{k1}}^{L_{k2}} [(x\sigma_{z\kappa} + z\sigma_{x\kappa}) - (x\sigma_{z\mu} + z\sigma_{x\mu})] dx = 0,$$

где  $\sigma_x, \sigma_z$  – вертикальные и горизонтальные напряжения в зоне взаимодействия колеса с полотном пути от деформации шины и грунта;

$L_{k1}, L_{k2}$  – длина зоны загрузки и разгрузки шины.

Приведенная выше модель позволяет рассчитать реакции на колесах машины, значения которых могут быть положены в основу расчета тягового усилия и сопротивления движению машины.

### Библиографический список

1. **Котляренко, В.И.** Математическая модель системы поддресоривания и оценка плавности хода колесных машин на шинах сверхнизкого давления // Журнал ассоциации автомобильных инженеров. 2008. №5. С. 32–37.
2. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... докт. техн. наук. – Н. Новгород, 1999. – 485 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.06.2010*

**V.I. Kotlyarenko, S.E. Manyanin, I.A. Sokolov**

### MATHEMATICAL MODEL OF A WHEELED VEHICLE

On the basis of the stated basic principles the mathematical model of a wheeled vehicle is developed. Methods of description of disturbance from the road surface by means of the microprofile probabilistic characteristics and the data describing the actual microprofile of the specified routes are discussed. The mathematical model of the interaction between a wheeled vehicle and ground is built.

*Key words:* dynamic system of a vehicle, mathematical description of movement, microprofile, interaction between a wheeled vehicle and ground.

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 539.3

А.М. Сергеева, О.В. Марченко

### ДЕФОРМАЦИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СОБСТВЕННОГО ВЕСА ЛЬДА<sup>1</sup>

Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

В работе исследуется напряженное состояние, деформирование и разрушение ледяного покрова новым запатентованным методом. С использованием теории малых упругих деформаций и апробированного численного метода решается пространственная задача о деформации ледяного покрова под действием атмосферного давления и силы тяжести собственно льда.

*Ключевые слова:* напряжения ледяного покрова, деформации.

#### Введение

Осложнения судоходной обстановки на реках северных регионов в основном связаны с образованием ледяного покрова на водоемах в холодное время года. Чаще всего на водоемах ледяной покров имеет смешанное происхождение, который возникает вследствие динамических процессов, в дальнейшем растет за счет теплообмена. Особенностью такого льда является его выровненная поверхность за счет неодинакового нарастания льда и сглаживания неровностей течением воды.

Создание благоприятных условий для судопрохождения в холодное время года на реках северных регионов связано с разработкой новых, экологически безопасных способов разрушения льда. В работе рассматривается оригинальный способ разрушения ледяного покрова. Нарушение сплошности льда происходит под действием атмосферного давления и собственного веса ледяного покрова. Получен патента на данное устройство [1]. Кратко поясним принцип работы устройства, которое выполнено в виде ледокольной приставки (рис. 1), установленной в носовой оконечности судна. Ледокольная приставка содержит контейнеры 1, которые между собой соединены крепежами 2. Ледокольная приставка соединена с судном при помощи тяг 3. Контейнеры 1 имеют две области: рабочую и область регулируемую плавучесть. Эти области отделены друг от друга сплошной перегородкой. Чтобы завести приставку под лед при помощи насосов 4, установленных в области регулирующей плавучесть, контейнеры подтапливают.

Приставка помещается под лед и поднимается до контакта с нижней поверхностью льда, посредством сообщения контейнерам насосами положительной плавучести. Насосы, установленные в рабочей области контейнера, обеспечивают разряжение подо льдом определенных геометрических размеров. Под действием атмосферного давления и собственного веса в ледяном покрове появляется нарушение сплошности. Судно с ледокольной пристав-

© Сергеева А.М., Марченко О.В., 2010.

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке «Фонда содействия отечественной науке» и Дальневосточного отделения РАН (код проекта 06-П-ОУ-07-015); Дальневосточного отделения РАН (код проекта 09-П-УО-03-002)

кой продолжает равномерно и непрерывно двигаться вперед, в результате чего происходит доламывание льда и раздвижение осколков обводами самого судна. Чтобы предотвратить засорение насосов осколками льда в рабочей области устанавливается решетка 5, зернистость которой зависит от характеристик применяемых в этой области насосов. Боковые стенки 6 контейнеров выполнены заостренными, для более плотного прилегания контейнеров к нижней поверхности льда.

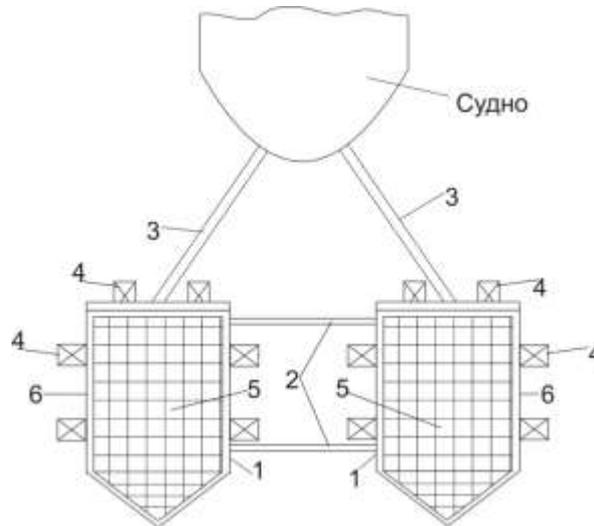


Рис. 1. Схема устройства для разрушения ледяного покрова

При разработке математической модели и построении численной схемы решения полагалось, что контейнеры неподвижны, а лед, которых находится над ними, движется в направлении, противоположном курсу судна, то есть судну навстречу.

Задача по анализу напряженно-деформированного состояния льда, который движется над разреженной полостью контейнера, симметричная. Для удобства будем рассматривать половину области деформирования (рис.2). Пусть деформируемая среда упругая, изотропная, несжимаемая, а контейнер имеет прямоугольную форму.

Задача решалась с использованием уравнений теории упругости для малых деформаций, численного метода [2, 3] и с учетом граничных условий, указанных на (рис.2) Запишем систему дифференциальных уравнений в эйлеровой системе координат.

$$\sigma_{ij,j} + F_i - \rho \frac{dv_i}{d\tau} = 0; \quad \frac{dv_i}{d\tau} = \dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k}, \quad i, j, k = 1, 2, 3. \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G \varepsilon_{ij}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}, \quad \varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Будем полагать, что  $\rho = \text{const}$ , тогда уравнение несжимаемости

$$v_{i,i} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad \xi_{ii} = 0. \quad (3)$$

Уравнения теплопроводности (в случае установившегося температурного поля)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) = 0; \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

В уравнениях (1, 2, 3, 4) используется суммирование по повторяющимся индексам;  $\rho$  - плотность льда,  $G = G(\theta)$  - модуль сдвига льда;  $[\sigma_{ij}]$  - тензор напряжений;  $[\varepsilon_{ij}]$  - тензор

деформаций;  $v_i, F_i$  - проекции скорости перемещений и удельной объемной силы по координатным осям  $x_i, i=1,2,3$ ;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau}$ ;  $\tau$  - время деформации.

Считая рассматриваемый процесс стационарным  $\dot{v}_i = 0$ , запишем уравнение (1) в виде

$$\sigma_{ij,j} + F_i - \rho v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = 0, F_2 = F_3 = 0. \quad (5)$$

Уравнения (2) перепишем в виде

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}, i \neq j, \sigma_{11} - \sigma_{22} = 2G(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}), \sigma_{11} - \sigma_{33} = 2G(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33}). \quad (6)$$

Для малых деформаций справедливы соотношения

$$\frac{d\varepsilon_{ij}}{d\tau} = \xi_{ij} \Rightarrow \varepsilon_{ij} = \int \xi_{ij} d\tau, \xi_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i}). \quad (7)$$

Будем полагать, что траектория движения совпадает с координатой  $x_2$ . В разностном виде при стационарном процессе вдоль траектории движения имеем

$$(\varepsilon_{ij})_m = \sum_m (\xi_{ij})_m \Delta\tau_m, \quad (8)$$

где  $\Delta\tau_m$  - время прохождения материальной точкой элемента « $m$ »;  $(\xi_{ij})_m$  - компоненты тензора скоростей деформаций в элементе « $m$ »;  $(\varepsilon_{ij})_m$  - компоненты тензора деформаций в « $m$ » элементе.

Решение уравнения теплопроводности приведено в работе [1], поэтому с учетом  $\lambda = \lambda_0(1 + a\theta)$  запишем его в конечном виде:

$$\theta = -\frac{1}{a} + \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{x_1}{h} \left( \frac{2\theta_1}{a} + \theta_1^2 \right)}. \quad (9)$$

При выводе уравнения (9) использовались граничные условия при  $x_1 = 0, \theta = 0^\circ C$ ; при  $x_1 = h, \theta = \theta_1$ .

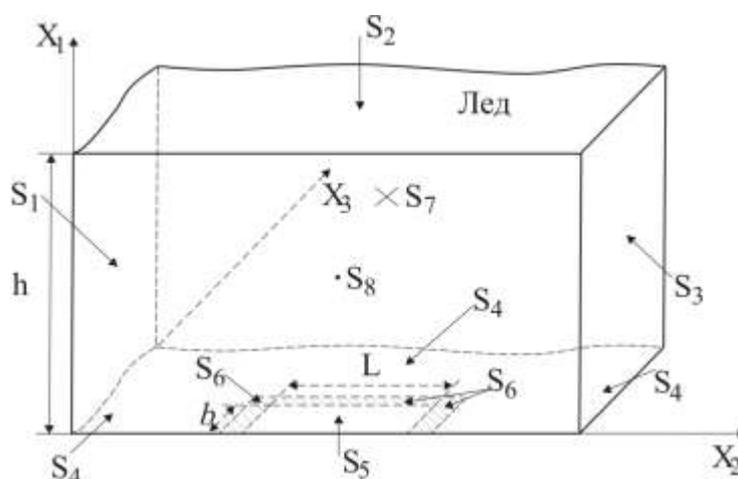


Рис. 2. Схема, поясняющая определение граничных условий

Граничные условия задачи (рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{S_2} &= -p_0; \sigma_{11}|_{S_4} = -p_0 - \gamma h; \sigma_{11}|_{S_5} = 0; \sigma_{11}|_{S_6} = -p_0 - \gamma h - p_1; \\ (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{S_i} &= 0, i = 2,4,5,6; (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{S_i} = 0, i = 1,3; \sigma_{22}|_{S_3} = 0; \\ \sigma_{32}|_{S_i} &= 0, i = 7,8; \sigma_{31}|_{S_8} = 0, \sigma_{33}|_{S_7} = 0; v_2|_{S_1} = v^*; v_3|_{S_8} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $p_0$  - атмосферное давление,  $\gamma$  - удельный вес льда,  $h$  - толщина льда,  $p_1 = bLh\gamma_0/\delta(L+2(b+\delta))$  - выталкивающее давление, появляющееся, когда в контейнере образуется разряженная полость высотой  $h_1$ ;  $v^*$  - скорость перемещения ледяного покрова;  $\gamma_0$  - удельный вес воды;  $b$  - половина ширины контейнера;  $L$  - длина контейнера;  $\delta$  - ширина кромки контейнера (рис. 3).

### Алгоритм решения задачи

1. Задаются начальные условия.
2. Исследуемая область деформации разбивается на элементы ортогональной формы. Рассчитывается матрица длин дуг элементов.
3. Задаются граничные условия.
4. По формуле (9) насчитывается поле температур по каждому элементу.
5. Насчитываются значения  $(G)_m$  по каждому элементу ( $m$  – номер элемента); задаются значения  $\bar{v}_i$  по каждому элементу.
6. Насчитывается матрица коэффициентов и свободных членов новой эквивалентной системы.
7. Решается система линейных уравнений.
8. По каждому элементу (его граням)  $(ij)$  насчитываются  $\sigma_{ij}$ ,  $v_i$ .
9. Уточняются значения  $\bar{v}_i$ .
10. Производится сравнение  $(\bar{v}_i)_n$  и  $(\bar{v}_i)_{n-1}$ ,  $n$  – номер итерации. Если заданная точность соответствия  $(\bar{v}_i)_n$  и  $(\bar{v}_i)_{n-1}$  удовлетворяется, то следует операция 11, в противном случае осуществляется операция 6 и т.д.
11. Окончание расчета.

### Результаты исследования

При расчетах использовались свойства пресноводного льда, так как он прочнее морского.

По данным работы [3] имеем модуль Юнга:

$$E = (87.6 - 0.21\theta - 0.0017\theta^2) \cdot 10^2 \text{ (МПа)}.$$

Коэффициент Пуассона  $\nu$

$$\nu = 0.5 + 0.003 \cdot \theta \quad (\theta > -40^\circ \text{C}).$$

Модуль сдвига  $(G)$

$$G = E/2(1 + \nu).$$

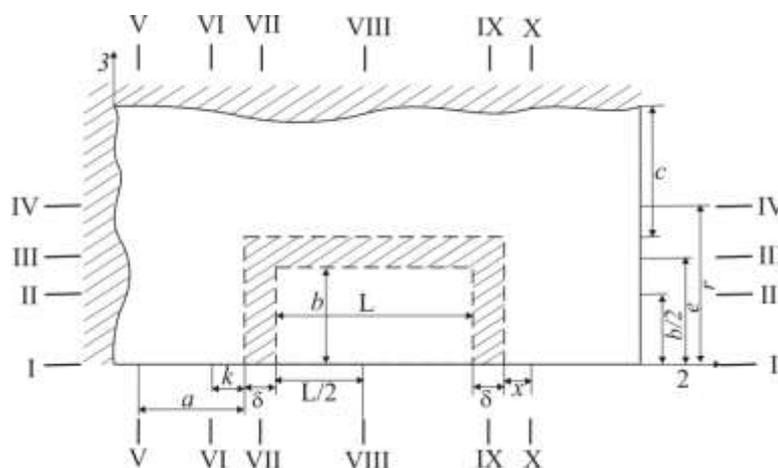
В формуле (9) по данным [4]

$$a = -0.0159 \text{ град}^{-1}.$$

Вычисления проводились для льда толщиной 0.5 м и 1 м. Температура окружающей среды равна  $-30^\circ \text{C}$  ( $\theta_1 = -30^\circ \text{C}$ ). При моделировании движения ледокольной приставки принимается, что приставка неподвижна, а ледяной покров перемещается над контейнером. В качестве нагрузки берется разница между давлением на поверхности льда, контактирующей с воздухом, собственным весом льда и давлением на поверхности, находящейся над разряженной полостью контейнера.

Из работы [5] известно, какими параметрами может обладать неподвижный контейнер, вызывающий разрушение ледяного покрова, находящегося над ним. В случае, когда ледокольная приставка движется, возможны два варианта расположения контейнера подо льдом. В первом – контейнер вытянут по ходу движения судна, т.е. длина контейнера параллельна направлению движения судна. Во втором – контейнер вытянут в поперечном направлении по отношению к направлению движения судна (перпендикулярно ходу судна). В данной работе исследуется только влияние расположения и скорости передвижения ледокольной приставки подо льдом на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова. Как уже говорилось, для проведения анализа достаточно взять  $1/2$  области деформирования.

Рассмотрим первый вариант расположения ледокольной приставки подо льдом, когда контейнер вытянут по направлению движения судна. Примем длину контейнера  $L = 4$  м, а ширину  $2 \cdot b = 3$  м. Анализ напряженного состояния льда будем проводить при скорости передвижения ледокольной приставки 10 км/ч, 20 км/ч, 30 км/ч. По полученным результатам построим эпюры напряжений в сечениях указанных на рис. 3.



**Рис. 3.** Сечения, в которых проводится анализ напряженного состояния льда  
( $\delta=0,75$  м;  $e=b+\delta/2$  м;  $r=b+\delta+1,25$  м;  $c=5$  м)

Наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения в ледяном покрове имеют место в области, расположенной над серединой полости контейнера (рис. 4, 5). Для льда обеих толщин характерно такое распределение напряжений в исследуемой области деформирования, при котором численные значения напряжений  $\sigma_{33}$  в сечении VIII-VIII больше  $\sigma_{22}$  в сечении I-I (рис. 4, а, 5, з). Характеры распределения напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  похожи. На поверхности льда, контактирующей с воздухом, наблюдаются сжимающие напряжения, а на противоположной поверхности растягивающие. Лед, деформируясь, провисает в разряженную полость контейнера. Перемещение льда в направлении противоположном оси  $x_1$  у полуметрового льда не превышает 2,8 см, а у метрового 0,4 см.

У льда толщиной 0,5 м наибольшие растягивающие напряжения достигают  $\sigma_{33}=6,9$  МПа в сечении VIII-VIII (рис. 5, з), а сжимающие  $\sigma_{33}=-7,1$  МПа в том же сечении при скорости движения ледокольной приставки  $v=30$  км/ч. Напряжения при  $v=20$  км/ч и  $v=10$  км/ч несколько меньше по своим численным значениям напряжений при  $v=30$  км/ч (рис. 4, 5).

Во льду толщиной 1 м максимальные растягивающие и сжимающие напряжения равны соответственно  $\sigma_{33}=1,9$  МПа и  $\sigma_{33}=-1,6$  МПа. Напряжения, возникающие в толще метрового льда, в 3,8 раза меньше напряжений возникающих в полуметровом ледяном покрове при тех же параметрах контейнера. Наибольшие значения напряжений в толще метрового льда отмечены также при  $v=30$  км/ч.

В сечении III-III, проходящем по задней стенке контейнера на расстоянии  $k=2,5$  м. перед контейнером, наблюдается изменение характера распределения напряжения (рис. 4, в). На поверхности льда и на нижней его части имеют место растягивающие напряжения равные соответственно у льда толщиной 0,5 м 1,7 МПа и 0,5 МПа, а у метрового – 0,5 МПа и 0,1 МПа.

Если в качестве критерия разрушения принять напряжение растяжения  $\sigma_{\text{пр.раст}}=1$  МПа, а напряжение сжатия  $\sigma_{\text{пр.сжим}}=-2,7$  МПа [4], то в данном случае можно с уверенностью утверждать, что лед толщиной 0,5 м будет полностью разрушаться при всех рассматриваемых скоростях передвижения ледокольной приставки. Если скорость движения контейнера  $v=10$  км/ч, то начальные разрушения будут наблюдаться уже на расстоянии 6 м перед контейнером, при  $v=20$  км/ч – 5 м, при  $v=30$  км/ч – 4 м.

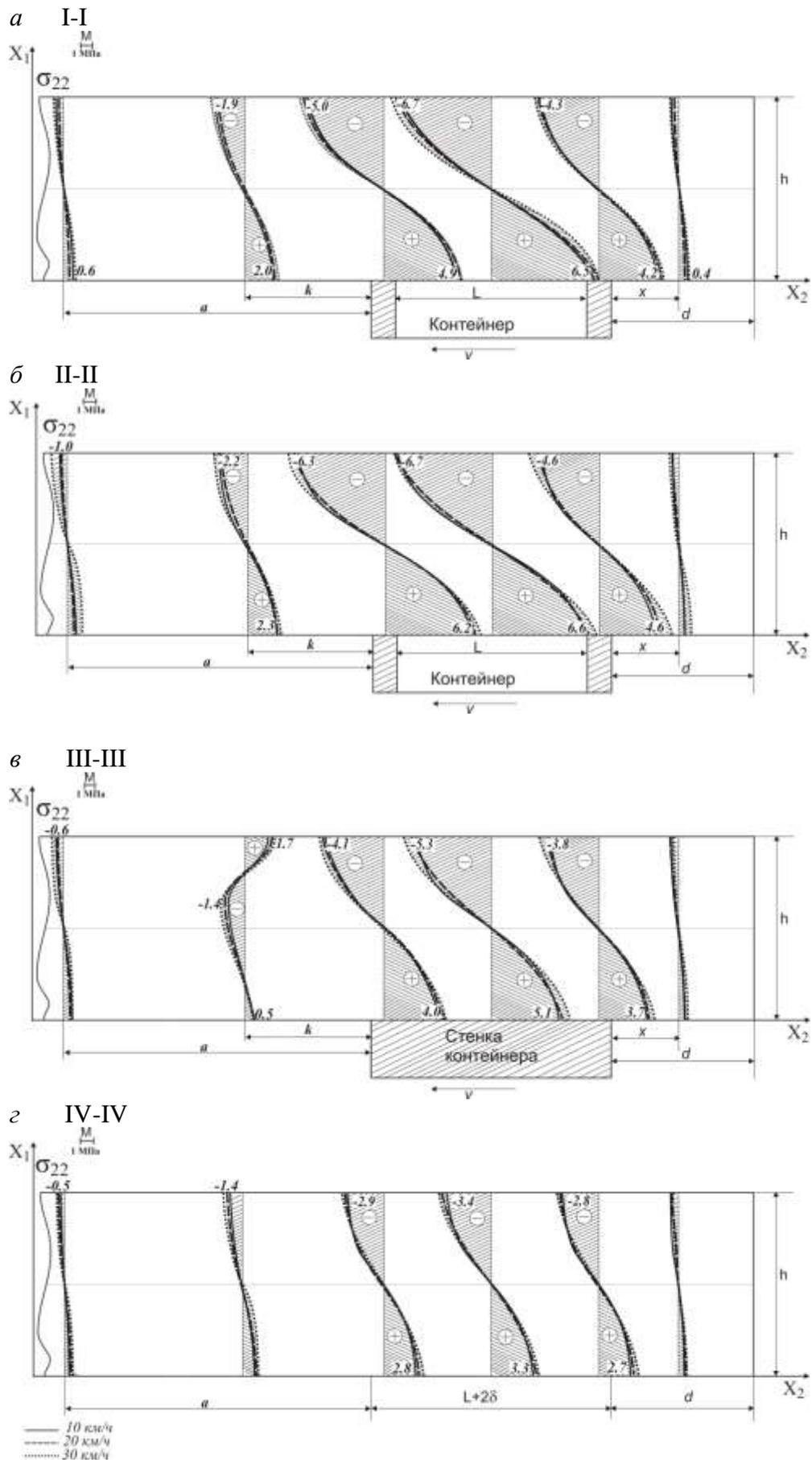


Рис.4. Эпюры напряжений  $\sigma_{22}$  ледяного покрова толщиной 0.5 м:  
 $a=8.5$  м,  $k=2.5$  м.,  $x=2.3$  м,  $d=7$  м,  $L+2\delta=4.75$  м

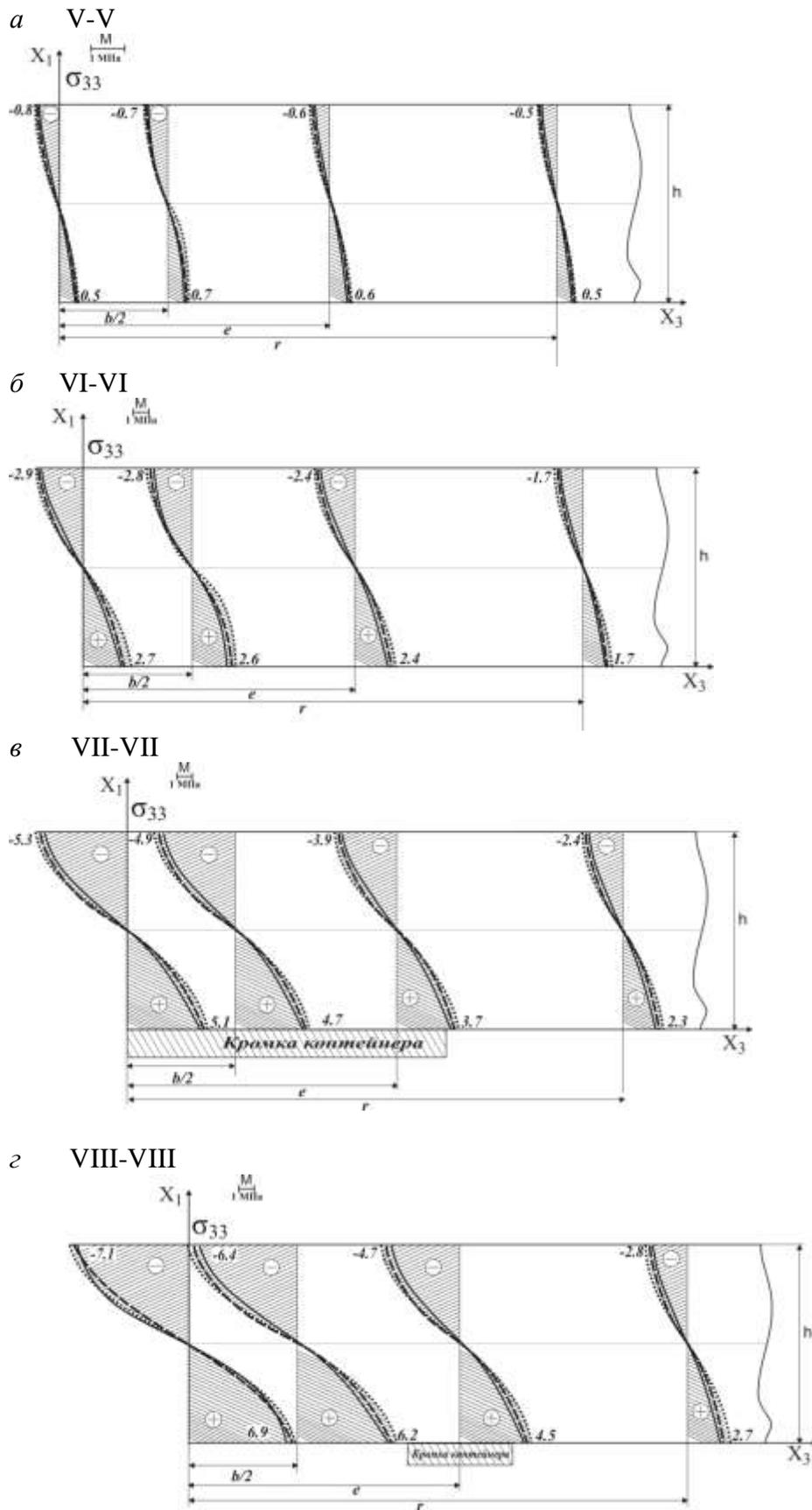


Рис. 5 Эпюры напряжений  $\sigma_{33}$  ледяного покрова толщиной 0.5 м:  
 $b/2 = 0.75$  м,  $e = 3.375$  м,  $r = 5$  м

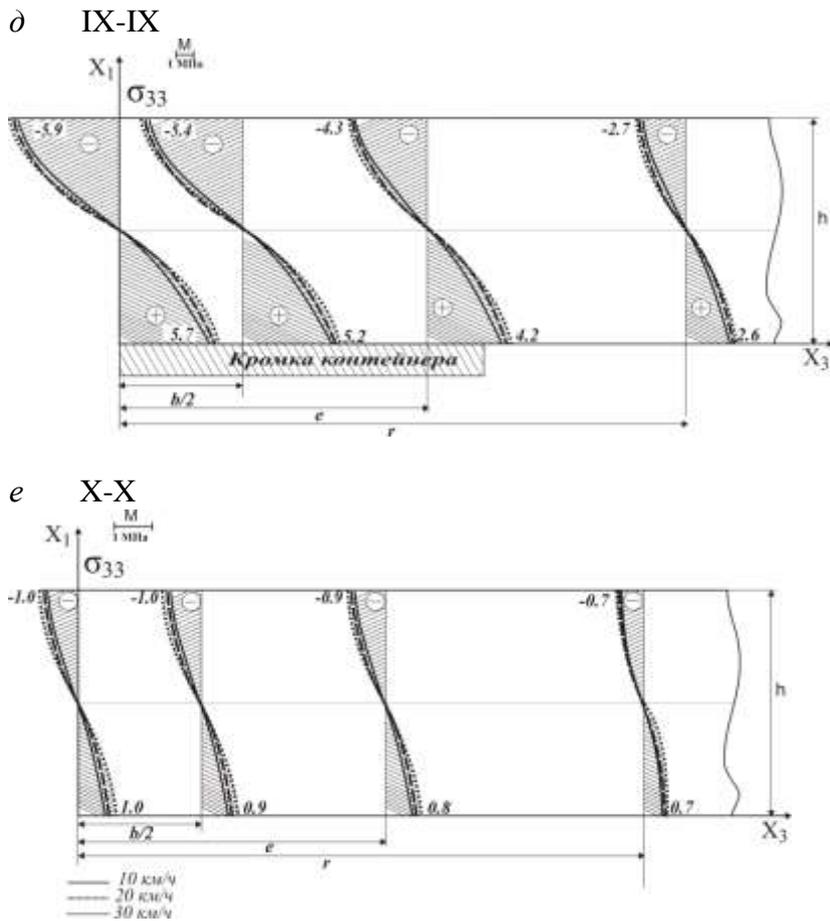


Рис. 5 (окончание)

В окрестности контейнера разрушение полуметрового льда будет полным. При таких параметрах контейнера у метрового льда характер распределения напряженного состояния будет несколько иным. Сжимающие напряжения, в отличие от растягивающих, не превышают принятого критерия разрушения. Вероятнее всего, для льда толщиной 1 м начнется только начальное разрушение, возникающее над полостью контейнера. В этом случае необходимо доламывание льда, которое может быть осуществлено обводами судна, движущего приставку.

Рассмотрим второй вариант расположения ледокольной приставки подо льдом, когда контейнер вытянут в направлении перпендикулярном движению судна. В этом случае параметры, указанные на рис. 4, 5 будут следующими  $L=3$  м,  $2 \cdot b=4$  м,  $e = 2.4$  м,  $r = 4$  м. Характер распределения напряжения во льду обеих толщин при скоростях  $v=10$  км/ч,  $v=20$  км/ч и  $v=30$  км/ч по сравнению с ранее рассмотренным случаем остается практически без изменений. Изменение конфигурации контейнера привело к росту численных значений напряжений  $\sigma_{22}$  у полуметрового льда в интервале от  $0.5 \div 0.6$  МПа, а  $\sigma_{33}$  – от  $0.1 \div 0.2$  МПа. У метрового льда увеличение  $\sigma_{22}$  колеблется в интервале от  $0.1 \div 0.2$  МПа, а  $\sigma_{33}$  – от  $0.03 \div 0.05$  МПа. Безусловно, малое изменение напряжений не может оказать значительного влияния на изменение распределения напряжений в исследуемой области деформирования.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что движущаяся подо льдом ледокольная приставка вызывает значительные деформации ледяного покрова толщиной 0.5 м и 1 м. Различные варианты расположения контейнера под метровым льдом не вызывают изменений в характере распределения напряжения в толще льда на всем интервале задания скоростей.

**Библиографический список**

1. **Патент РФ №2360825.** Устройство для разрушения ледяного покрова/ Одинокое В.И., Сергеева А.М., Марченко О.В. Бюл. №19. Оpubл. 10.07.2009.
2. **Одинокое, В.И.** Математическое моделирование одного нового процесса разрушения ледяного покрова / В.И. Одинокое, А.М. Сергеева // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 2. С. 139–146.
3. **Одинокое, В.И.** Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом / В.И. Одинокое. – Владивосток: Дальнаука. 1995. – 168 с.
4. **Богородский, В.В.** Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В.П.Гаврило. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 383 с.
5. **Одинокое В.И., Сергеева А.М.** Эволюция процесса нарушения сплошности при разрушении ледяного покрова / В.И. Одинокое, А.М. Сергеева // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. №1. С. 114-119.

*Дата поступления  
в редакцию 09.11.2010*

**A.M. Sergeeva, O.V. Marchenco**

**DEFORMATION OF AN ICE SHEET UNDER THE ACTION OF ATMOSPHERIC PRESSURE AND THE WEIGHT OF ICE**

In the present work, we study the stress state, deformation, and breaking of an ice sheet by a new patented method. The spatial problem of the stain of ice cover under atmospheric pressure and the weight of is solved using the theory of small elastic strains and a proven numerical method.

*Key words:* ice cover stresses, strains.

УДК 629.12

Ю.А. Кочнев

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТАНКЕРА НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### ФГОУ ВПО «ВГАВТ»

Рассматривается вопрос оптимизации главных размерений танкера смешанного (река-море) плавания на начальном этапе проектирования. Приведена математическая модель их расчёта. Получены графические зависимости для оценки влияния главных элементов танкера на показатель эффективности, по результатам численного машинного эксперимента.

*Ключевые слова:* танкер, главные элементы, математическая модель, критерий оптимальности.

На начальном этапе проектирования одной из важнейших задач является определение главных элементов (ГЭ) судна. От того, насколько обоснованно они будут рассчитаны, зависит качество спроектированного транспортного объекта. К таким элементам, прежде всего, относят длину судна  $L$ , ширину  $B$ , высоту борта  $H$ , осадку  $T$ , коэффициент общей полноты  $\delta$ . Все остальные элементы и характеристики определяются по ним на последующих шагах проектирования.

Рассматриваемая задача в общем виде может быть сформулирована следующим образом. По известным исходным данным, составляющим вектор  $\mathbf{X}$ , определить такие элементы танкера  $X_1$ , чтобы функция цели (критерий оптимальности) достигал экстремума.

$$k_{\text{opt}} = f_1(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) \rightarrow \min(\max), \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}_2$  – вектор нормативных величин.

При этом должны выполняться ограничения, определяемые требованиями заказчика, условиями эксплуатации, правилами надзорного общества и различных международных конвенций, которые в общем виде могут быть в виде строгих равенств или неравенств.

$$\begin{aligned} q_s(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) &= 0, & s \in S_1, \\ q_s(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) &> 0, & s \in S_2. \end{aligned} \quad (2)$$

К строгим равенствам ( $S_1$ ) относятся, например:

– уравнение плавучести

$$D(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - \rho g V(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) = 0, \quad (3)$$

где  $D$  – вес судна;  $\rho$  – плотность воды;  $V$  – водоизмещение судна;

– уравнение ходкости

$$Pe(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - R(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) = 0, \quad (4)$$

где  $Pe$  – упор, развиваемый двигателем;  $R$  – сопротивление воды движению судна.

Примерами ограничения типа неравенств ( $S_2$ ) являются:

– условие обеспечения остойчивости

$$h_0(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - h_{\min} > 0, \quad (5)$$

где  $h_0$  – малая метацентрическая высота;  $h_{\min}$  – минимально допустимое значение начальной метацентрической высоты;

– условие обеспечения грузовместимости

$$W(\mathbf{X}, X_1, \mathbf{X}_2) - \rho_{\text{гр}} P_{\text{гр}} > 0, \quad (6)$$

где  $W$  – суммарная вместимость грузовых танков.

Критерием оптимизации может быть доход, минимальная фрахтовая ставка, приведённые затраты от эксплуатации судна и т.п.

Исходными данными при решении задачи являются: грузоподъёмность судна  $P$ , характеристики перевозимого груза (плотность  $\rho_{гр}$ , температура вспышки паров), мощность  $N$  или скорость  $v$ , характеристики линии эксплуатации (общая протяжённость линии, протяжённость речного и морского участка, габариты судового хода), класс регистра, особенности конструкции корпуса (шпации, высота второго дна, количество ярусов надстройки), данные для экономического расчёта.

Варьируемыми элементами являются главные размерения или их соотношения, а также ряд характеристик АКТ танкера, таких как две осадки, носовое или кормовое расположение надстройки, параметры комбинированного судна. В зависимости от принятых варьируемых параметров можно решать различные задачи, приведённые в табл. 1.

Таблица 1

## Варианты оптимизируемых параметров

№ задачи	Варьируемые параметры	Искомые величины
1	$\delta, L, B$	$D, T, H$
2	$\delta, l = L/B, t = T/B$	$D, L, B, T, H$
3	$\delta, L, t = T/B$	$D, B, T, H$
4	$\delta, L, B, T$	$D, P_{\max}$
5	$W_{\text{контейнеров}}/W_{\text{нефтегруза}}$	$D, P_{\text{контейнеров}}, P$
6	$T_M/T_P$	$P_{\max}, D$
7	Расположение надстройки	$L, H$

Укрупнённая блок-схема оптимизации танкера смешанного (река-море) плавания приведена на рис. 1.

Водоизмещение судна в первом приближение (блок 4) определяется по коэффициенту утилизации. Главные размерения, если они не заданы, по их соотношениям. Высота борта – с учётом требований грузоместимости и минимальной высоты надводного борта.

Полученные главные размерения судна должны удовлетворять ограничениям, приведённым в табл. 2, в границах которых математическая модель адекватно описывает танкер смешанного (река-море) плавания. К ним относятся ограничения, обусловленные диапазоном действия расчётных методик, ограничения налагаемые Правилами Российского Речного Регистра [3] и Правилами Российского Морского Регистра Судоходства [4].

Таблица 2

## Ограничения функционирования математической модели танкера

Класс регистра	Ограничение			Параметры формы корпуса
	$L$ , не более	$L/H$ , не более	$B/H$ , не более	
М – СП, М – Пр, О – Пр	140	24,0	4,0	$30 \leq (L/B)^2 \leq 100$ , $3,6 \leq B/T \leq 7,53$ $0,73 \leq \delta \leq 0,93$
R2 – RSN	150	21,0	3,0	

Кроме этого, на модель накладываются ограничения, указанные пользователем, связанные с условиями эксплуатации проектируемого судна: габариты судового хода на линии эксплуатации, диапазон изменения варьируемых параметров.

По полученным главным размерениям в блоке 6 интерполяционным методом генерируется теоретический корпус. Следует отметить, что при высоких значениях коэффициента общей полноты ( $\delta > 0,9$ ) носовая оконечность судна принимает бульбовую форму, что существенно сказывается на ряде характеристик, а, следовательно, и на эффективности танкера.

В блоке 7 производится расчёт водоизмещения танкера, которое определяется суммой масс отдельных разделов, статей, групп, подгрупп нагрузки масс. Методика их определения приведена в [2], где масса металлического корпуса рассчитывается с учётом фактических размеров и плотности материала, а остальные массы – по статистическим зависимостям. Для определения размеров элементов корпуса проектируется «виртуальный» мидель-шпангоут в соответствии с требованиями Правил [3, 4] и проверяется общая прочность корпуса судна по допускаемым напряжениям. Такой подход позволяет учесть особенности конструкции танкера и условия его эксплуатации.

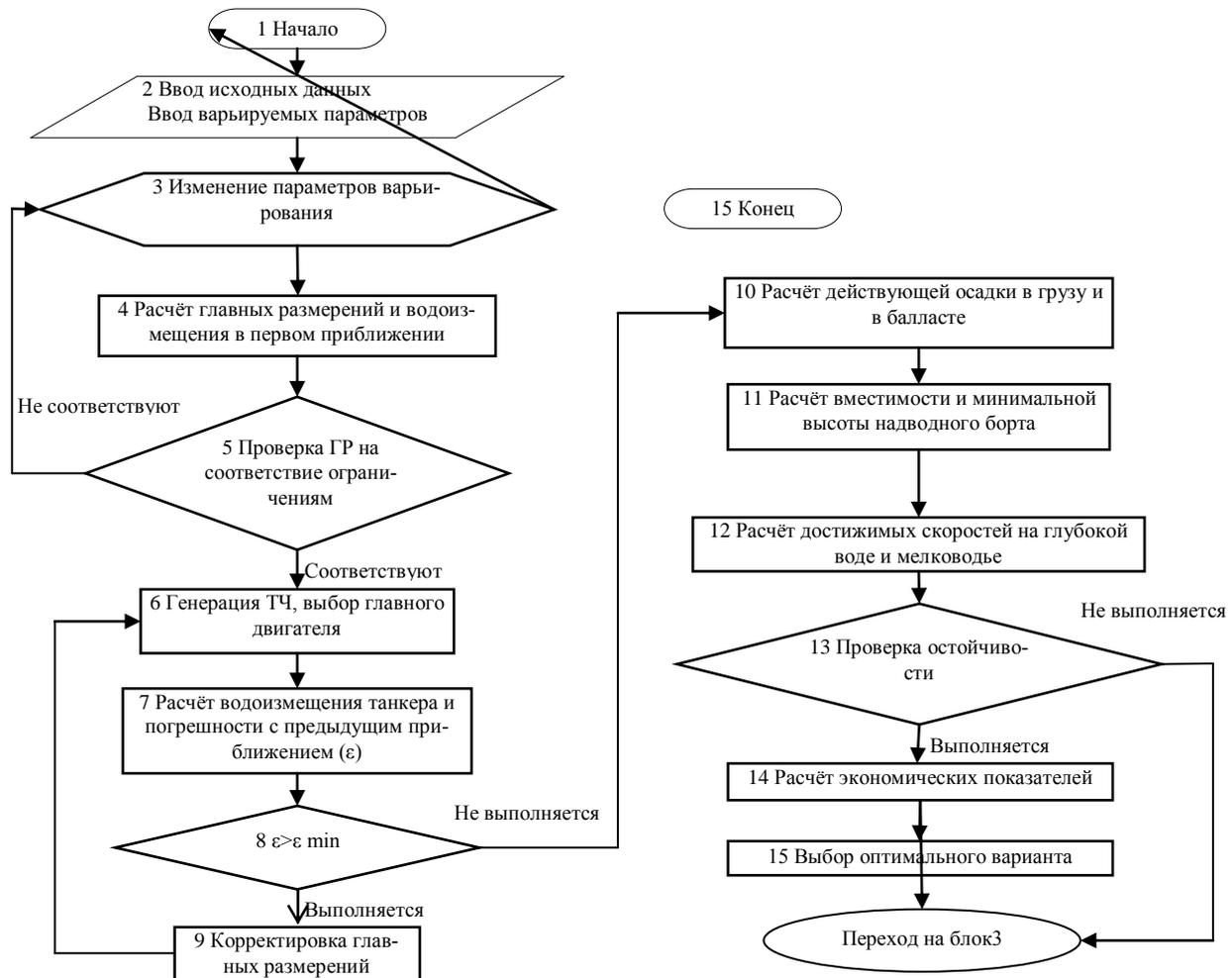


Рис. 1. Блок-схема оптимизации главных элементов судна

Необходимая в этих расчётах для выбора главных двигателей мощность пропульсивного комплекса ( $N$ ) определяется расчётным путём.

$$N = \frac{R(v) \times v}{X \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}}} \times \frac{(1-t)}{(1-w)}, \quad (7)$$

где  $R(v)$  – зависимость сопротивления воды от скорости хода;  $v$  – скорость хода судна;  $X$  – количество движителей;  $\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи;  $\eta_{\text{д}}$  – КПД движителя;  $t$  – коэффициент засасывания;  $w$  – коэффициент попутного потока.

Коэффициенты  $\eta_{\text{п}}$ ,  $\eta_{\text{д}}$  – определяются по аппроксимированным диаграммам для расчёта 4х лопастных винтов.

Сопротивление воды движению судна пересчитывается с судна прототипа с использованием коэффициентов влияния по данным Авдеева.

Полученное водоизмещение сравнивается с водоизмещением из предыдущего приближения. При их существенном различии производится корректировка главных размеров, или дедвейта при решении задачи 4.

Для танкера с окончательно принятыми ГЭ проверяется обеспечение минимального надводного борта, которое характеризует запас плавучести судна. При этом считается, что спроектированный танкер имеет стандартные бак и ют.

В соответствии с Правилам [3, 4] необходимо, чтобы:

$$H \geq H_{\min}, \quad (8)$$

где  $H_{\min}$  – минимальный надводный борт танкера, принимаемый в зависимости от его класса по Правилам [3, 4].

Специфичным состоянием нагрузки для танкера, помимо хода в «полном грузу», является «обратный переход» – порожнём с балластом на протяжении всей линии эксплуатации. Балластное состояние должно обеспечивать нормальную эксплуатацию судна, для чего необходимо иметь соответствующее заглубление носа и кормы.

Осадка носом оговаривается Правилами [3], осадка кормой должна обеспечивать заглубление движительно-рулевого комплекса, для эффективной его работы. Таким образом, осадка порожнём в балласте на миделе определяется уравнением:

$$T_{\text{Б}} = \frac{h/2 + 1,1 \times D_{\text{ГВ}}}{2}, \quad (9)$$

где  $h$  – высота волны, м;  $D_{\text{ГВ}}$  – диаметр гребного винта в первом приближении.

Водоизмещение танкера порожнём с балластом находится суммированием соответствующих нагрузок:

$$D_{\text{Б}} = D_{\text{пор}} + P_{\text{Б}} + Dw, \quad (10)$$

где  $D_{\text{пор}}$  – водоизмещение порожнего танкера;  $Dw$  – дедвейт.

В блоке 11 выполняется расчёт вместимости танкера по условию:

$$V_{\text{Т}} \geq P/\rho_{\text{Гр}} + V_{\text{ОТ}}, \quad (11)$$

где  $V_{\text{Т}}$  – объём танковой части корпуса, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{ОТ}}$  – объём отстойных танков, м<sup>3</sup>.

При расчёте объёма грузовых и отстойных танков учитываются потери на набор, второе дно, вторые борта и реальный объём корпуса в районе грузовых танков ( $V$ ), который определяется по теоретическому чертежу, сгенерированному в блоке 6.

При не выполнении условия (11) увеличивается высота борта судна и повторяется расчёт водоизмещений и осадок.

Расчёт ходкости судна в блоке 12 проводится по зависимости (7), с учётом особенностей линии эксплуатации. Это позволяет найти массив скоростей хода танкера на глубокой воде в грузу и порожнём, и на участках с ограниченной глубиной фарватера.

Проверка остойчивости танкера по желанию пользователя может выполняться по методу начальной остойчивости, либо с использованием программы PROST, реализующей проверку остойчивости по Правилам [3]. Такой подход позволяет учесть реальные условия эксплуатации и загрузки судна, перетекание жидкого груза в танках. При неудовлетворении спроектированного судна требованиям остойчивости, расчётный вариант исключается из рассмотрения.

Для проведения технико-экономической оценки эффективности танкера в блоке 14 рассчитывается строительная стоимость и стоимость эксплуатации танкера в заданный период.

Строительная стоимость танкера определяется суммой затрат на материал, заработную плату и другие производственные расходы:

$$R = 1,35 \times \sum_{i=1}^{10} R_i \times (1 + \varphi), \quad (12)$$

где  $R_1$  – стоимость материалов;  $R_2$  – транспортно заготовительные расходы;  $R_3$  – основная заработная плата;  $R_4$  – дополнительная заработная плата;  $R_5$  – единый социальный налог;  $R_6$  – расходы на подготовку и освоение производства;  $R_7$  – общепроизводственные расходы;  $R_8$  – общехозяйственные расходы;  $R_9$  – прочие производственные расходы;  $R_{10}$  – неучтённые расходы;  $\varphi$  – процент налогов.

Стоимость материалов, необходимых для постройки судна, рассчитывается в зависимости от стоимости 1 т их массы:

$$R_1 = k \sum_{i=1}^m M_i \cdot \Theta_i, \quad (13)$$

где  $k$  – коэффициент серийности;  $M_i$  – масса  $i$ -й статьи нагрузки;  $\Theta_i$  – стоимость 1 т материала или оборудования.

Основная заработная плата рабочих определяется с учётом трудоёмкости изготовления соответствующих конструкций танкера:

$$R_3 = 3,3 \cdot k_d \cdot k_r \cdot \sum_{i=1}^m \frac{M_i}{\varepsilon_i} \cdot k_c, \quad (14)$$

где  $k_d$  – коэффициент прочих доплат;  $k_r$  – районный коэффициент;  $\varepsilon_i$  – удельная трудоёмкость работ;  $k_c$  – коэффициент серийности.

Эксплуатационные расходы по судну включают в себя следующие составляющие:

$$Z = k_{\text{доп}} \sum_{i=1}^7 Z_i + Z_8 + Z_9, \quad (15)$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент, учитывающий платежи на комплексное и хозяйственное обслуживание судна, а также прочие прямые расходы по судну;  $Z_1$  – оплата труда экипажа;  $Z_2$  – единый социальный налог;  $Z_3$  – бесплатное питание экипажа;  $Z_4$  – расходы на топливо;  $Z_5$  – расходы на смазочные и другие материалы;  $Z_6$  – расходы на ремонт судна;  $Z_7$  – расходы на износ малоценных и быстроизнашивающихся предметов;  $Z_8$  – плата по кредиту;  $Z_9$  – портовые сборы на морском участке. Величина сборов на речном участке эксплуатации учтена коэффициентом  $k_{\text{доп}}$ .

Объёмы выплат по кредиту могут существенно отличаться в зависимости от выбранных условий кредитования. В разработанной математической модели процентная ставка постоянна на протяжении всего срока возврата кредита, который составляет 10 лет.

Масса топлива, необходимая для работы судна в течении кругового рейса, учитывает работу главных двигателей в ходу и на манёврах, а также работу дизель генераторов во время стоянки и погрузки – выгрузки.

Продолжительность кругового рейса грузового судна можно представить суммой составляющих, которые описывают типичные операции его работы на линии:

$$t_a = t_x + t_{\text{сл}} + t_{\text{гр}} + t_m + t_{\text{тех}} + t_{\text{ож}}, \quad (16)$$

где  $t_x$  – ходовое время;  $t_{\text{сл}}$  – время шлюзования;  $t_{\text{гр}}$  – продолжительность погрузки выгрузки;  $t_m$  – время манёвров;  $t_{\text{тех}}$  – техническое время, связанное с оформлением документов;  $t_{\text{ож}}$  – время ожидания.

Эксплуатация судна на морском участке связана с вероятностью попадания рейса в шторм. Если высота волн будет более допустимой по классу Регистра, танкер должен будет находиться в порту, что увеличит время стоянки. При наличии допустимого волнения у судна произойдёт потеря скорости. В разработанной математической модели потеря скорости на волнении учитывается только на морском участке линии эксплуатации. На речном участке считается, что более существенное снижение скорости произойдёт вследствие влияния мел-

ководья, для чего введён коэффициент влияния ограниченного фарватера на остаточное сопротивление.

Таким образом, время хода представляется следующей суммой:

$$t_x = t_{\text{XM}} + t_{\text{XP}}, \quad (17)$$

где  $t_{\text{XM}}$  – время хода на морском участке в прямом и обратном рейсе;  $t_{\text{XP}}$  – время хода на речном участке в прямом и обратном рейс, определяемое по выражению (18).

$$t_{\text{XP}} = \sum_{i=1}^{n+1} \left( \frac{l_i}{v_{i,1}} + \frac{l_i}{v_{i,2}} \right), \quad (18)$$

где  $l_i$  – длина участка;  $v$  – скорость хода;  $n$  – количество участков мелководья.

Время хода на морском участке может быть представлено:

$$t_{\text{XM}} = \frac{l}{v_0} \cdot \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^m a_i + \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{v_0} a_i} \quad (19)$$

где  $l$  – длина морского участка;  $v_0$  – скорость хода на глубокой тихой воде;  $m$  – количество различных обеспеченностей волнения;  $a_i$  – повторяемость волнения с  $i$  обеспеченностью;  $\frac{v_i}{v_0}$  – потеря скорости на  $i$ -м участке.

По предложенной математической модели разработана программа, которая позволяет оптимизировать главные элементы танкеров смешанного (река-море) плавания. С целью проверки адекватности разработанной мат. модели были просчитаны элементы двух танкеров. Результаты расчёта представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Сопоставление результатов расчёта с реальным судном

	Проект	Расчёт	Проект	Расчёт
Класс	R2-RSN	R2-RSN	М-СП	М-СП
Водоизмещение, т	7670	7682	7750	7686
Длина по КВЛ, м	134,1	132	139	138
Ширина, м	16,6	16,6	16,6	16,6
Высота борта, м	6,1	6,27	6,1	6,33
Осадка в грузу на миделе, м	3,86	3,97	3,74	3,8
Коэффициент общей полноты	0,893	0,883	0,898	0,883
Мощность, кВт	1860	1870	1860	1870
Водоизмещение порожнём, т	2450	2548	2320	2211
Скорость, км/ч	18,6	20	18,6	20
Дедвейт, т	5220	5134	5430	5470

Как видно из таблицы, полученные результаты близки к реальным проектам, поэтому разработанную модель можно использовать для проектирования и исследования влияния различных параметров на показатель эффективности танкера.

С помощью разработанной программы было выполнено оценка зависимости показателя эффективности танкера от главных элементов. Поскольку некоторые характеристики танкера изменяются дискретно, то и функция цели получается не гладкой. Поэтому для определения общей тенденции при изменении параметров она была аппроксимирована линейной зависимостью. Некоторые из полученных результатов показаны на рис. 2, 3.

В качестве коэффициента сравнения судов использована относительная прибыль за год ( $\Pi/\Pi_B$ , где  $\Pi_B$  – прибыль от эксплуатации базового танкера).

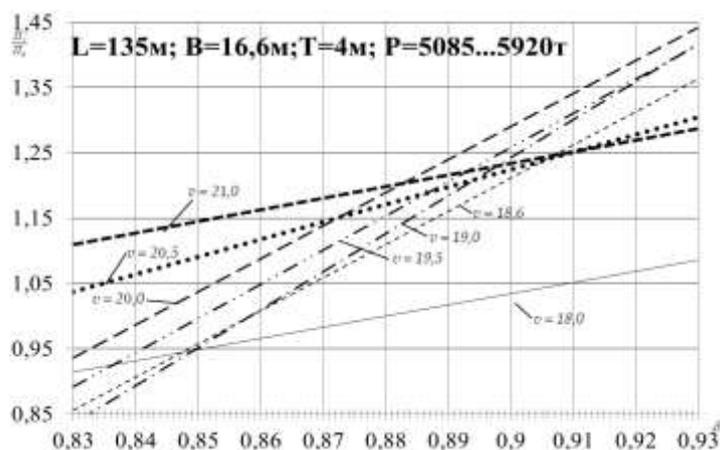


Рис. 2. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты и скорости хода при постоянных главных размерах

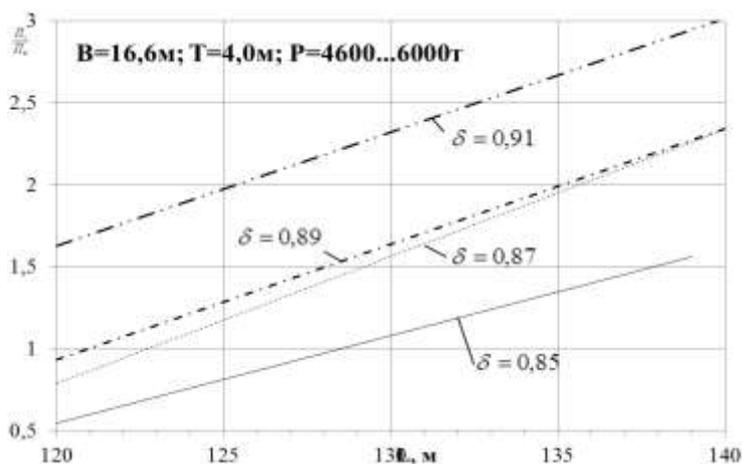


Рис. 3. Зависимость относительной прибыли танкера от коэффициента полноты и длины судна, при постоянной скорости хода, ширине и осадке

Аналогичные графики можно построить и для судов, имеющих постоянную грузоподъемность, варьируя главные элементы.

Полученные зависимости показывают, что с ростом коэффициента полноты эффективность судна повышается за счёт увеличения грузоподъемности судна. Увеличение главных размерений также положительно сказывается на эффективности танкера. В то же время увеличение скорости хода выше 20 км/ч снижает тенденцию этого роста. Иная картина наблюдается при сохранении грузоподъемности. В этом случае при некоторых значениях варьируемых параметров наблюдается падение относительной прибыли от эксплуатации судна, что связано с существенным ростом расходов на его эксплуатацию.

Полученные результаты во многом подтверждают практику проектирования последних лет, когда главные размерения судов смешанного плавания выбираются максимально возможными для линии «претендента».

#### Библиографический указатель

1. Кочнев, Ю.А. Анализ элементов и характеристик «малых» танкеров // 11-й международный научно-промышленный форум «Великие реки '2009»: труды конгресса.— Н. Новгород: ННГАСУ 2010. Т. 2. С. 300–303.

2. **Кочнев, Ю.А.** Математическая модель расчёта массы танкера смешанного (река-море) плавания // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 7–12.
3. Российский Речной Регистр. Правила. В 4-х томах. Т. 4. – М., 2008. – 406 с.
4. Правилами Классификации и постройки морских судов. В 2-х томах. Т. 1. 2008.

*Дата поступления  
в редакцию 09.11.2010*

**U.A. Kochnev**

### **OPTIMIZATION ELEMENTS OF TANKER ON INITIAL DESIGN STAGE**

Considered question optimization elements of tanker see-river fleet on initial design stage. Mathematical model of calculation are presented. Received of graphic dependences for evaluation influence of general elements on efficient factor.

*Key words:* tanker, general elements, mathematical model, optimality criterion.

УДК 539.4+539.37

Ю.В. Немировский, Т.П. Романова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН СО СВОБОДНЫМ ОТВЕРСТИЕМ ПРИ ИХ ДИНАМИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

В рамках модели идеального жесткопластического тела рассмотрен динамический изгиб произвольной полигональной шарнирно опертой или защемленной пластины с произвольным внутренним свободным отверстием под действием динамической нагрузки высокой интенсивности взрывного типа. Решения могут быть использованы в различных инженерных расчетах.

*Ключевые слова:* идеальное жесткопластическое тело, пластина, нагрузка взрывного типа, динамический изгиб, инженерные расчеты.

В рамках модели идеального жесткопластического тела и на основе общих идей, изложенных в [1], рассмотрим пластину с выпуклым  $n$ -угольным произвольным контуром  $L_1$ , у которого каждая сторона  $L_{i1}$  ( $i=1, \dots, n$ ) шарнирно опертая или защемленная. Длина  $L_{i1}$  равна  $a_i$ , угол между  $L_{i-1,1}$  и  $L_{i1}$  равен  $\varphi_i$ . В центральной части пластина имеет произвольное свободное отверстие  $L_2$  (рис. 1). На пластину действует равномерно распределенная по поверхности динамическая нагрузка взрывного типа высокой интенсивности  $P(t)$ , которая характеризуется мгновенным достижением максимального значения  $P_{\max} = P(0)$  в начальный момент времени  $t=0$  с последующим быстрым ее уменьшением.

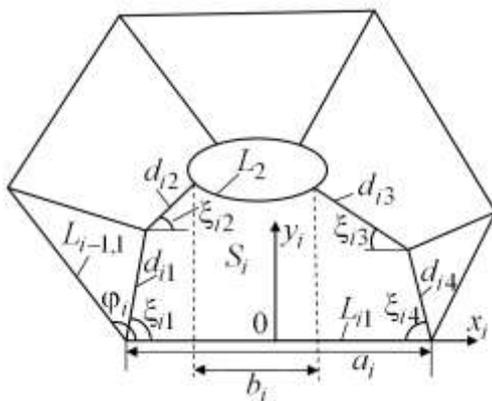


Рис. 1

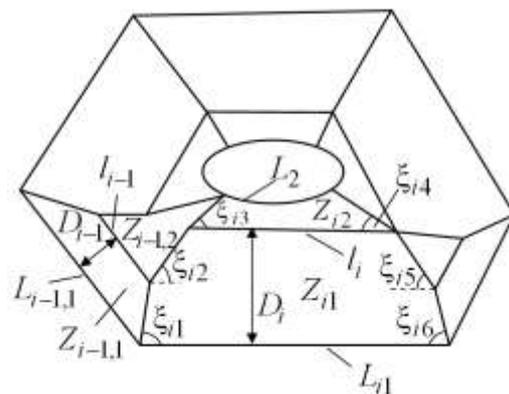


Рис. 2

Для такой пластины возможны две схемы деформирования в зависимости от  $P_{\max}$  [1]. При нагрузках, не превышающих предельные (“низких” нагрузках,  $P_{\max} < P_0$ ), пластина остается в покое. При нагрузках, незначительно превышающих предельные (“средних” нагрузках,  $P_0 < P_{\max} < P_1$ ), схему движения пластины можно представить в виде областей  $S_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), которые жестко вращаются вокруг опорных участков  $L_{i1}$  с угловой скоростью  $\dot{\alpha}_i$  (рис. 1). Области  $S_i$  разделены кусочно-линейными пластическими шарнирами. Назовем

схему при “средних” нагрузках схемой 1. При достаточно высоких значениях  $P_{\max}$  (“высоких” нагрузках,  $P_{\max} > P_1$ ) схема 1 переходит в схему 2 (см. [1]), в которой деформирование пластины сопровождается возникновением в областях  $S_i$  (возможно, не во всех) нестационарных пластических линейных шарниров  $l_i$ , движущихся поступательно (рис. 2). В схемах 1 и 2 нормальный изгибающий момент на внутренних шарнирных линиях равен предельному моменту  $M_0$ ; на участке  $L_{i1}$  ( $i=1, \dots, n$ ) он равен  $M_{nn} = -(1-\eta_i)M_0$ , где  $\eta_i = 0$  при защемлении  $L_{i1}$  и  $\eta_i = 1$  при его шарнирном опирании.

Уравнения движения пластины получим из принципа виртуальной мощности с использованием принципа Даламбера [1]:

$$K = A - N, \tag{1}$$

$$K = \iint_S \rho \ddot{u} \dot{u}^* ds, \quad A = \iint_S P(t) \dot{u}^* ds, \tag{2}$$

$$N = \sum_m \int_{l_m} M_m [\dot{\theta}^*]_m dl_m. \tag{3}$$

Здесь  $K$ ,  $A$ ,  $N$  – мощности инерционных, внешних и внутренних сил соответственно;  $S$  – площадь;  $\rho$  – поверхностная плотность материала пластины;  $u$  – прогиб;  $l_m$  – линии разрыва угловых скоростей;  $M_m$  – изгибающий момент на  $l_m$ ;  $[\dot{\theta}^*]_m$  – разрыв угловой скорости на  $l_m$ ;  $dl_m$  – элемент линии  $l_m$ . Величины с верхним индексом “\*” – допустимые скорости,  $(\ ) = \partial / \partial t$ .

Рассмотрим подробно схему 1. Обозначим длину линейных внутренних шарниров в области  $S_i$  через  $d_{ij}$  ( $i=1, \dots, n$ ,  $j=1, \dots, 4$ ), а их угол наклона к участку контура  $L_{i1}$  – через  $\xi_{ij}$  (рис. 1). Тогда

$$d_{ij} = d_{i-1, k+1-j}, \quad \xi_{ij} + \xi_{i-1, k+1-j} = \Phi_i, \quad (i=1, \dots, n, j=1, \dots, k/2), \tag{4}$$

где  $k=4$  для схемы 1 (и  $k=6$  для схемы 2). Везде считается  $(\bullet)_0 \equiv (\bullet)_n$ .

В каждой области  $S_i$  введем декартовую систему координат  $(x_i, y_i)$ , в которой ось  $x_i$  проходит по стороне  $L_{i1}$ , а ось  $y_i$  направлена внутрь пластины (рис. 1). Начало координат  $(x_i, y_i)$  выбирается произвольно на участке  $L_{i1}$ . Тогда скорости прогибов пластины для схемы 1 будут представлены в виде:

$$(x_i, y_i) \in S_i: \quad \dot{u}(x_i, y_i, t) = \dot{\alpha}_i(t) y_i. \quad (i=1, \dots, n). \tag{5}$$

Выражения (2), (3) принимают вид:

$$K = \rho \sum_{i=1}^n \ddot{\alpha}_i \dot{\alpha}_i^* \iint_{S_i} y_i^2 dy_i dx_i, \quad A = P(t) \sum_{i=1}^n \dot{\alpha}_i^* \iint_{S_i} y_i dy_i dx_i, \tag{6}$$

$$N = M_0 \sum_{i=1}^n \dot{\alpha}_i^* \left[ a_i (1 - \eta_i) + \sum_{j=1}^4 (d_{ij} \cos \xi_{ij}) \right] = M_0 \sum_{i=1}^n \dot{\alpha}_i^* [a_i (2 - \eta_i) - b_i], \tag{7}$$

где  $b_i(t)$  – проекция на контур  $L_{i1}$  свободной границы области  $S_i$ , которая является частью контура  $L_2$  (рис. 1):

$$b_i(t) = a_i - \sum_{j=1}^k d_{ij}(t) \cos \xi_{ij}(t) \quad (i=1, \dots, n, k=4 \text{ или } 6).$$

Подставляя выражения (6), (7) в (1), учитывая независимость  $\dot{\alpha}_i^*$ , получим

$$\rho \ddot{\alpha}_i \iint_{S_i} y_i^2 dy_i dx_i = P(t) \iint_{S_i} y_i dy_i dx_i - M_0 [a_i (2 - \eta_i) - b_i]. \quad (i = 1, \dots, n). \quad (8)$$

Условие непрерывности скоростей на границах областей  $S_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) дает

$$\dot{\alpha}_i d_{i1} \sin \xi_{i1} = \dot{\alpha}_{i-1} d_{i1} \sin \xi_{i-1,4},$$

тогда справедливо

$$\dot{\alpha}_i = \dot{\alpha}_{i-1} \sin \xi_{i-1,4} / \sin \xi_{i1}. \quad (i = 1, \dots, n-1). \quad (9)$$

Начальные условия для  $\dot{\alpha}_i$ ,  $\alpha_i$  имеют вид

$$\dot{\alpha}_i(0) = \alpha_i(0) = 0. \quad (i = 1, \dots, n). \quad (10)$$

Величины  $d_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, 4$ ) в общем случае являются функциями времени. Система (8), (9), (4) с начальными условиями (10) и  $d_{ij}(0) = d_{ij}^0$ ,  $\xi_{ij}(0) = \xi_{ij}^0$  описывает поведение пластины при деформировании по схеме 1. Начальные значения  $d_{ij}^0$ ,  $\xi_{ij}^0$  определяются в зависимости от величины  $P_{\max}$ , как это будет показано ниже.

Предельную нагрузку  $P_0$  определим из (8) при  $\ddot{\alpha}_i = 0$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Тогда получим

$$P = M_0 [a_i (2 - \eta_i) - b_i] / \iint_{S_i} y_i dy_i dx_i. \quad (i = 1, \dots, n). \quad (11)$$

Из (11) имеем следующие  $n-1$  равенств:

$$\frac{a_i(2 - \eta_i) - b_i}{\iint_{S_i} y_i dy_i dx_i} = \frac{a_{i+1}(2 - \eta_{i+1}) - b_{i+1}}{\iint_{S_{i+1}} y_{i+1} dy_{i+1} dx_{i+1}}. \quad (i = 1, \dots, n-1). \quad (12)$$

Из (4), (12) можно все функции  $d_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$  выразить через одну, например,  $\xi_{11}$ :

$$d_{ij} = F_{ij}(\xi_{11}), \quad \xi_{ij} = G_{ij}(\xi_{11}). \quad (i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, 4). \quad (13)$$

Тогда из (11) следует, что предельная нагрузка  $P_0$  равна

$$P_0 = M_0 \min_{\xi_{11}} [a_1 (2 - \eta_1) - b_1] / \iint_{S_1} y_1 dy_1 dx_1, \quad (14)$$

где величины  $d_{1j}$ ,  $\xi_{1j}$ , определяющие область  $S_1$ , выражены через  $\xi_{11}$ . Значение функций  $d_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, 4$ ) при действии предельной нагрузки  $P_0$  обозначим через  $d_{ij}^p$ ,  $\xi_{ij}^p$ . Тогда величина  $\xi_{11}^p$  определяется как значение  $\xi_{11}$ , на котором реализуется минимум в выражении (14), а остальные  $d_{ij}^p$ ,  $\xi_{ij}^p$  определяются по  $\xi_{11}^p$  из соотношений (13).

Начальные значения  $d_{ij}^0$ ,  $\xi_{ij}^0$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, 4$ ) для схемы 1 определяются по  $P_{\max}$  из (4) и системы (11) при  $t = 0$ , которая примет вид (где  $S_i^0$  – это  $S_i$  при  $t = 0$ ):

$$P_{\max} = M_0 [a_i (2 - \eta_i) - b_i] / \iint_{S_i^0} y_i dy_i dx_i. \quad (i = 1, \dots, n).$$

Рассмотрим схему 2 (рис. 2). Обозначим часть области  $S_i$  между отрезками  $L_{i1}$  и  $l_i$  через  $Z_{i1}$ , а оставшуюся часть – через  $Z_{i2}$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Поскольку шарнир  $l_i$  движется поступательно, то все его точки движутся с одинаковой скоростью, которую обозначим через  $\dot{w}_i(t)$ . Из непрерывности скоростей на  $l_i$  следует, что  $l_i \parallel L_{i1}$ , и расстояние  $D_i$  между  $L_{i1}$  и  $l_i$  не зависит от координат  $(x_i, y_i)$ , а является только функцией времени. Обозначим скорость поворота области  $Z_{i2}$  вокруг шарнира  $l_i$  через  $\dot{\beta}_i$ . Тогда скорости прогибов пластины для схемы 2 будут представлены в виде:

$$\begin{aligned} (x_i, y_i) \in Z_{i1}: \quad \dot{u}(x_i, y_i, t) &= \dot{\alpha}_i(t) y_i, \quad (i=1, \dots, n) \\ (x_i, y_i) \in Z_{i2}: \quad \dot{u}(x_i, y_i, t) &= \dot{w}_i(t) + \dot{\beta}_i(t)(y_i - D_i). \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнения движения пластины для схемы 2 получим из (1). Если шарниры  $l_i$  возникли во всех областях  $S_i$ , то выражения (2) имеют вид:

$$\begin{aligned} K &= \rho \sum_{i=1}^n \left\{ \ddot{\alpha}_i \dot{\alpha}_i^* \iint_{Z_{i1}} y_i^2 dy_i dx_i + \iint_{Z_{i2}} [\ddot{\beta}_i (y_i - D_i) + \ddot{w}_i] [\dot{\beta}_i^* (y_i - D_i) + \dot{w}_i^*] dy_i dx_i \right\} = \\ &= \rho \sum_{i=1}^n \left\{ \ddot{\alpha}_i \dot{\alpha}_i^* \iint_{Z_{i1}} y_i^2 dy_i dx_i + \dot{\beta}_i^* \left[ \ddot{\beta}_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i)^2 dy_i dx_i + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \ddot{w}_i \iint_{Z_{i1}} (y_i - D_i) dy_i dx_i \right] + \dot{w}_i^* \left[ \ddot{\beta}_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i + \ddot{w}_i \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i \right] \right\}, \\ A &= P(t) \sum_{i=1}^n \left[ \dot{\alpha}_i^* \iint_{Z_{i1}} y_i dy_i dx_i + \dot{w}_i^* \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i + \dot{\beta}_i^* \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Учитывая что  $[\dot{\theta}^*]_{l_i} = |\dot{\alpha}_i^* - \dot{\beta}_i^*|$ , а  $\dot{\alpha}_i^* \geq \dot{\beta}_i^*$  ( $i=1, \dots, n$ ) (как и в [1, 2]), получим, что полная мощность внутренних сил (3) имеет выражение

$$N = M_0 \sum_{i=1}^n \left[ \dot{\alpha}_i^* (2 - \eta_i) a_i - \dot{\beta}_i^* b_i \right]. \quad (17)$$

Подставляя выражения (16) – (18) в равенство (1) и учитывая независимость функций  $\dot{\alpha}_i^*$ ,  $\dot{\beta}_i^*$ ,  $\dot{w}_i^*$ , получим следующие уравнения: ( $i=1, \dots, n$ )

$$\rho \ddot{\alpha}_i \iint_{Z_{i1}} y_i^2 dy_i dx_i = P(t) \iint_{Z_{i1}} y_i dy_i dx_i - M_0 (2 - \eta_i) a_i, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \rho \ddot{\beta}_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i)^2 dy_i dx_i + \rho \ddot{w}_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i &= \\ = P(t) \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i + M_0 b_i, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\rho \ddot{\beta}_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i + \rho \ddot{w}_i \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i = P(t) \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i. \quad (21)$$

После преобразований уравнения (20), (21) приводятся к виду: ( $i=1, \dots, n$ )

$$\rho \ddot{\beta}_i = M_0 b_i \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i / Q_i, \quad (Q_i = \iint_{Z_{i2}} dy_i dx_i \iint_{Z_{i2}} y_i^2 dy_i dx_i - (\iint_{Z_{i2}} y_i dy_i dx_i)^2 > 0) \quad (22)$$

$$\rho \ddot{w}_i = P(t) - M_0 b_i \iint_{Z_{i2}} (y_i - D_i) dy_i dx_i / Q_i. \quad (23)$$

Из непрерывности скоростей на границах областей  $Z_{i1}$  и  $Z_{i2}$ ,  $Z_{i2}$  и  $Z_{i-1,2}$  имеем

$$\dot{\alpha}_i D_i = \dot{w}_i, \quad (i=1, \dots, n) \quad (24)$$

$$\dot{\beta}_i = \dot{\beta}_{i-1} \psi_i, \quad \dot{\alpha}_i = \dot{\alpha}_{i-1} \omega_i, \quad (25)$$

где функции  $\psi_i$ ,  $\omega_i$  зависят от геометрических размеров областей  $Z_{i1}$ ,  $Z_{i2}$ .

Система уравнений (19), (22) – (25), (4) описывает поведение пластины в случае деформирования по схеме 2. Начальные условия имеют вид (10) и

$$\dot{\beta}_i(0) = \dot{\beta}_i(0) = \dot{w}_i(0) = \dot{w}_i(0) = 0 \quad (i=1, \dots, n).$$

Нагрузка  $P_1$ , при превышении которой реализуется схема 2, и начальные значения  $D_0 = D(0)$ ,  $d_{ij}^0$ ,  $\xi_{ij}^0$  ( $i=1, \dots, n$ ,  $j=1, \dots, 4$ ) при  $P_{\max} > P_1$ , определяются далее.

Возможно, что при  $P_{\max} \geq P_1$  шарнир  $l_i$  возникает не во всех областях  $S_i$ . В тех областях  $S_j$ , где шарнира  $l_j$  нет, движение описывается уравнениями схемы 1: (8), (9), (4) при соответствующих значениях  $i = j$ . В остальных областях поведение описывается уравнениями схемы 2: (19), (22) – (25), (4). Из условия непрерывности скоростей на границе областей  $S_j$ , движущихся по схеме 1, и областей  $S_k$ , деформирующихся по схеме 2, получим:

$$\dot{\alpha}_k = \dot{\alpha}_j \delta_k, \quad \dot{\beta}_k = \dot{\alpha}_j \kappa_k,$$

где  $\delta_k, \kappa_k$  – функции от геометрических размеров областей  $S_j$  и  $S_k$ .

При отсутствии отверстия ( $b_i = 0, i = 1, \dots, n$ ) области  $Z_{i2}$  сливаются в одну область и, как видно из (23), движутся поступательно с одинаковой скоростью  $\dot{w}_i = P(t) / \rho$ .

Рассмотрим определение нагрузки  $P_1$ . Пусть пластина в силу симметрии имеет в схеме 2 три типа областей, например, как на рис. 3, где  $\varphi_i = \varphi = \text{const}$  (при  $\varphi = \pi/2$  пластина будет прямоугольной). В схеме 2 на рис. 3 шарнир  $l_1$  возник в области  $S_1$  и разбил ее на две области  $Z_{11}$  и  $Z_{12}$ , а в области  $S_2$  такого шарнира нет. Пусть  $P_{11}$  – нагрузка, при превышении которой пластина начнет деформироваться таким образом. Поведение определяется уравнениями (8) при  $i = 2$  и (19), (22) – (24) при  $i = 1$  и

$$\dot{\alpha}_1 = \dot{\alpha}_2 \sin(\varphi - \xi_{11}) / \sin \xi_{11}, \tag{26}$$

$$\dot{\beta}_1 = \dot{\alpha}_2 \sin(\varphi - \xi_{12}) / \sin \xi_{12}, \tag{27}$$

$$\xi_{1j} + \xi_{2j} = \varphi, \quad (j = 1, 2), \tag{28}$$

где  $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\beta}_1, \dot{w}_1, D_1, \xi_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) – девять неизвестных функций времени.

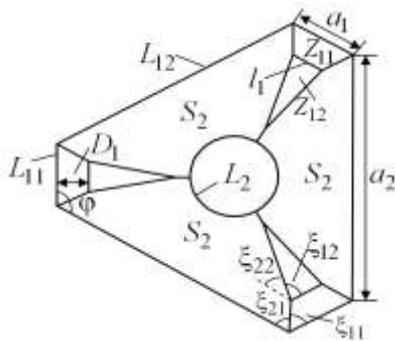


Рис. 3

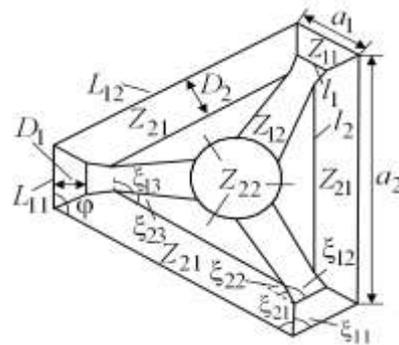


Рис. 4

Дифференцируя (24) при  $i = 1$  по времени, имеем выражение

$$\ddot{\alpha}_1 D_1 + \dot{\alpha}_1 \dot{D}_1 = \dot{w}_1,$$

которое подставляем в (23), (19) при  $i = 1$ . При  $t = 0$  из полученного равенства следует

$$\frac{P_{\max}}{M_0} = \frac{(2 - \eta_1) a_1 D_1^0 - b_1 \iint_{Z_{11}^0} y_1^2 dy_1 dx_1 \iint_{Z_{12}^0} (y_1 - D_1^0) dy_1 dx_1 / Q_1^0}{D_1^0 \iint_{Z_{11}^0} y_1 dy_1 dx_1 - \iint_{Z_{11}^0} y_1^2 dy_1 dx_1}, \tag{29}$$

где верхним индексом 0 обозначены области и функции при  $t = 0$ .

Дифференцируя (26) по времени, имеем равенство

$$\ddot{\alpha}_1 = \ddot{\alpha}_2 \sin(\varphi - \xi_{11}) / \sin \xi_{11} - \dot{\alpha}_2 \dot{\xi}_{11} \sin \varphi / \sin^2 \xi_{11},$$

которое подставляем в (19) при  $i=1$  и (8) при  $i=2$ . При  $t=0$  из полученного выражения следует

$$\frac{P_{\max}}{M_0} = \frac{(2-\eta_1)a_1 \iint_{S_2^0} y_2^2 dy_2 dx_2 - [a_2(2-\eta_2) - b_2] \frac{\sin(\varphi - \xi_{11}^0)}{\sin \xi_{11}^0} \iint_{Z_{11}^0} y_1^2 dy_1 dx_1}{\iint_{Z_{11}^0} y_1 dy_1 dx_1 \iint_{S_2^0} y_2^2 dy_2 dx_2 - \frac{\sin(\varphi - \xi_{11}^0)}{\sin \xi_{11}^0} \iint_{S_2^0} y_2 dy_2 dx_2 \iint_{Z_{11}^0} y_1^2 dy_1 dx_1}. \quad (30)$$

Дифференцируя (27) по времени, имеем выражение,

$$\ddot{\beta}_1 = \ddot{\alpha}_2 \sin(\varphi - \xi_{12}) / \sin \xi_{12} - \dot{\alpha}_2 \dot{\xi}_{12} \sin \varphi / \sin^2 \xi_{12},$$

которое подставляем в (22) при  $i=1$  и (8) при  $i=2$ .

При  $t=0$  из полученного соотношения следует

$$\frac{P_{\max}}{M_0} = \frac{a_2(2-\eta_2) - b_2 + b_1 \sin \xi_{12}^0 \iint_{Z_{12}^0} dy_1 dx_1 \iint_{S_2^0} y_2^2 dy_2 dx_2 / [\sin(\varphi - \xi_{12}^0) Q_1^0]}{\iint_{S_2^0} y_2 dy_2 dx_2}. \quad (31)$$

Поскольку при  $P_{\max} = P_{11}$  схема 1 переходит в схему 2, то при этом должно выполняться условие  $\dot{\alpha}_1 = \dot{\beta}_1$ . Тогда из этого равенства и (19), (22) при  $i=1$  получим

$$\frac{P_{11}}{M_0} \iint_{Z_{11}^b} y_1 dy_1 dx_1 = (2-\eta_1)a_1 + b_1 \iint_{Z_{11}^b} y_1^2 dy_1 dx_1 \iint_{Z_{12}^b} dy_1 dx_1 / Q_1^b, \quad (32)$$

где верхний индекс  $b$  обозначает, что области и функции определены при  $D_1 = D_1^b$ ,  $\xi_{ij} = \xi_{ij}^b$  ( $i, j = 1, 2$ ), которые являются значениями  $D_1$  и  $\xi_{ij}$  при нагрузке  $P_{\max} = P_{11}$ .

Из системы уравнений (29) – (31) при  $P_{\max} = P_{11}$  и (32), (28) определяются значения  $P_{11}$ ,  $D_1^b$ ,  $\xi_{ij}^b$  ( $i, j = 1, 2$ ). А из системы (28) – (31) по величине  $P_{\max}$  определяются начальные значения  $D_1^0$ ,  $\xi_{ij}^0$ .

Поскольку заранее неизвестно, в какой из областей  $S_1$  или  $S_2$  возникнет пластический шарнир  $l_1$  или  $l_2$ , соответственно, то следует также рассмотреть случай, когда сначала в области  $S_2$  возникает пластический шарнир  $l_2$ , а в области  $S_1$  его нет. Нагрузку  $P_{\max}$ , соответствующую появлению шарнира  $l_2$  в области  $S_2$ , обозначим через  $P_{12}$ . Величина  $P_{12}$  определяется аналогично вычислению значения  $P_{11}$ . Тогда

$$P_1 = \min(P_{11}, P_{12}).$$

При нагрузке  $P_{\max} > P_1$  возможно возникновение пластического шарнира  $l_1$  (или  $l_2$ ) и в той области  $S_1$  (или  $S_2$ ), в которой его не было при  $P_{\max} = P_1$  (рис. 4). Поведение пластины в этом случае описывается уравнениями (19), (22) – (24) при  $i=1, 2$ , (26), (27), (28) при  $j=1-3$  и

$$\dot{\beta}_1 = \dot{\beta}_2 \sin(\varphi - \xi_{13}) / \sin \xi_{13},$$

где углы  $\xi_{13}$ ,  $\xi_{23}$  изображены на рис. 4. Нагрузка  $P_2$ , соответствующая началу развития схемы 2 с шарнирами  $l_1$  и  $l_2$ , изображенной на рис. 4, вычисляется аналогично нагрузке  $P_{11}$ , учитывая, что при этом выполняется  $\dot{\alpha}_2 = \dot{\beta}_2$ .

Уравнения, описывающие динамическое поведение пластины, решаются численно методом Рунге-Кутты. Для одинаково закрепленного правильного полигонального контура такой анализ подробно рассмотрен в [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума СО РАН (Постановление № 10 от 15.01.09, номер проекта 15).

#### Библиографический список

1. **Немировский, Ю.В.** Моделирование динамического поведения жесткопластической криволинейной пластины с произвольным свободным отверстием / Ю.В. Немировский, Т.П. Романова // Теоретическая и прикладная механика: Международный научно-технический сборник, Белорусский Национальный тех. ун-т. 2007. № 23. С. 26–34.
2. **Немировский, Ю.В.** Динамика жесткопластической правильной полигональной пластины с отверстием под действием взрывных нагрузок / Ю.В. Немировский, Т.П. Романова // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. ст. 9-й Всероссийской науч. конф. – Новокузнецк. 2008. В 3 т. Т. 1. С. 93–97.

*Дата поступления  
в редакцию 09.11.2010*

**Y.V. Nemirovsky, T.P. Romanova**

#### **PHYSICAL MODELING OF VESSEL MOTION IN BROKEN ICE**

In the framework of ideal rigid-body discussed dynamic bending of the plate. Consider a plate with an arbitrary inner hole that is under the influence of dynamic loading of high-intensity explosive type. Solutions can be used in a variety of engineering calculations.

*Key words:* ideal rigid body, plate, load of explosive type, dynamic bending, engineering calculations.

УДК 621.43

Л.А. Захаров<sup>1</sup>, С.Н. Хрунков<sup>1</sup>, А.К. Лимонов<sup>2</sup>**МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА  
ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «РУМО», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Рассматриваются современные конструктивные решения, обеспечивающие управление процессами газообмена в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Приводятся теоретические обоснования применяемой модели процессов газообмена, основанной на нестационарном квазиодномерном изэнтропийном представлении. Сделаны практические выводы о целесообразности методов регулирования фаз газораспределения.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, газообмен, численное моделирование, конструкция ДВС.

Термины «современный двигатель» и «система регулирования фаз газораспределения» уже стали устойчивым словосочетанием. Моторы с такими механизмами есть почти у всех производителей. Механизмы управления процессами газообмена (путем регулирования фаз газораспределения) в современных двигателях обеспечивают формирование внешних скоростных и нагрузочных характеристик ДВС. Однако все существующие системы управления клапанами обладают ограниченными функциональными возможностями.

Под фазами газораспределения понимают моменты начала открытия и конца закрытия отверстий органов газораспределения, выраженные в градусах угла поворота коленчатого вала относительно мертвых точек. При работе любого двигателя внутреннего сгорания происходящие в нем процессы (впуск, сгорание, выпуск) обладают определенной инерционностью. Поэтому отверстия открываются не точно в верхней или нижней мертвых точках, а заблаговременно. Но обороты двигателя меняются в очень широких пределах, скорость всасываемого воздушного потока и потока отработавших газов тоже меняются, соответственно для улучшения наполнения цилиндров свежей порцией рабочего тела и очистки от продуктов сгорания нужно постоянно изменять момент и время открытия и закрытия отверстий. Это напрямую влияет на основные характеристики двигателя в широких диапазонах скоростных и нагрузочных характеристик. В настоящее время используют два варианта регулирования: смещение моментов открытия и закрытия отверстий и масштабирование (обычно с изменением подъема клапана).

За характер двигателя в конечном итоге отвечает «механический мозг» — распределительный вал, так как поменять рабочий объем двигателя, сечения каналов и так далее дорого и порой нецелесообразно. Значит, меняя характеристики распределительного вала можно менять поведение двигателя.

Исходя из теории и практики, можно сделать общие выводы:

1. Чем меньше угол перекрытия клапанов, тем лучше наполнение на низких частотах вращения, так как свежая смесь не перетекает в выпускной коллектор через открытый выпускной клапан и, соответственно, отработанные газы не попадают во впускной. С увеличением угла перекрытия клапанов максимум наполнения сдвигается в зону высоких оборотов.

2. Чем больше угол опаздывания закрытия впускного отверстия, тем лучше наполнение за счет дозарядки, и тем хуже момент на низких частотах за счет выталкивания поршнем свежей смеси обратно во впускной коллектор.

3. Чем острее кулачек, тем меньше время-сечение максимального подъема клапана, тем хуже наполнение во всем диапазоне частот.

4. Вал с расширенными фазами опаздывания впуска (отдача в диапазоне 4000–7000 мин.<sup>-1</sup>) не обеспечивает отдачу в диапазоне 1500–3000 мин.<sup>-1</sup>.

5. Для увеличения продолжительности открытия впускного отверстия его обычно открывают до прихода поршня в верхнюю мертвую точку и на больших частотах вращения коленчатого вала (близких к максимальным) наполнение во время основного впуска понижается. Однако эти потери компенсируются дозарядкой.

6. Увеличение длины впускного трубопровода способствует возрастанию сил инерции, действующих в объеме рабочей смеси, находящейся в органах впуска. Это увеличивает наполнение на низких частотах и повышает сопротивление впускного тракта на высоких частотах, что не может быть компенсировано дозарядкой.

Оптимальный угол закрытия впускного клапана выбирают, учитывая два противоположных явления: с одной стороны, при увеличении угла заметно возрастает время-сечение впускного отверстия, и наполнение улучшается, с другой же стороны, возможен обратный выброс заряда. Оптимальный угол выбирают в сочетании с силами инерции и колебаниями рабочего тела в органах впуска за счет оптимальной длины и диаметра впускного трубопровода для определенных скоростных и нагрузочных режимов работы. Оптимальные размеры и высоту подъема клапана выбирают с учетом диаметра цилиндра и инерционных сил (при увеличении длины хода клапана необходимо увеличивать жесткость пружин, а это отрицательно влияет на долговечность кулачка)

Начало открытия выпускного отверстия устанавливают таким, чтобы получить наибольшую полезную работу газов в цилиндре. В случае чрезмерно большого угла предварения выпуска полезная работа за такт расширения заметно уменьшается, а если угол предварения слишком мал, то значительно возрастает отрицательная работа газов в процессе принудительного выпуска. С ростом частоты вращения коленчатого вала угол предварения выпуска должен увеличиваться.

Большое влияние на показатели рабочего процесса оказывает количество остаточных газов в цилиндре. Если на режимах повышенных нагрузок для получения наибольшей мощности целесообразна полная очистка цилиндров от продуктов сгорания, то при работе на малых нагрузках и холостых ходах улучшение рабочего процесса достигается рециркуляцией отработавших газов. Это особенно актуально для двигателей с непосредственным впрыском топлива, эксплуатируемых при низкой температуре окружающего воздуха, ввиду высоких значений коэффициента избытка воздуха. Многочисленными исследованиями установлено, что рециркуляция газов является действенным средством снижения уровня токсичности выхлопа. Универсальным способом регулирования количества остаточных газов в цилиндре может служить управление фазами перекрытия клапанов.

Существующие системы применяются для управления либо впускными клапанами, либо впускными и выпускными. Некоторые производители используют устройства, которые обеспечивают не только трансформацию собственно моментов открытия и закрытия отверстий, но и регулировку степени их открытия. Для управления фазами газораспределения применяют либо гидравлический привод, использующий давление масла в системе смазки, либо электропривод (управление при помощи специального электродвигателя). Различные компании употребляют разные термины для обозначения систем регулировки фаз газораспределения

Система изменения фаз газораспределения (*VTC – Variable Timing Control*) позволяет изменять фазы газораспределения в зависимости от условий работы, для получения максимальной мощности и уменьшения токсичности отработавших газов. Система изменяет фазы газораспределения посредством изменения углового положения распределительного вала впускных клапанов.

Основным отличием является то, что система изменяет фазы газораспределения постоянно – плавно, в зависимости от условий работы. На рис. 1 наглядно представлено, что момент открытия впускного клапана изменяется на 50 градусов в сторону опережения.

При большом угле перекрытия клапанов уменьшаются насосные потери, в результате увеличивается топливная экономичность. Также имеет место «эффект рециркуляции отработавших газов» (*EGR effect*). Данный эффект достигается организацией закрутки потоков таким образом, чтобы часть отработавших газов поступала обратно в камеру сгорания, в результате чего уменьшается температура сгорания в соответствии с увеличением доли отработавших газов, что приводит к уменьшению выбросов окислов азота ( $NO_x$ ) и углеводородов ( $HC$ ).

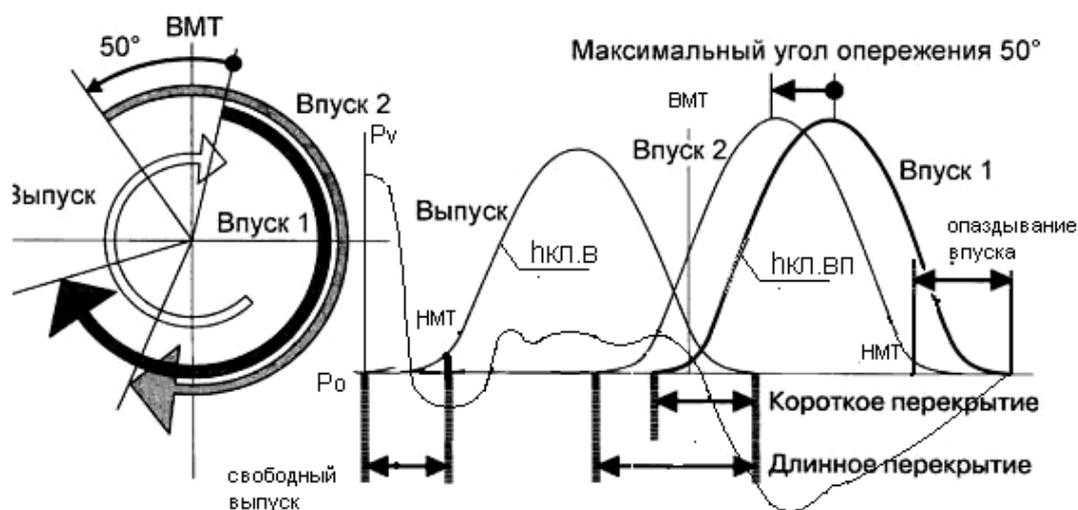


Рис. 1. Регулирование фазами газораспределения

Фазы газораспределения впускных клапанов регулируются по программе, заложенной в блоке управления. Регулировка осуществляется с помощью муфты системы изменения фаз газораспределения, установленной на распределительном вале впускных клапанов и электропневмоклапана системы изменения фаз газораспределения. В зависимости от необходимости увеличения или уменьшения времени открытия впускных клапанов электропневмоклапан подает масло под давлением в отверстие для управления опережением или в отверстие для управления запаздыванием в муфте. Муфта действует на распределительный вал выпускных клапанов, в результате чего впускные отверстия открываются либо раньше, либо позже.

Система *VTEC*, используемая на более экономичных современных автомобилях, позволяет изменять высоту подъема как впускных, так и выпускных клапанов.

Основными элементами, на которых базируется идеология системы *VTEC*, является распределительный вал с несколькими кулачками на один клапан или пару клапанов и коромысла, оббегающие каждый кулачок распределительного вала.

Таблица 1

Совместное управление системами

Режим	№	Функции	Эффект
Холостой ход	1	Перекрытие клапанов уменьшается для минимизации обратного выброса отработавших газов во впускной канал	Начальный угол открытия впускного клапана (позднее открытие)
Средняя нагрузка	2	Перекрытие клапанов увеличивается, при этом снижаются "насосные" потери и часть отработавших газов поступает на впуск	Изменения угла открытия впускного клапана в сторону опережения
Большая нагрузка	3	Перекрытие клапанов оптимизируется по углу поворота, для улучшения пополнения и обеспечения кривой крутящего момента	Максимальный угол опережения открытия впускного клапана

Система VVT-i (*Variable Valve Timing intelligent* — изменения фаз газораспределения) позволяет плавно изменять фазы газораспределения в соответствии с условиями работы двигателя. Это достигается путем поворота распределительного вала впускных клапанов относительно вала выпускных в диапазоне 40-60° (по углу поворота коленчатого вала). В результате изменяется момент начала открытия впускных отверстий и величина времени «перекрытия».

Когда двигатель заглушен, то устанавливается максимальный угол задержки (то есть угол, соответствующий наиболее позднему открытию и закрытию впускных клапанов) для устойчивой работы.

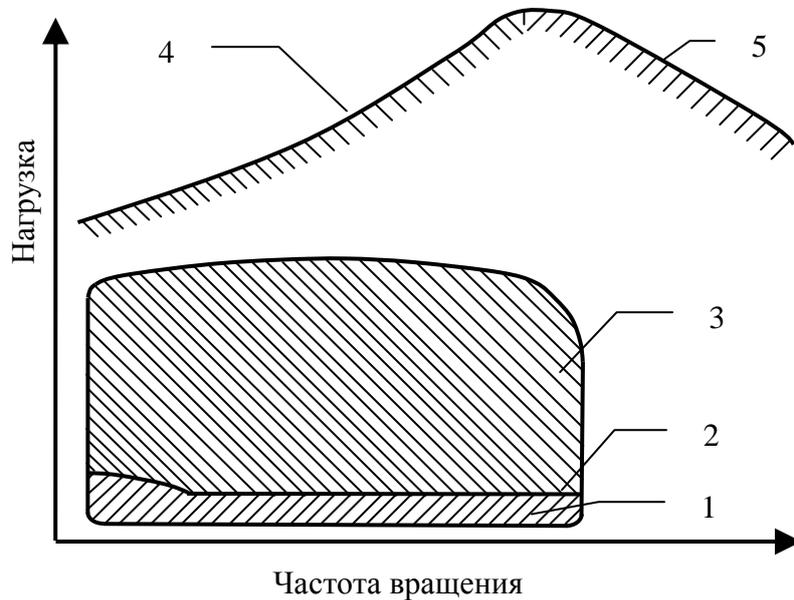


Рис. 2. Эксплуатационные режимы поршневого ДВС

Таблица 2

Эксплуатационные режимы ПДВС и управление органами впуска

Режим	№	Фазы	Функции	Эффект
1	2	3	4	5
Холостой ход	1		Установлен угол поворота распределительного вала, соответствующий самому позднему началу открытия впускных клапанов (максимальный угол задержки).	Двигатель стабильнее работает на холостом ходу, снижается расход топлива «Перекрытие» клапанов минимально, обратное поступление газов на впуск минимально.
Низкая нагрузка	2		Перекрытие клапанов уменьшается для минимизации обратного поступления газов на впуск	Повышается стабильность работы двигателя
Средняя нагрузка	3		Перекрытие клапанов увеличивается, при этом снижаются «насосные» потери и часть отработавших газов поступает на впуск	Улучшается топливная экономичность, снижается эмиссия NOx

Окончание табл. 2

Высокая нагрузка, частота вращения ниже средней	4		Обеспечивается раннее закрытие впускных клапанов для улучшения наполнения цилиндров	Возрастает крутящий момент на низких и средних оборотах
Высокая нагрузка, высокая частота вращения	5		Обеспечивается позднее закрытие впускных клапанов для улучшения наполнения на высоких оборотах	Увеличивается максимальная мощность
При низкой температуре охлаждающей жидкости			Устанавливается минимальное перекрытие для предотвращения потерь топлива	Стабилизируется повышенная частота вращения холостого хода, улучшается экономичность
При запуске и остановке			Устанавливается минимальное перекрытие для предотвращения попадания отработавших газов на впуск	Улучшается запуск двигателя

Одной из самых совершенных конструкций газораспределительного механизма признана система *Double VANOS* (высота подъема клапана, регулируемая дополнительным валом). Здесь оба распределительных вала, управляющие соответственно впускными и выпускными клапанами, могут поворачиваться относительно начального положения, изменяя моменты начала впуска и выпуска (длина фаз, определяемая профилем вала, постоянна), а также продолжительность перекрытия клапанов (фаза, когда впускной и выпускной клапаны открыты одновременно). Но даже она создает оптимальные условия работы мотора только на полном дросселе. В иных режимах поток воздуха ограничивает дроссельная заслонка. Именно она определяет количество воздуха, поступающее в двигатель, на основании которого электроника управления впрыском и зажиганием рассчитывает количество бензина и остальные параметры.

При работе двигателя на режимах частичной нагрузки от дроссельной заслонки один убыток – она создает во впускном трубопроводе дополнительное сопротивление, которое ухудшает наполнение цилиндров. Идеальным вариантом было бы открывать впускной клапан только на время, необходимое, чтобы достичь нужного наполнения цилиндра горючей смесью. В результате появилась механическая система управления не только фазами, но и подъемом впускных клапанов. К уже стандартной системе *Double VANOS* добавился механизм, изменяющий высоту подъема впускных клапанов. Проведенные испытания показали, что средний расход топлива двигателем без дроссельной заслонки, измеренный по методике *EU 93/116*, по сравнению с обычным мотором ниже на 15%.

Таким образом, успехи, достигнутые производителями поршневых двигателей внутреннего сгорания, делают особенно актуальной в настоящее время задачу создания теоретической базы, позволяющей осознанно управлять процессами газообмена.

Моделирование процессов газообмена ведётся на основании наиболее употребительной для этого случая физической модели квазиодномерного нестационарного изоэнтропий-

ного течения газа, описываемой уравнениями законов сохранения массы и импульса и уравнением адиабаты Пуассона:

$$\left\{ \begin{array}{l} -F \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho \cdot W \cdot F}{\partial x} \\ -\rho \cdot \frac{\partial W}{\partial t} = \rho \cdot W \cdot \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{p}{\rho^k} = \text{const} \end{array} \right. \quad (1)$$

Правомерность применений данной физической модели обуславливается нестационарными граничными условиями у прилегающего к цилиндру сечения органов впуска и выпуска, порождаемыми сугубо нестационарным характером совместной работы КШМ и ГРМ, большой, относительно поперечных размеров, длиной газовых каналов и относительным тепловым равновесием, установившимся после свершения двигателем множества циклов, между органами впуска и выпуска и потоком рабочего тела.

При открытии запорных элементов органов выпуска начнётся истечение рабочего тела, находившегося ранее в цилиндре, в органы выпуска. Вытекающий из цилиндра газ вытеснит из начального участка трубопровода некоторое количество рабочего тела, находившегося там до начала истечения. Очевидно, что при этом произойдёт сжатие вытесняемого рабочего тела, так как объём, занимаемый возмущённой массой газа, уменьшится. Возникающее при этом возмущение (сжатие газа) будет распространяться по трубе.

Разобьем мысленно область возмущенного газа на большое число объемов близкими друг к другу, перпендикулярными к оси трубы плоскими сечениями, каждому из которых соответствуют свои значения возмущенных параметров газа и скорости распространения по отношению к газу. Можно предположить, что распределение возмущений вдоль оси в каждый момент непрерывно, то есть в двух достаточно близких друг к другу сечениях параметры газа мало разнятся между собой. Тогда, представляя движение газа в данном сечении как относительное в системе координат, движущейся поступательно и равномерно со скоростью газа в смежном сечении, можем в такой Галилеевой системе применять теорию распространения малых возмущений. Это позволит утверждать, что скорость распространения возмущений в каждом сечении равна местной скорости звука.

Таким образом, распространение возмущений можно рассматривать как совокупность непрерывно следующих друг за другом звуковых волн, причем каждая последующая волна перемещается по газу, возмущенному предыдущими волнами. Но в рассматриваемом изоэнтропическом движении сжатие газа сопровождается его подогреванием, а скорость распространения возмущений возрастает с температурой. Отсюда заключим, что каждая последующая волна будет перемещаться относительно невозмущенного газа несколько быстрее, чем предыдущая. Волны будут догонять друг друга, складываться и образовывать одну обладающую конечной интенсивностью волну сжатия.

Заметим, что при наполнении цилиндра поступающий из органов впуска в цилиндр газ освободит некоторый объём, который он ранее занимал в трубопроводе, и образует разрежение, которое будет распространяться также волновым образом. Но в этом случае волны уже не будут нагонять друг друга, так как последующая волна пойдет по газу, охлажденному предыдущей волной, и скорость распространения последующей волны будет меньше скорости предыдущей. Эти волны будут отставать друг от друга, складываться и образовывать одну обладающую конечной интенсивностью волну разрежения.

Распространяющаяся по трубопроводу волна конечной амплитуды (либо сжатия - для органов выпуска, либо разрежения - для органов впуска), достигнув открытого конца трубо-

провода, отразится от него с обратным знаком и начнёт распространяться в направлении, противоположном предыдущему.

Данный процесс распространения и интерференции волн конечной амплитуды описывается системой дифференциальных уравнений. Скорость распространения малых возмущений в газе при изэнтропийном течении равна скорости распространения звука:

$$a = \sqrt{k \cdot \frac{p}{\rho}}.$$

Давление и плотность при изэнтропийном изменении состояния газа могут быть определены через параметры, отнесённые к нормальным атмосферным условиям:

$$p = p_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} = p_0 \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{2k}{k-1}}, \quad \rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \rho_0 \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{2}{k-1}}.$$

Дифференцируя последние уравнения, получим:

$$dp = p_0 \cdot \frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{2k}{k-1}-1} \cdot \frac{da}{a_0}, \quad d\rho = \rho_0 \cdot \frac{2}{k-1} \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{2}{k-1}-1} \cdot \frac{da}{a_0}.$$

После подстановки значений  $dp$  и  $d\rho$  в систему уравнений (1) и некоторых преобразований, осуществляемых с учётом постоянства площади поперечного сечения органов впуска и выпуска, система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{2}{k-1} \cdot a + W \right) + (W + a) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2}{k-1} \cdot a + W \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{2}{k-1} \cdot a - W \right) + (W - a) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2}{k-1} \cdot a - W \right) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе уравнений (2) отчётливо прослеживаются некоторые комплексы зависимых переменных, в современной литературе называемых левым и правым инвариантами Римана:

$$J^+ = \frac{2}{k-1} \cdot a + W, \quad J^- = \frac{2}{k-1} \cdot a - W.$$

С учётом этого система уравнений (2) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} J^+ + (W + a) \cdot \frac{\partial}{\partial x} J^+ = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} J^- + (W - a) \cdot \frac{\partial}{\partial x} J^- = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Данная система дифференциальных уравнений является нелинейной в силу того, что коэффициенты при вторых слагаемых в каждом из них сами зависят от искомых функций. В случае нестационарного движения газа данная система нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка может быть сведена к гиперболическому одномерному дифференциальному уравнению второго порядка и, значит, численное решение системы уравнений (3) может быть найдено с помощью одной из модификаций метода характеристик. Рассмотрим абстрактную материальную точку, перемещающуюся по потоку газа с мгновенной ско-

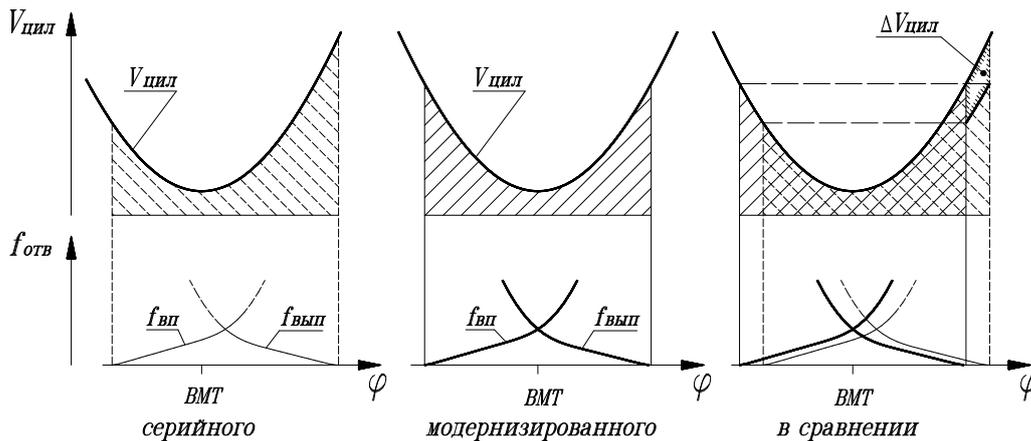
ростью, равной сумме скорости звука и скорости потока в текущем сечении. Очевидно, что вдоль всей траектории этой воображаемой точки инварианты Римана зависят только от времени и от координаты. Но тогда полный дифференциал инварианта Римана:

$$dJ^+ = \frac{\partial J^+}{\partial t} + \frac{\partial J^+}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \cdot dt = \frac{\partial J^+}{\partial t} + \frac{\partial J^+}{\partial x} \cdot (W + a) \cdot dt.$$

Сравнивая последнее выражение с системой уравнений (3) можно заметить, что правый инвариант Римана вдоль всей траектории названной точки остаётся постоянным во времени. Можно показать существование подобных траекторий, иначе называемых характеристиками, и для левого инварианта Римана. В условиях адиабатичности потока получение поля таких траекторий означает получение решения задачи об органах впуска и выпуска, так как собственная скорость газа и поле местных скоростей звука могут быть рассчитаны по инвариантам Римана, а все остальные параметры потока - по полю местных скоростей звука:

$$W = \frac{J^+ + J^-}{2}, \quad a = \frac{J^+ + J^-}{\left(\frac{4}{k} - 1\right)}.$$

Система дифференциальных уравнений (3) решена в соответствии с поставленными начальными и граничными условиями. Как показывает ее решение, удлинение протяжённости фазы опережения впуска на  $4^\circ$  п.к.в – с  $\varphi_{оп.вп}=12^\circ$  до  $\varphi_{оп.вп}=16^\circ$  при одновременном равнозначном сокращении длительности фазы опаздывания выпуска позволило бы снизить среднюю за период продувки величину объёма цилиндра на 1,8% при сохранении неизменным времени-сечения фазы перекрытия впускного и выпускного отверстий.



**Рис. 3. Уменьшение продуваемого объёма цилиндра**

Таким образом, с точки зрения организации процессов газообмена одной из важнейших характеристик КШМ с является средняя за период перекрытия впускного и выпускного отверстий величина объёма цилиндра. Приближение данного показателя к объёму камеры сжатия при неизменных времени-сечении и длительности фазы перекрытия впускного и выпускного отверстий позволяет увеличить степень согласованности работы КШМ и ГРМ поршневого двигателя.

Это позволяет сделать практически важный вывод о целесообразности регулирования фаз газораспределения одновременно и на впуске и на выпуске, что требует конструкции с отдельными распределительными валами.

**Библиографический список**

1. **Вырубов, Д.Н.** Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для студ. ВТУЗов / Д.Н. Вырубов [и др.]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. **Ленин, И.М.** Автомобильные и тракторные двигатели: учеб. для студ. ВУЗов / И.М. Ленин. – М.: Машиностроение, 1969. – 368 с.
3. **Луканин, В.Н.** Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учеб. / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 1995. – 368 с.  
<http://www.autocentre.ua>

*Дата поступления  
в редакцию 09.11.2010*

**L.A. Zakharov, S.N. Khrunkov, A.K. Limonov**

**METHOD OF RATIONAL VALVE TIMING CHOICE  
IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

The modern design solutions for valve timing in the internal combustion engines are considered. Theoretical study used models of the processes of gas exchange based on time-dependent quasi-isentropic linear representation. Draw practical conclusions about the appropriateness of methods variable valve timing.

*Key words:* Internal combustion engine, gas exchange, numeric simulation, design.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 631.3

В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов

### ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
ООО «Экологические технологии», г. Балахна

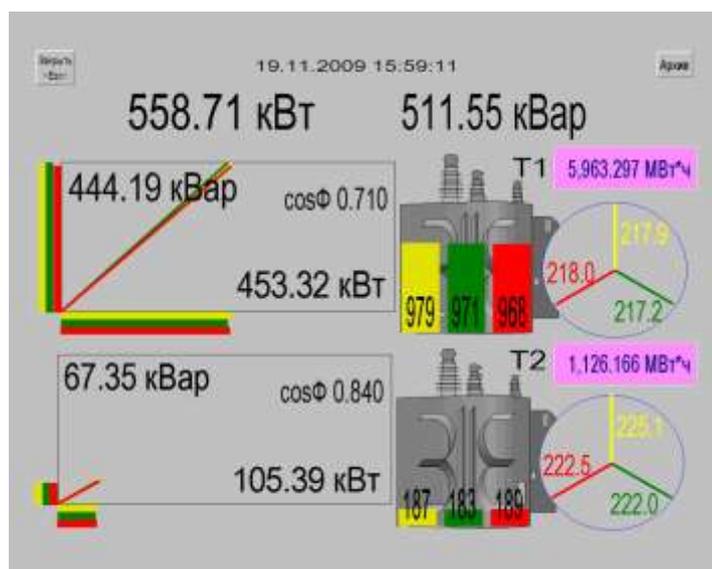
Для двух самых распространенных типов современного регулируемого привода постоянного и переменного тока исследованы негативные последствия от циркуляции в питающей сети реактивной мощности и мощности искажения, выполнен анализ уровня потерь мощности и их стоимости. Даны рекомендации по компенсации реактивной мощности и мощности искажения. Материал рассмотрен на примере многолетней эксплуатации полупроводниковых приводов буммашины на одном из предприятий г. Балахны.

*Ключевые слова:* электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, реактивная мощность,  $\cos\varphi$ , высшие гармоники, мощность искажения, компенсация реактивной мощности, компенсация мощности искажения.

Электроустановки, потребляют как активную  $P$ , так и реактивную мощность первой гармоники тока  $Q$  и мощность искажения  $T$ . Все эти мощности являются составляющими полной мощности  $S$ . Активная составляющая обусловлена только первой гармоникой тока, идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). В отличие от активной мощности, полезно используемой в работе, реактивная мощность не выполняет полезной работы, она служит лишь для создания магнитных полей в индуктивных приемниках (например, в электродвигателях, трансформаторах и т. п.), циркулируя все время между источником электроэнергии и приемниками. Мощность искажения  $T$  обусловлена нелинейностью нагрузки и потреблением оборудованием из сети токов высших гармоник. Мощности  $Q$  и  $T$ , протекая по элементам электрической сети, вызывают в них дополнительные потери мощности  $\Delta P$ . Мощность  $T$  может также вызвать искажение напряжения. Кроме того, перетоки этих мощностей снижают пропускную способность линий электропередач и трансформаторов, вынуждают увеличивать сечение кабельных линий и выполнять замену трансформаторов на большую номинальную мощность.

В предлагаемой работе показано, что реактивная мощность с помощью специальных устройств может генерироваться непосредственно у потребителя, не загружая при этом первичные генераторы электроэнергии, линии электропередач и трансформаторные подстанции. При этом можно говорить о компенсации реактивной мощности.

В настоящее время достаточно широко применяется регулируемый электропривод постоянного и переменного тока с различными типами полупроводниковых преобразователей. Кроме первой гармоники, сетевой ток преобразователей содержит высшие гармоники, т.е. в сети имеется мощность искажения  $T$ , которая, как и реактивная мощность  $Q$ , не выполняет полезной работы. С помощью специальных устройств она также может быть скомпенсирована.



**Рис. 1. Скриншот энергетических параметров SCADA-системы на машине по производству бумаги**

Основным показателем уровня активной мощности  $Q$  в сети является  $\cos\phi$  электроустановки. Связь полной мощности  $S = U \cdot I$  (здесь  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока) с активной мощностью  $P$  и реактивной  $Q$  выражается следующими соотношениями:  $P = S \cdot \cos\phi = U \cdot I \cdot \cos\phi$ ;  $Q = S \cdot \sin\phi = U \cdot I \cdot \sin\phi$ . Для трехфазной сети  $S = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I$ ,  $P = S \cdot \cos\phi$ ,  $Q = S \cdot \sin\phi$ , где  $U_{\text{л}}$ ,  $I$  – линейное напряжение и фазный ток.

Пусть, например,  $\cos\phi_{\text{н}} = 0,92$  ( $\phi = 23^\circ$  эл). Если принять относительное значение  $S = 1$ , тогда  $P = 0,92 \cong S$ ;  $Q = 0,39$ . При  $\cos\phi = 0,707 = \sqrt{2}/2$  ( $\phi = 45^\circ$  эл) будем иметь  $P = 0,707$ ;  $Q = 0,707$ . То есть, если  $\cos\phi$  снижается до значения  $\cos\phi = 0,707$ , то при этом уменьшается

резерв полной мощности  $S$  за счет передачи реактивной мощности  $Q$ . Если бы из сети потреблялась чисто активная мощность  $P = 0,707$ , то был бы резерв  $S - P \approx 0,3$ , т.е. 30%.

На рис. 1 приведен скриншот энергетических параметров SCADA-системы на машине по производству бумаги из мукулатуры на одном из предприятий Нижегородской области.

Приводы буммашины питаются от 2-х трансформаторов мощностью по 1000 кВА каждый. К 1-му трансформатору подключены все регулируемые приводы буммашины, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока. К 2-му трансформатору подключены только нерегулируемые асинхронные двигатели. рис. 1 видно, что 1-й трансформатор нагружен реактивной мощностью  $Q = 444,19$  кВар, почти равной активной мощности  $P = 453,32$  кВт, поэтому  $\cos\phi = 0,710$ , что является очень низким значением. Это объясняется тем, что по технологическим причинам буммашина работает с пониженной линейной скоростью  $V = 69,99$  м/мин, которая значительно ниже номинальной скорости  $V_{\text{н}} = 120$  м/мин. Это достигается за счет увеличения угла управления тиристорных выпрямителей. Зарегулированный режим тиристорных выпрямителей в основном и определяет низкое значение  $\cos\phi$  (см. рис. 1) и большое значение реактивной мощности.

Необходимо исключать сильное зарегулирование тиристорных выпрямителей, снижая скорость за счет редукторов, или применять электропривод переменного тока на основе преобразователей частоты с промежуточным неуправляемым звеном постоянного тока. Обоснование этих положений дается далее.

Если бы имели у привода буммашины  $\cos\phi = 1$ , то для передачи 500 кВт мощности по сети с напряжением  $U_{\text{л}} = 400$  В потребовался бы фазный активный ток

$$I = P / 3U_{\phi} = P / 3U_{\text{л}} / \sqrt{3} = P / \sqrt{3}U_{\text{л}} = (500 \cdot 10^3) / (1,73 \cdot 400) = 722 \text{ А} .$$

При  $\cos\phi = 0,707$  для передачи той же активной мощности 500 кВт к полученной выше величине тока, который является активным, будет еще добавляться реактивный ток. Полный ток при этом:

$$I = I_{\text{а}} / \cos\phi = 722 / 0,707 = 1021 \text{ А},$$

т.е. увеличивается в 1,41 раза. Следовательно, оборудование питающей сети (кабели, распределительные устройства, трансформаторы и генераторы) нагружено большим током. При этом увеличивается падение напряжения на элементах питающей сети, возрастают потери мощности.

Реактивный ток в этом случае:

$$I_p = I \cdot \sin\varphi = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 1021 \cdot \sqrt{1 - 0,707^2} = 1021 \cdot 0,707 = 722 \text{ А,}$$

т.е. равен активному  $I_a$ .

Оценим потери, которые будут существовать в случае рассмотренных примеров. Общие потери в трехфазном устройстве равны:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3(I_a^2 + I_p^2)R = \Delta P_a + \Delta P_p.$$

Пусть общие потери  $\Delta P$  при  $\cos\varphi = 1$  составляют 10% от установленной мощности  $S$ , то есть равны  $0,1 \cdot S$ . Это потери  $\Delta P_a$  от активной (и единственной, так как  $\cos\varphi = 1$ ) составляющей тока.

Найдем составляющие потерь  $\Delta P_a$  и  $\Delta P_p$  от протекания активной и реактивной составляющих тока при  $\cos\varphi_H = 0,92$  и  $\cos\varphi = 0,707$ .

1) если  $\cos\varphi_H = 0,92$ , то полный ток равен:  $I = I_a / \cos\varphi_H = I_a / 0,92 = 1,1 \cdot I_a$ ; реактивный ток:  $I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{(1,1 \cdot I_a)^2 - I_a^2} = I_a \cdot \sqrt{0,21} = 0,46 \cdot I_a$ . Потери:  $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,1 \cdot I_a)^2 R = = 3 \cdot 1,21 \cdot \Delta P_a$ , т.е. возрастают на 21%, но это все-таки мало по сравнению с  $\Delta P_a$ ;

2) допустим,  $\cos\varphi = 0,707$ . Полный ток:  $I = I_a / 0,707 = 1,41 I_a$ . Потери от  $I_a$  останутся теми же, а общие потери равны:  $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,41 \cdot I_a)^2 R = 3 \cdot 2 \Delta P_a$ , т.е. они возрастают в два раза и  $\Delta P_a = \Delta P_p$ .

Таким образом, увеличение общего тока – это увеличение падения напряжения питающей сети и возрастание нагрева электрооборудования. У асинхронных двигателей при этом увеличивается скольжение  $S$ , увеличиваются потери и нагрев, снижается производительность, кроме того, за потери электроэнергии приходится платить (как за потребляемую электроэнергию).

Рассмотрим некоторые особенности оплаты электроэнергии. В настоящее время 4-го числа каждого месяца Нижегородская сбытовая компания «Энергосбыт» [1] выставляет для потребителя при одноставочном тарифе при годовом числе часов использования заявленной мощности  $T_g$  от 5000 до 6000 ч/год две цены оплаты за электроэнергию (диапазон напряжений СН1 – 35 кВ) без учета НДС (на 23.11.2009):

- 1) регулируемая цена  $\Pi_1 = 2,20$  руб./кВт·ч;
- 2) свободная (нерегулируемая) цена  $\Pi_2 = 3,15$  руб./кВт·ч.

Значение  $\Pi_2$  в течение 2009 г. колебалось в пределах от 2,37 руб./кВт·час в январе до 3,15 руб./кВт·ч в октябре. Среднее значение в течение 2009 г  $\Pi_{2CP} = 2,76$  руб./кВт·ч. Данные сайта «Энергосбыт» для октября 2009 г.:

## 2.2. СН1

- Тм от 7000 часов и выше	2,00	2,93931
- Тм 6000-7000 часов	2,05	2,97112
- Тм 5000-6000 часов	2,20	3,14755

Принимаем, что на буммашине годовое время работы  $T_g = 6000$  ч/год, а месячное  $T_m = 500$  ч/мес.

Расчет месячной стоимости электроэнергии  $C_{ЭМ}$  выполняется через коэффициент соотношения цен  $\beta$  по следующей формуле:

$$C_{ЭМ} = \beta \cdot \Pi_1 \cdot W_{PM} + (1 - \beta) \cdot \Pi_2 \cdot W_{PM}, \text{ руб./мес.},$$

где  $\beta$  – доля объема электрической энергии, поставляемой по регулируемым тарифам;  $W_{PM}$  – месячное потребление активной энергии.

На октябрь 2009 значение  $\beta = 0,47745$ :

<b><math>\beta</math> - Доля объема электрической энергии по регулируемым тарифам</b>	0,47745
<b>Доля объема электрической энергии по нерегулируемым ценам</b>	0,52255

Доля  $\beta$  колеблется в течение года от месяца к месяцу в пределах от 0,698 (февраль 2009г) до 0,46 (август 2009 г.). Среднее значение в течение 2009 г.  $\beta_{ср} = 0,579$ .

Электрическая энергия сверх объемов, поставляемых потребителям по регулируемым тарифам, оплачивается по свободным (нерегулируемым) ценам в рамках предельных уровней нерегулируемых цен на розничных рынках.

Согласно скриншоту (рис. 1), общее потребление активной мощности от 1-го и 2-го трансформатора  $P = 453,32 + 105,39 = 560$  кВт. Тогда месячное потребление активной энергии

$$W_{PM} = P \cdot T_m = (560 \cdot 500) \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.} = 280\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.},$$

а стоимость электроэнергии

$$C_{ЭМ} = 0,47745 \cdot 2,20 \cdot 280\,000 + (1 - 0,47745) \cdot 3,15 \cdot 280\,000 = 294\,109,2 + 460\,889,1 = \\ = \mathbf{754\,998,3 \text{ руб./мес.}}$$

Здесь принято  $\beta = 0,47745$ ;  $C_2 = 3,15$  руб./кВт·ч.

Если принять для этих величин средние значения  $\beta_{ср} = 0,58$ ;  $C_{2ср} = 2,76$  руб./кВт·ч, то получим  $C_{ЭМ} = 0,58 \cdot 2,20 \cdot 280\,000 + (1 - 0,58) \cdot 2,76 \cdot 280\,000 = 357\,280 + 324\,576 = \\ = 681\,856 \text{ руб./мес.}$ , что незначительно отличается от предыдущего значения.

Допустим, общие потери  $\Delta P$  составляют 10% от потребляемой мощности  $P_{вх}$ . Это значит, что мы принимаем к.п.д установки  $\eta = P_{вых} / P_{вх} = (P_{вх} - \Delta P) / P_{вх} = 0,9$   $P_{вх} / P_{вх} = 0,9$ . Рассчитаем месячную стоимость потерь электроэнергии, которые создаются потребителями, подключенными только к 1-му трансформатору, имеющему очень низкий  $\cos\phi = 0,71$  (см. рис. 1). Было показано, что при таком  $\cos\phi$  полные потери  $\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot (1,41 \cdot I_a)^2 R = 3 \cdot 2 \Delta P_a$ . Активные потери от нагрузок, подключенных к 1-му трансформатору:

$$\Delta P_a = 0,1 \cdot 453,32 = 45,33 \text{ кВт.}$$

Тогда общие потери от потребления активной и реактивной мощности:

$$\Delta P = 2 \cdot \Delta P_a = 90,66 \text{ кВт.}$$

Месячное потребление энергии, соответствующее этим потерям:

$$\Delta W_{PM} = (90,66 \cdot 500) \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.} = 45\,330 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мес.}$$

Стоимость этих потерь:

$$\Delta C_{ЭМ} = 0,47745 \cdot 2,20 \cdot 45\,330 + (1 - 0,47745) \cdot 3,15 \cdot 45\,330 = 47\,614,18 + 74\,614,65 = \\ = \mathbf{122\,228,83 \text{ руб./мес.}}$$

По нашему мнению, это составляет очень существенную сумму в общей стоимости электроэнергии (16,2%). Причем половину этой суммы составляет стоимость потерь от циркуляции реактивной мощности и от этих затрат можно избавиться полностью. В случае применения регулируемого привода этого можно достигнуть за счет правильной технической политики без применения дополнительных устройств компенсации реактивной мощности.

**Примечание:** в этих расчетах еще не учтен НДС.

В следующем разделе приводится анализ влияния широко применяемых регулируемых приводов механизмов на составляющие полной мощности.

### 1. Регулируемый электропривод постоянного тока

Выпрямленное напряжение управляемого тиристорного преобразователя, который в настоящее время в основном применяется для питания двигателя постоянного тока, определяется следующим выражением:  $U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha$ , где  $U_{do}$  – полное выпрямленное напряжение при  $\alpha = 0$ ;  $\alpha$  – угол управления.

Для двигателя постоянного тока  $U_d \cong n$ , где  $n$  – скорость электродвигателя. Величина  $n$  – это технологический параметр, определяющий производительность механизма.

Так как  $\alpha \cong \varphi$  (см. рис. 2), то  $U_d = U_{do} \cdot \cos \varphi$ .

Без учета потерь в двигателе можно записать:  $U_d \cdot I = P = U_{do} \cdot I \cdot \cos \varphi$ , где  $U_{do} \cdot I = S$  – полная мощность на валу двигателя постоянного тока при  $\alpha = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ , когда  $U_d = U_{do}$ ;  $n = n_H$ , (когда мы не понижаем скорость двигателя, а работаем на полной (номинальной) скорости).

На рис. 2 приведены диаграммы сетевого напряжения фазы А  $u_A$ , тока фазы А  $i_A$  и первой гармоники этого тока  $i_{A(1)}$  при угле управления  $\alpha \approx 45^\circ$  град:

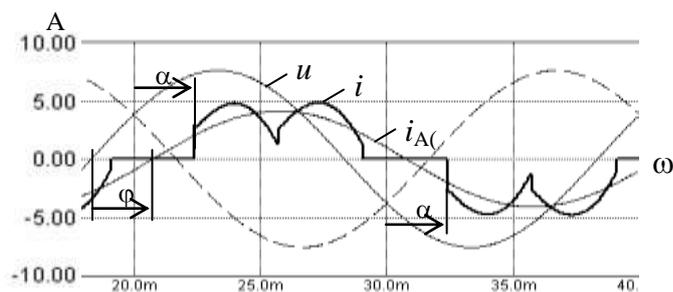


Рис. 2. Диаграммы сетевого фазного напряжения и тока управляемого выпрямителя

Здесь первая гармоника тока  $i_{A(1)}$  сдвинута относительно напряжения  $u_A$  вправо на угол  $\varphi \cong \alpha$ , что говорит о наличии реактивной составляющей тока.

Допустим, скорость понизили на 30%, т.е.  $U_d = 0,7 U_{do}$ ;  $\cos \varphi = 0,7$ . Тогда, как было показано ранее,  $P = 0,7 \cdot S$ , но при этом  $Q = P = 0,7 \cdot S$ .

Отметим, что  $P = U_d \cdot I \cong n \cdot M = P_{\text{вал}}$ , где  $M$  – момент на валу электродвигателя,  $P_{\text{вал}}$  – мощность на валу.

Кроме первой гармоники, сетевой ток  $i_A$  содержит высшие гармоники. На диаграмме рис. 3 приведен гармонический состав сетевого тока  $i_A$  (рис. 2). Как видно из рис. 3, кроме первой гармоники сетевой ток содержит существенные по величине 5-ю (250 Гц) и 11-ю (550 Гц) гармоники.

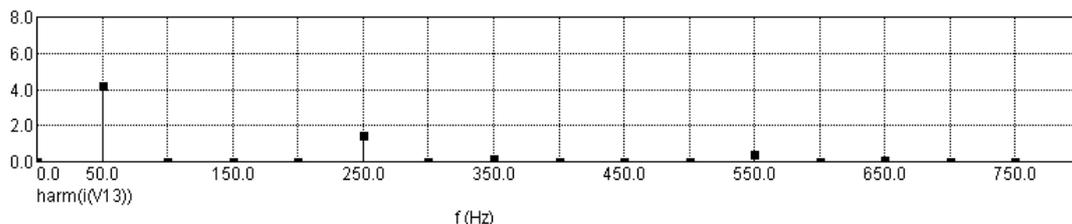


Рис. 3. Гармонический состав сетевого тока выпрямителя

В зависимости от режима выпрямления сетевой ток может содержать еще и 7-ю гармонику.

Наличие высших гармоник означает, что в сети имеется мощность искажения  $T$ , которая, как и реактивная мощность  $Q$ , не выполняет полезной работы, а нагружает сеть высшими гармониками тока. Рассмотрим понятие мощности искажения подробнее. Известно, что несинусоидальный ток можно представить в виде разложения на 1-ю гармонику и гармоники с более высокими частотами, кратными 1-й. Тогда действующее значение несинусоидального тока:

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{k=2} I_{(k)}^2},$$

где  $I_{(1)}$  – действующее значение 1-й гармоники тока;  $I_{(k)}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники, начиная со второй.

Если умножить левую и правую часть последнего уравнения на напряжение  $U$ , то получим выражение для полной мощности  $S$  при наличии высших гармоник в токе:

$$S = U \cdot I = \sqrt{S_{(1)}^2 + T^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}.$$

Здесь  $T = U \sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}$  – мощность искажения, которая является составляющей полной мощности  $S$  при несинусоидальной форме тока;  $\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2} = I_T$  – действующее значение тока высших гармоник.

### Общая характеристика двигателя, применяемого в приводе постоянного тока

1. Имеет единственное преимущество перед другими типами электродвигателей – хорошую управляемость и сравнительную простоту преобразователей для них.

2. Имеет ряд существенных недостатков:

- является самой сложной по конструкции, ненадежной и дорогой электрической машиной среди всех типов силовых электрических машин – имеет обмотку из меди на вращающейся части (на якоре) и коллектор в виде медных пластин со скользящим контактом в виде щеток, на станине расположены полюса возбуждения с обмоткой;
- щеточно-коллекторный узел подвержен износу и требует постоянного обслуживания, он также не очень хорошо переносит вибрации электродвигателя;
- имеется искрение щеточного контакта и поэтому двигатель невозможно применять во взрывоопасных средах;
- ограниченная скорость изменения тока якоря;
- необходимость двух источников питания: для якорной цепи и обмотки возбуждения, причем двигатель неработоспособен при исчезновении возбуждения;
- суровые климатические условия России также вызывают сомнения в перспективности широкого применения двигателя постоянного тока для регулируемого электропривода.

### Выводы по электроприводу постоянного тока

1. Привод постоянного тока целесообразно применять для регулирования установившейся скорости в нешироких пределах ниже от номинальной. В динамических режимах (например, при пуске) углы могут изменяться в широких пределах.

2. Нецелесообразно использовать регулирование выпрямленного напряжения  $U_d$  для получения длительной работы на требуемой пониженной скорости. Необходимо применять редуктор для согласования скоростей двигателя и механизма.

3. В мощных приводах постоянного тока с управляемыми выпрямителями для снижения уровня реактивной мощности  $Q$  возможно применение специальных схем преобразо-

вателей и законов управления, например, поочередное управление двумя последовательными преобразователями, работающими на один якорь.

4. При работе преобразователей в сетевом токе всегда содержатся высшие гармоники, т.е. кроме активной и реактивной мощностей присутствует еще мощность искажений  $T$ , обусловленная несинусоидальностью сетевого тока. Высшие гармоники тока могут вызвать искажение сетевого напряжения. Мощность искажений  $T$  есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Она мешает компенсации  $Q$  с помощью конденсаторов и с ней необходимо бороться. Этот вопрос подробно рассматривается в разделе 5.

В отличие от двигателя постоянного тока, самой простой, надежной и дешевой электрической машиной является асинхронный короткозамкнутый двигатель переменного тока. Для регулирования скорости этого типа электродвигателя применяются различные типы преобразователей частоты (ПЧ). Самые распространенные среди них – это инверторы напряжения с промежуточным звеном постоянного тока, которые и рассматриваются в следующем разделе.

## 2. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока

На рис. 4 представлена блок-схема силовой части ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (так называемый инвертор напряжения), который питает асинхронный короткозамкнутый двигатель. Выпрямитель на блок-схеме состоит из неуправляемой одно- или трехфазной мостовой схемы. Однофазная версия используется только в маломощных преобразователях. Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсатором. В идеальном случае напряжение промежуточного контура равно амплитуде линейного напряжения питающей сети:  $U_{ZK} = \sqrt{2}U_N$ .

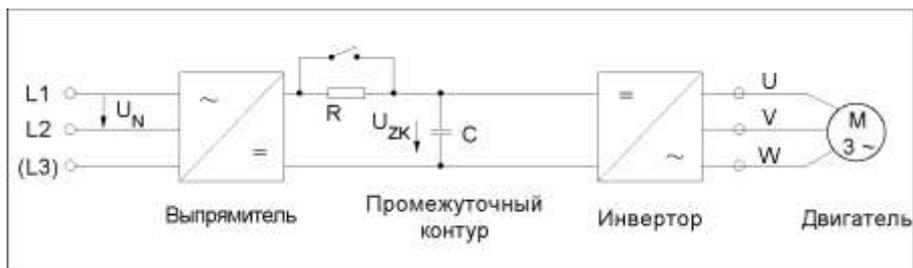


Рис. 4. Блок-схема силовой части ПЧ

Инвертор преобразует постоянное напряжение промежуточного контура в трехфазное напряжение, регулируемое по частоте и величине путем широтно-импульсной модуляции. Это напряжение используется для управления трехфазным асинхронным двигателем.

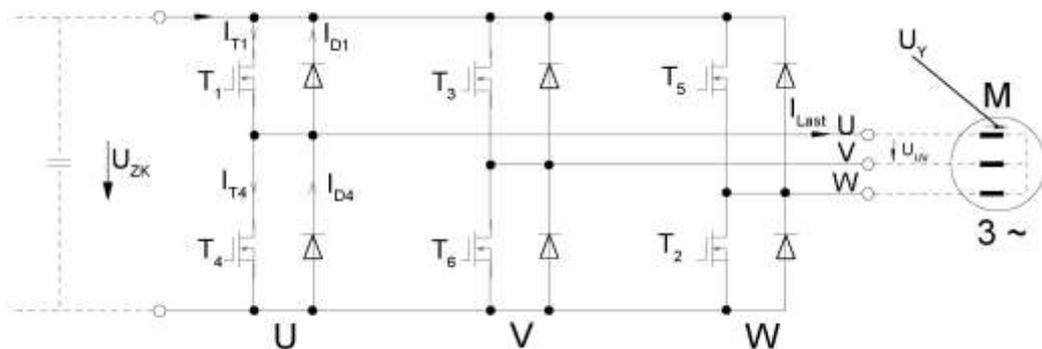


Рис. 5. Схема инвертора

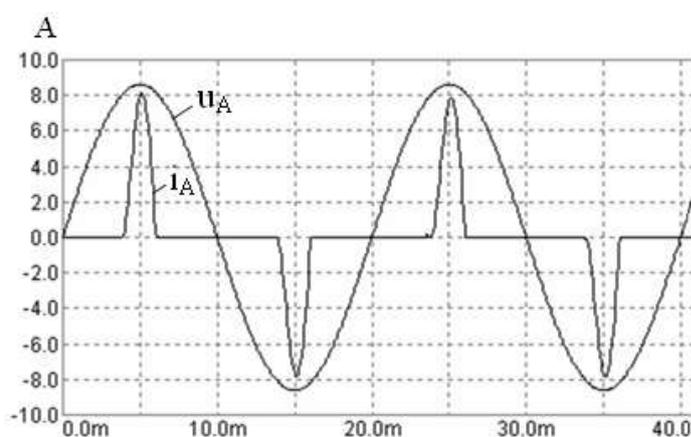
При преобразовании постоянного тока в переменный в инверторе используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В начале 90-х годов доминировали биполярные транзисторы с относительно малыми частотами переключения – до 2 кГц. Сегодня используется полевые транзисторы с низкими потерями и IGBT-транзисторы. Эти типы транзисторов обеспечивают частоты переключения до 16 кГц. Схема инвертора для преобразования постоянного тока в переменный приведена на рис. 5.

Выходное напряжение преобразователя частоты формируется “нарезанием”, т.е. циклическим подключением-выключением с помощью транзисторов постоянного напряжения промежуточного звена постоянного тока. Таким образом, выходное напряжение состоит из прямоугольных импульсов, пиковое значение которых всегда равно напряжению промежуточного звена постоянного тока.

Высокая несущая частота, т.е. частота, с которой транзисторы включаются и выключаются в течение полуволны, обеспечивает более точное приближение тока двигателя  $I_{Last}$  к синусоидальной форме, и, следовательно, вызывает меньшие дополнительные потери в двигателе. При несущей частоте 16 кГц влияние высших гармоник на двигатель становится просто несущественным. Однако при повышении несущей частоты возрастают потери от переключения транзисторов в самом инверторе.

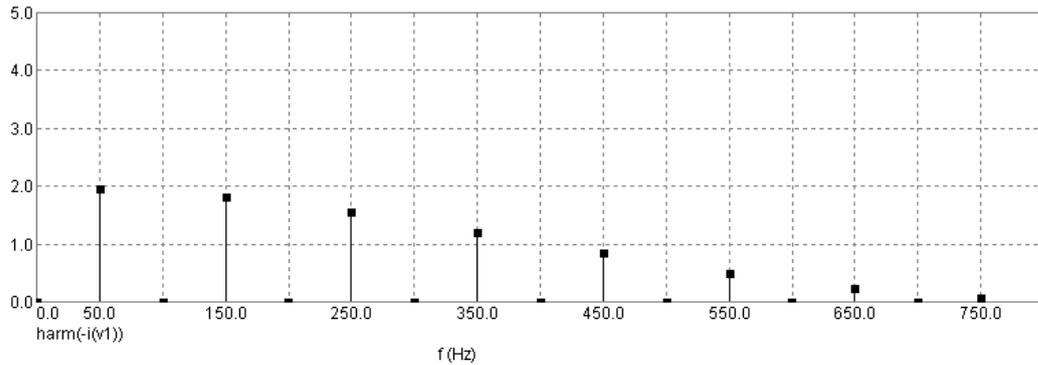
Проанализируем входное напряжение и входной ток ПЧ. Входное напряжение преобразователя обычно очень близко к синусоидальной форме. Отклонения случаются только когда оно несколько падает в районе максимального значения из-за зарядного тока конденсатора в звене постоянного тока, если полное сопротивление питающей сети велико, т.е. в случае слабой сети. Входной ток состоит из пиков, которые возникают всегда, когда конденсатор промежуточного контура подзарядывается через входной выпрямитель (рис. 6).

Эта подзарядка начинается, когда напряжение промежуточного контура  $U_{ZK}$  становится равным величине мгновенного сетевого напряжения  $U_N$  и выпрямительный мост переходит от закрытого состояния в проводящее. Этот ток, кроме первой гармоники, содержит 3-ю, 5-ю, 7-ю и другие достаточно существенные по величине гармоники (рис. 7).



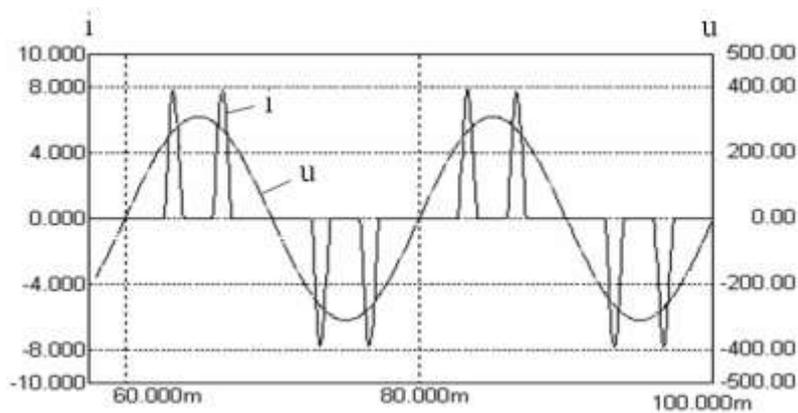
**Рис. 6. Осциллограммы входных напряжения и фазного тока ПЧ с однофазным подключением**

Пик первичного тока примерно в 3...5 раз больше действующего значения и амплитуды первой гармоники (рис. 7). Амплитуда токовых пиков увеличивается при возрастании нагрузки на двигатель. Это происходит потому, что вне интервала подзарядки промежуточного конденсатора напряжение на нем падает в большей степени из-за большого тока двигателя (инвертора) и во время интервала подзарядки промежуточного конденсатора требуется большой ток для восстановления напряжения до амплитудного значения напряжения питающей сети  $\sqrt{2}U_N$ .



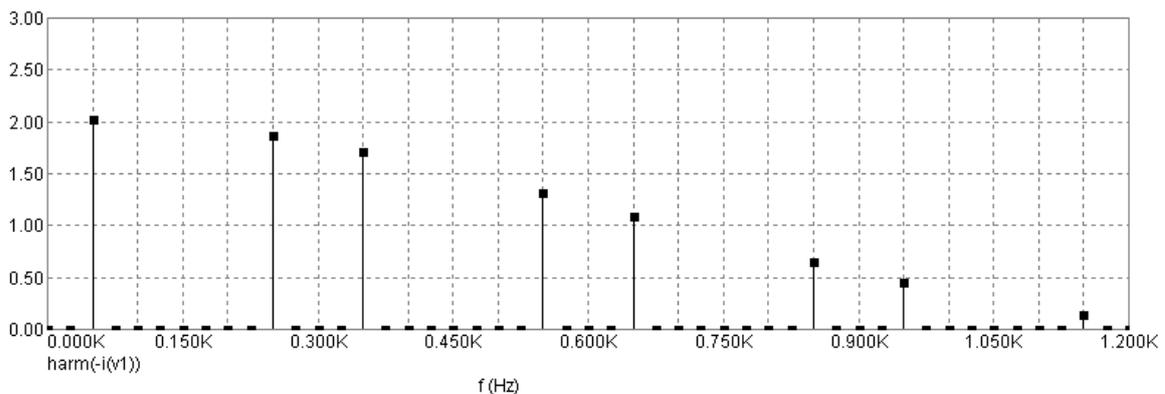
**Рис. 7. Гармонический состав тока инвертора с однофазным подключением**

Графики тока и напряжения на рис. 6 справедливы не только для ПЧ, но и для всех схем с однофазными неуправляемыми выпрямителями, нагруженными на конденсатор.  $\cos\varphi$  для таких преобразователей приблизительно равен 1. Однако в сети имеется значительная по величине мощность искажения, которая может быть снижена линейными фильтрами, если это необходимо.



**Рис. 8. Осциллограммы входных напряжения и фазного тока для Ч с трехфазным подключением**

На рис. 8 приведены осциллограммы входных напряжения и фазного тока для схемы ПЧ с трехфазным подключением. На рис. 9 приведена диаграмма гармонического состава входного тока. Этот ток, кроме первой гармоники, содержит существенные 5-ю, 7-ю 11-ю и более высокие гармоники.



**Рис. 9. Гармонический состав фазного тока при трехфазном подключении ПЧ**

Отметим, что гармонический состав сетевого тока у ПЧ хуже, чем у управляемых выпрямителей с фазовым принципом управления для питания двигателей постоянного тока (см.

рис. 3). Это обусловлено тем, что сетевой ток ПЧ является импульсным и в большей степени отличается от синусоиды, чем у выпрямителей для двигателей постоянного тока. Но все же при этом у ПЧ  $\cos\varphi = 1$ . При подключении к сети нескольких ПЧ их сетевые токи будут суммироваться, причем пики токов у всех преобразователей по отношению к напряжению сети будут располагаться в одном и том же месте, что может привести к искажению напряжения сети.

### Преобразование энергии в частотном электроприводе

На рис. 10 приведена диаграмма преобразования энергии в частотном приводе – рис. 10.

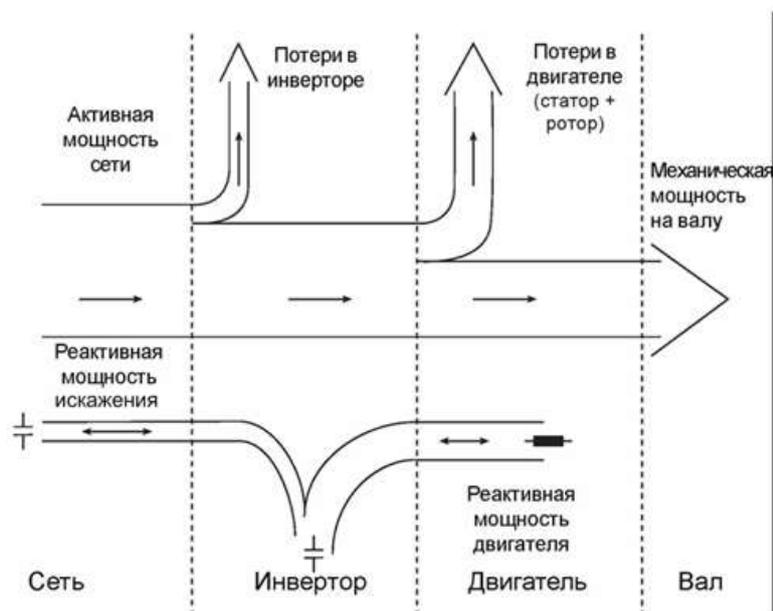


Рис. 10. Энергетический баланс частотного привода

Отмечаем, что на диаграмме для получения полезной мощности на валу двигателя из питающей сети потребляется только активная мощность и с сетью происходит обмен на высших гармониках, т.е. циркулирует мощность искажения. Реактивная мощность двигателя, необходимая для создания поля двигателя, обеспечивается конденсатором в звене постоянного тока и не нагружает сеть.

### Выводы по частотно-регулируемому электроприводе переменного тока

1. Применение асинхронных двигателей с ПЧ обеспечивает  $\cos\varphi = 1$  во всем диапазоне регулирования скорости, так как на входе ПЧ установлен неуправляемый выпрямитель (т.е. нет фазового управления). Но и здесь присутствует мощность искажения. С ней можно бороться средствами, которые рассматриваются в следующем разделе.

2. Мощность искажения может быть существенной и тогда должна компенсироваться с помощью пассивных или активных фильтров.

### 3. Компенсация реактивной мощности и мощности искажений

#### Компенсация реактивной мощности

Работа следующих потребителей всегда сопровождается циркуляцией реактивной мощности:

- асинхронные двигатели ( $\cos\varphi \sim 0,5-0,7$ );
- электроприводы постоянного тока с управляемыми выпрямителями ( $\cos\varphi$  зависит от уровня скорости двигателя);
- выпрямительные электролизные установки ( $\cos\varphi \sim 0,6$ );

- электродуговые печи ( $\cos\varphi \sim 0,6$ );
- индукционные печи ( $\cos\varphi \sim 0,2-0,6$ );
- сварочные трансформаторы ( $\cos\varphi \sim 0,4$ );
- лампы дневного света ( $\cos\varphi \sim 0,5-0,6$ ).

Проблема компенсации реактивной мощности всегда занимала важное место в общем комплексе вопросов повышения эффективности передачи, распределения и потребления электрической энергии [2, 4, 12, 13]. Правильное решение таких задач в значительной мере предопределяет экономию денежных и материальных ресурсов, повышение качества электроснабжения. Еще в 30-е годы прошлого века в начале индустриализации им уделялось серьезное внимание. Считалось допустимым для предприятия работать на границе раздела предприятие–энергосистема с  $\cos\varphi$  не ниже 0,85. За повышение  $\cos\varphi$  выше этой величины производилась скидка с тарифа, за понижение – надбавка.

Был период, когда предприятие не поощрялось и не наказывалось, имея  $\cos\varphi$  в пределах 0,92–0,95 при питании от сетевых районных подстанций, сохраняя возможность работать с  $\cos\varphi = 0,85$ .

В рыночных условиях речь может идти об эффективности электрического хозяйства каждого отдельного потребителя, определяемой не приведенными затратами, а действующими в развитых странах методами оценки инвестиций. При создании полноценного рынка услуг по регулированию реактивной мощности станет реальным положение, когда при установке компенсирующих устройств в своих электрических сетях потребители получают компенсацию за долю эффекта от снижения потерь электроэнергии (мощности) в электрических сетях энергосистем в виде скидки с тарифа на активную электроэнергию. И, кроме того, компенсация будет получена не только за снижение потерь от циркуляции реактивной мощности, но и за услуги по поддержанию уровня напряжения в соответствии с действующими стандартами и нормами.

В приказе министра В.Б. Христенко от 22 февраля 2007 г. № 49 [7] п.7 устанавливаются следующие предельные значения  $\cos\varphi$  в часы больших суточных нагрузок электрической сети для потребителей, присоединенных к сетям напряжением ниже 220 кВ:

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети:	$\text{tg } \varphi$	$\cos \varphi$
напряжением 110 кВ (154 кВ)	0,5	0,90
напряжением 35 кВ (60 кВ)	0,4	0,93
напряжением 6 - 20 кВ	0,4	0,93
напряжением 0,4 кВ	0,35	0,95

К сожалению положения этого приказа до сих пор не исполняются.

Рассмотрим подробно способы компенсации реактивной мощности у потребителя. Источниками реактивной мощности являются:

- силовые статические конденсаторы;
- синхронные двигатели в режиме перевозбуждения;
- синхронные компенсаторы;
- тиристорные источники реактивной мощности;

Наиболее распространенными источниками реактивной мощности являются конденсаторные батареи. С помощью конденсаторов величины перетоков реактивной мощности могут быть уменьшены и даже полностью устранены. Конденсаторы целесообразно устанавливать непосредственно в местах появления реактивной мощности. Обмен энергией, в этом случае, будет происходить по кратчайшему пути между установками, требующими для своей работы реактивную мощность, и конденсаторами. Между этими установками и источником энергии будет происходить циркуляция только некомпенсированной части реактивной энергии.

В последнее время все большее распространение получают автоматические устройст-

ва компенсации реактивной мощности. Данные устройства позволяют регулировать реактивную мощность путем включения и отключения необходимого количества ступеней (секций) с конденсаторами в автоматическом режиме. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок может осуществляться по следующим параметрам: времени суток, напряжению, току нагрузки и значению реактивной мощности.

Обычно регуляторы оснащены измерителями тока, напряжения и цифровой обработкой измеренных величин, чем достигается высокая точность определения как действующего значения тока, так и  $\cos\varphi$ . Приборы осуществляют вычисление основной гармонической составляющей активного и реактивного токов, используя алгоритм Fast Fourier Transforms (FFT) – быстрое преобразование Фурье. Подобным способом вычисляется и основная гармоника напряжения, чем обеспечивается высокая точность в условиях сильного искажения напряжения высшими гармониками.

Такие источники реактивной мощности, как синхронные двигатели, мало распространены в промышленности, а синхронные компенсаторы имеют большие мощности и кое-где сохранились на узловых подстанциях энергосистем.

Тиристорные источники реактивной мощности [9] обеспечивают плавное регулирование генерируемой реактивной мощности емкостного характера, имеют высокое быстродействие, сложнее конденсаторных батарей и дороже, поэтому меньше распространены.

Регулируемые (автоматические) конденсаторные установки выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами, например, КРМ-0,4 (УКМ-58) – НПО «ПромЭлектроАвтоматика» [6]; группа «РУСЭЛТ» [10]; фирма «НЮКОН» и др.

#### **Компенсация мощности искажения**

Гармоники тока, создаваемые нелинейными полупроводниковыми нагрузками, могут представлять собой серьезные проблемы для систем электроснабжения [8]. Гармонические составляющие представляют собой токи с частотами, кратными основной частоте источника питания, и обуславливают появление мощности искажения. Увеличение общего действующего значения тока при наличии высших гармоник в системе приводит к увеличению потерь и перегреву всего оборудования распределенной сети электропитания, снижению коэффициента мощности, ухудшению характеристик защитных автоматов и завышению требуемой мощности электрооборудования. В свою очередь высшие гармоники тока влияют на форму напряжения в системе электропитания, вызывая его несинусоидальность, которая отрицательно воздействует на изоляцию кабельных линий электропередач. Гармоники нарушают работу многих устройств. Но особенно чувствительны к ним конденсаторы, так как их сопротивление снижается пропорционально порядку (номеру) присутствующих гармоник. В определенных условиях могут возникать резонансные явления, приводящие к перегрузке конденсаторов, установленных для компенсации реактивной мощности, и к значительным искажениям кривой напряжения.

Если мощность источника гармоник значительна, то обычно требуется снижать уровень гармоник в сети. Соответствующее устройство (фильтрокомпенсирующее устройство или ФКУ) одновременно выполняет функции компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник.

В разделах 1 и 2 данной статьи приведен анализ гармоник тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты. Этот анализ показал, что управляемые выпрямители могут содержать существенные по величине 5-ю и 11-ю гармоники (а иногда и 7-ю). ПЧ с однофазным подключением к сети (обычно небольшой мощности) потребляют из сети очень значительные нечетные гармоники с 3-ей по 13-ю, а ПЧ с трехфазным подключением – 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Причем надо отметить, что фаза гармоник у нескольких подключенных выпрямителей изменяется при изменении угла управления и они могут взаимно компенсироваться, а у ПЧ фаза гармоник подключенных преобразователей всегда постоянна и гармоники от разных преобразователей суммируются.

Для компенсации высших гармоник могут применяться пассивные и активные фильтры высших гармоник.

Применение пассивных LC-фильтров, настроенных на определенный порядок гармоник, на входе трехфазного выпрямителя при 100%-й нагрузке обеспечивает снижение коэффициента искажения тока до величины 8–10%. Значения этого коэффициента в системе без фильтра может достигать 30% и более. Понятие «коэффициент искажения синусоидальности тока» характеризует степень отклонения формы периодической кривой тока от синусоидальной. В соответствии с ГОСТ 13109-97 [3,5] он определяется по формуле:

$$K_{и1} = \frac{\sqrt{\sum I(k)^2}}{I_{(1)}},$$

где  $k=2$  и более – это номер гармоники.

В иностранной литературе ему соответствует коэффициент THD% – Total Harmonic Distortion – общее гармоническое искажение, которое выражается в процентах.

На рис. 11 приведена схема трехфазного LC-фильтра, настроенного на 5-ю гармонику, включенного на входе ПЧ с трехфазным питанием. Фильтр содержит продольные индуктивности L2, L3, L4 и поперечную цепь, состоящую из последовательно включенных индуктивностей L5, L6, L7 и конденсаторов C2, C3, C4, настроенных на определенную гармонику. Если фильтр настроен на 5-ю гармонику, то сопротивление поперечной цепи для 5-й гармоники близко к нулю, и ток, потребляемый из питающей сети, не будет содержать эту гармонику.

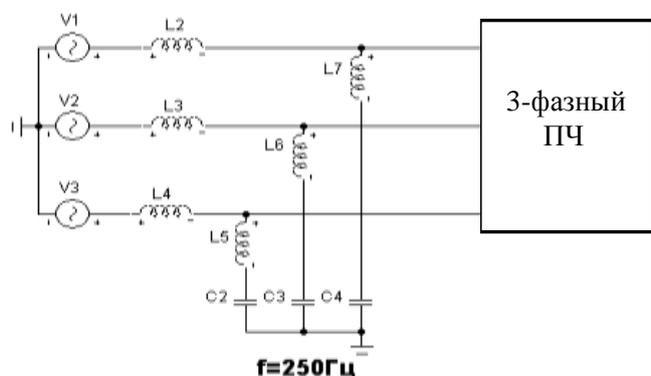


Рис. 11. Схема фильтра 5-й гармоники

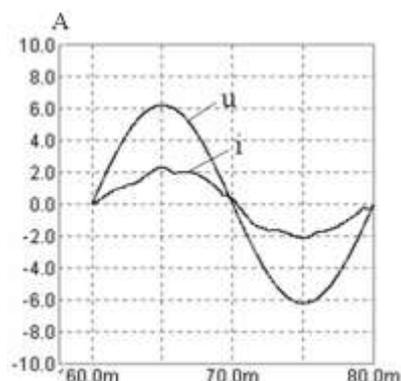


Рис. 12. Осциллограмма сетевого тока

На рис. 12 дан график тока, потребляемого из питающей сети, при подключении фильтра на входе ПЧ с трехфазным питанием. Фильтр настроен на 5-ю гармонику. На рис. 13 приведен гармонический состав этого тока.

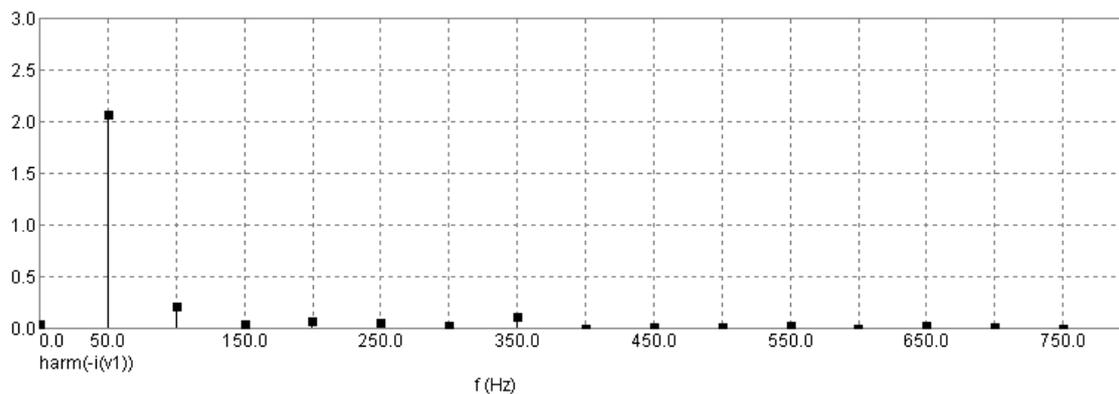


Рис. 13. Гармонический состав тока при подключении фильтра 5-й гармоники

Если сравнить токи и гармонический состав с аналогичными параметрами для ПЧ без фильтра (рис. 9), то можно отметить очень существенное улучшение формы тока и его гармонического состава, причем кроме 5-й значительно снизились 7-я и более высшие гармоники.

По рис. 12 можно заключить, что использование фильтра практически не повлияло на  $\cos\varphi$ , по-прежнему  $\cos\varphi = 1$ . Таким образом, ПЧ с фильтром на входе имеет хороший гармонический состав потребляемого из питающей сети тока и не потребляет реактивной мощности. Это важнейшее достоинство ПЧ с фильтром на входе, которое однозначно решает вопрос выбора типа электропривода – двигатель постоянного тока с управляемым выпрямителем или асинхронный короткозамкнутый двигатель переменного тока с ПЧ – в пользу асинхронного двигателя с ПЧ и фильтром на входе.

Рассмотренные пассивные фильтры гармоник выпускаются многими фирмами, например [10, 1]. Некоторые зарубежные фирмы выпускают активные фильтры [10]. Модели активных фильтров гармоник, выпускаемые фирмой MGE UPS SYSTEM под названием SineWave, могут обеспечить компенсацию действующих значений высших гармоник от 20 до 120 А. Их эффективность по компенсации высших гармоник может быть еще выше, чем у пассивных фильтров.

### Выводы

В статье дан технический и экономический анализ состояния вопроса по реактивной мощности и часто сопутствующей ей мощности искажения в сетях потребителей. Для анализа использовалось осциллографирование на реальном объекте (бумагоделательная машина, расположенная в Нижегородской области), моделирование с помощью компьютерных программ (MicroCap 8) и технико-экономические расчеты. Большое внимание уделено анализу современного регулируемого электропривода постоянного и переменного тока, приводится их сравнение с точки зрения взаимодействия с питающей сетью.

На основе результатов анализа можно сформулировать следующие технико-экономические рекомендации:

1. Компенсации реактивной мощности и мощности искажения должно уделяться пристальное внимание на электропотребляющих предприятиях, иначе возможно появление дополнительных затрат, ухудшение качества и устойчивости электроснабжения, снижение надежности работы и срока службы электрооборудования.

2. При применении регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока необходимо обращать особое внимание на скоростные режимы работы двигателя, правильно выбирать согласующие редукторы, оценивать уровень потребляемой реактивной мощности и принимать меры по ее компенсации с помощью фильтро-компенсирующих устройств.

3. При применении регулируемого электропривода переменного тока на основе ПЧ с асинхронным короткозамкнутым двигателем не требуется компенсации реактивной мощности, но особое внимание необходимо обращать на гармонический состав сетевого тока и при необходимости принимать меры по компенсации высших гармоник с помощью пассивных или активных фильтров высших гармоник.

4. Все меры по компенсации реактивной мощности и мощности искажений должны опираться на технико-экономические расчеты, ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» и руководящие указания по этим вопросам.

5. При создании полноценного рынка услуг по регулированию реактивной мощности станет реальным положение, когда при установке компенсирующих устройств в своих электрических сетях потребители получают компенсацию за долю эффекта от снижения реактивной мощности и потерь электроэнергии (мощности) в электрических сетях энергосистем в виде скидки с тарифа на активную электроэнергию. И, кроме того, скидка будет получена не только за компенсацию реактивной мощности и снижение потерь, но и за услуги по поддержанию качества напряжения в соответствии с действующими стандартами и нормами [13].

б. Решение указанных вопросов может снять во многих регионах России вопрос о нехватке энергетических мощностей.

#### Библиографический список

1. Нижегородская сбытовая компания «Энергосбыт» <http://www.nsk.elektra.ru/>.
2. Зельцбург, Л. М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л. М. Зельцбург. – М.: Высшая школа, 1973.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. <http://www.matic.ru/index.php?pages=123>
4. Актуальность компенсации реактивной мощности. Сайт GRAVICAPPA - альтернативные источники энергии - <http://gravicappa.com.ua/ua/technologies/krm/199-statya.html>
5. Качество электрической энергии. Сайт КУБАНЬЭНЕРГОСБЫТ - [http://www.kubansbyt.ru/naselenie/guide/gr\\_kodeks/elektro/index.shtml](http://www.kubansbyt.ru/naselenie/guide/gr_kodeks/elektro/index.shtml)
6. Компенсация реактивной мощности. Предприятие ПромЭлектроАвтоматика - <http://www.pea.ru/docs/equipment/reactive-power-compensation/compensation/>
7. Приказ министра В.Б. Христенко от 22 февраля 2007 г. № 49 О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств. <http://www.energo-spektr.ru/norma/>
8. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение. Техническая коллекция Schneider Electric. - [http://www.pro-schneider.ru/technical\\_support/technical\\_collection/22/](http://www.pro-schneider.ru/technical_support/technical_collection/22/)
9. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (СТК) - [http://enercomserv.ru/?issue\\_id=15](http://enercomserv.ru/?issue_id=15)
10. Климов, В. Компенсаторы реактивной мощности и мощности искажения в системах гарантированного электропитания промышленного назначения. / В. Климов, Ю. Карпиленко, В. Смирнов // Силовая электроника. 2008. № 3. [http://www.ruselt-spb.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=983](http://www.ruselt-spb.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=983)
11. ООО НПЦ «ЕНЕРКОМ-СЕРВИС» Фильтры высших гармоник (ФКУ). Фильтрокомпенсирующие устройства. [http://enercomserv.ru/?issue\\_id=16](http://enercomserv.ru/?issue_id=16)
12. Основные задачи формирования баланса реактивной мощности в ЕЭС России // Электрические станции. 2007. № 3.
13. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике // Промышленная энергетика. 2002. № 6.

*Дата поступления  
в редакцию 15.07.2010*

**V.A. Tikhomirov, V.G. Titov, S.V. Hvatov**

#### **TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE USING CONTROLLED DRIVE CONSTANT AND ALTERNATING CURRENT**

For two the most wide-spread types of the modern controlled drive constant and alternating current explored negative consequences from circulation in supplying network to reactive power and powers of the distortion, is executed analysis level losses to powers and their cost. Recommendations are given on compensations of the reactive power and powers of the distortion. The Material is considered on example of the perennial usage semiconductor drives of the machine on production of the paper on one of the enterprise Balahny.

*Key words:* drive of the direct current, drive of alternating current, reactive power,  $\cos\varphi$ , high harmonicas, power of the distortion, compensation to reactive power, compensation to powers of the distortion.

УДК 621.586

Е.Ю. Анишев

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

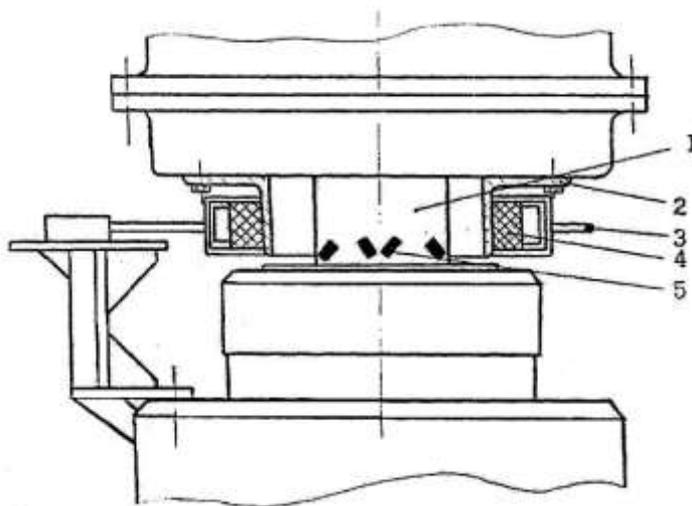
В статье даны отдельные примеры анализа крутильных колебаний крупных агрегатов ГЦН, а также стендов испытания узлов.

*Ключевые слова:* датчик момента, тензорезистор, стенд, резонанс, крутильные колебания, шаговые двигатели.

Первый опыт использования бесконтактного датчика момента для исследования главных циркуляционных насосов атомных станций (ГЦН АЭС) был осуществлен в начале 80-х годов XX в., когда потребовалось провести тензометрирование валопроводов ГЦН в условиях III блока БАЭС типа БН-600 с целью обнаружения резонансных зон крутильных колебаний [1].

ГЦН АЭС представляют собой вертикальную многомассовую конструкцию значительной длины и веса. К тому же на валу приводного электродвигателя располагается инерционный накопитель – маховик, обеспечивающий замедленное снижение частоты вращения и расхода теплоносителя главных контуров в переходных режимах станции при перерывах питания или полном обесточивании насосов. Такая конструкция ГЦН склонна к возникновению крутильных колебаний и деформаций собственно валопроводов насосного агрегата, а также узлов их соединения. Возможность появления резонансов крутильных колебаний валов усугубляется тем, что насосы главных контуров реакторов на быстрых нейтронах имеют системы плавного регулирования частоты вращения.

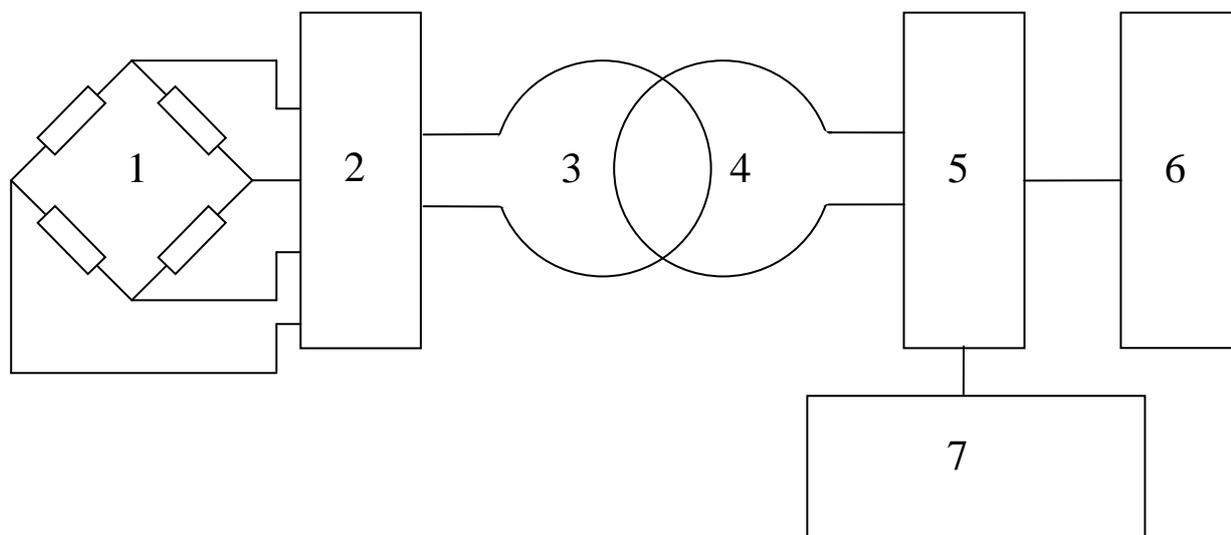
В настоящее время ясно, что в таких условиях важное значение приобретает диагностика крутильных колебаний с целью контроля резонансных явлений в валопроводах во всем диапазоне регулирования частоты вращения ГЦН. Тогда использовалась импортная бесконтактная тензометрическая система типа «Assurex-1200».



**Рис. 1. Тензометрический имитатор полумуфты для исследования крутильных деформаций валопровода:**

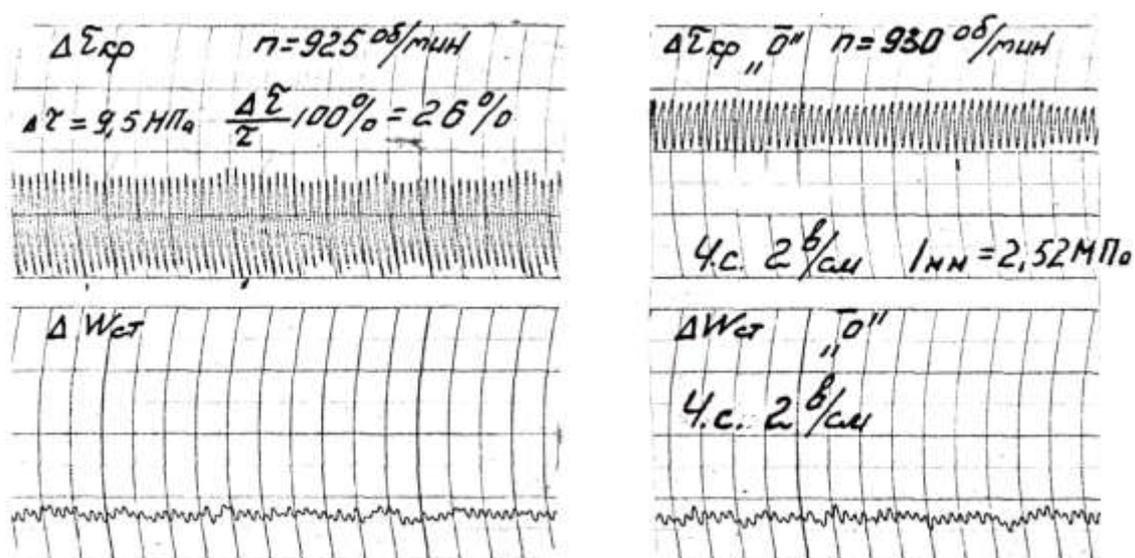
1 - вал-имитатор, 2 - крепежный стакан, 3 - приемная антенна,  
4 - измерительно-передающее устройство, 5 - тензорезисторы

Исследования проводились с применением тензометрического имитатора полумуфты 1 (рис. 1, рис. 2), установленного в доработанный узел насоса. Для измерения деформаций кручения тензорезисторы 5 устанавливаются на вал-имитатор в направлении главных напряжений. Измерительно-передающее устройство 4 системы устанавливалось на диаметре стакана 2, прикрепленного к имитатору 1, а приемная антенна 3 закреплялась на корпусе насоса. Питание тензометрического моста 1 и передача измерительной информации осуществлялись вращающимся измерительно-передающим устройством 2 с антенной 3 по радиоканалу 4 радиоприемного устройства, с которого информация передавалась на быстродействующий самопишущий прибор 6. Для контроля работы передающего и приемного устройств применялся осциллограф. На рис. 3 резонансная зона крутильных деформаций валопровода ГЦН в зоне частоты вращения 947 об/мин, где амплитуда деформаций вала резко возрастает [2].



**Рис. 2. Измерительная система для бесконтактного измерения крутящего момента:**

1 - тензометрический мост, 2 - измерительное передающее устройство, 3, 4 - передающая и приемная антенны, 5 - радиоприемное устройство, 6 - самопишущий прибор, 7 - осциллограф



**Рис. 3. Осциллограммы динамических усилий кручения в вале насоса и пульсаций мощности в цепи статора электродвигателя при регулировании частоты вращения системой асинхронно-вентильного каскада**

Эти мероприятия позволили оперативно установить причины возникших резонансов, доработать валы ГЦН и найти практические решения, обеспечивающие длительный ресурс эксплуатации насосов блока БН-600.

В настоящее время серийно выпускаются бесконтактные датчики крутящего момента. Датчик T10FM предназначен для измерения статического и динамического моментов в широком диапазоне измерения момента и частоты вращения (от 15 до 80 кНм, до 8000 об/мин.). Предел основной допускаемой погрешности измерения  $\pm 0,1\%$ . Датчик T20WN допускает измерение момента в диапазоне 0,1 до 200 Нм с точностью  $\pm 0,2\%$  при частоте вращения до 10000 об/мин (рис. 4).



**Рис. 4. Датчики крутящего момента для механизмов различной мощности:**  
а – датчик T20WN; б – датчик T10FM

Датчики совместно с комплектной измерительной системой, поставляемой с программным обеспечением, могут стать гибкой измерительной системой с возможностью значительного расширения числа каналов. В зависимости от поставленных задач измерения могут производиться с частотой опроса свыше 2000 измерений в секунду для многоканальных модулей и до 19200 для одноканальных модулей.

Упомянутые датчики момента и вторичная аппаратура к ним имеют метрологические сертификаты об утверждении типа средств измерений. Система зарегистрирована в государственном реестре средств измерений и допущена к применению в Российской Федерации.

Измерения производятся тензорезисторами, установленными на компенсационной муфте. Для датчика T10FM осуществляется бесконтактная передача сигнала на неподвижную антенну с последующей его обработкой во вторичном измерительном модуле. Через эту же антенну производится бесконтактная подача питания на вращающуюся систему измерения.

Муфта с тензодатчиками и системой передачи сигнала устанавливается между валами электродвигателя и насоса. Использование датчика момента особенно актуально, когда электроприводы насосов комплектуются системами плавного регулирования частоты вращения. При испытаниях ГЦН 1-го и 2-го контуров на полномасштабном насосном стенде для испытаний собственно насосов и комплектных регулируемых электроприводов предполагается использование датчика момента в двух направлениях:

- 1) измерение статического момента на различных частотах вращения для определения мощности на валу и КПД ГЦН, что является сдаточным параметром по ГОСТ;
- 2) определение возможных крутильных резонансов в валах насосного агрегата с помощью осциллографирования амплитуд деформации вала.

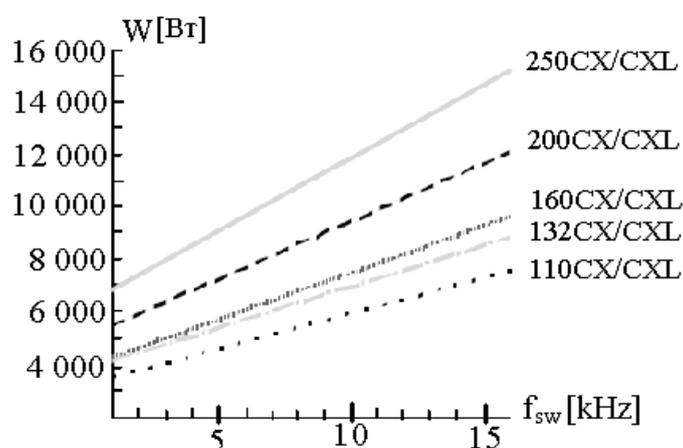
Задачу 1 без использования датчика момента решить затруднительно, так как точное

измерение мощности, потребляемой двигателем и учет потерь в двигателе, и преобразователе частоты невозможны ввиду сильных искажений форм тока и напряжений.

Задача 2 также весьма актуальна ввиду достаточно сложной архитектуры создания электромагнитного момента преобразователем частоты и наличия многих других факторов, влияющих на амплитуду и частоту момента с возможностью появления резонансов.

Чтобы представить сложность вычисления мощности собственно насоса, рассмотрим алгоритм расчета потерь в электродвигателе и преобразователе частоты (ПЧ), которые необходимо вычесть из мощности, потребляемой насосным агрегатом и преобразователем частоты из питающей сети. Можно считать, что мощность, потребляемая из сети синусоидальна, т.к. она менее всего подвержена искажению из-за наличия преобразователя частоты. В связи с этим эта мощность может быть измерена достаточно точно традиционными методами и приборами.

Потери мощности в ПЧ имеют постоянную составляющую – это затраты на вентиляцию преобразователя и питание его цепей управления. Следующая составляющая потерь ПЧ – это потери, зависящие от несущей частоты частотно-импульсного модулятора (ШИМ) и мощности ПЧ. Эти зависимости приводятся в руководствах по эксплуатации ПЧ некоторыми иностранными фирмами, выпускающими преобразователи частоты (например, Vacon, ABB). Очевидно, что эти данные по потерям в ПЧ метрологически не аттестованы и носят справочный характер (рис. 5).



**Рис. 5. Зависимость потерь в ПЧ от несущей частоты ШИМ инвертора для разных преобразователей частоты фирмы «Vacon» при напряжении сети 400 В и 500 В**

Потери мощности в приводном электродвигателе определяются по классической диаграмме распределения потерь в электрической машине. При регулировании частоты вращения механизма необходимо иметь расчетные или экспериментальные зависимости механических, а также электрических потерь в активных частях машины для различных частоты и напряжения.

В результате можно констатировать, что такая методика весьма затратна, так как требует большого объема расчетных и экспериментальных работ, и не может иметь достаточную точность ввиду большого числа переменных составляющих.

Некоторые современные преобразователи имеют канал, предназначенный для определения среднего и мгновенного значений моментов, вычисленных на основании параметров схемы замещения электрической машины и измерения электрических величин с помощью внутренних датчиков ПЧ. Но канал имеет только информационное значение и метрологически не аттестован. К тому же канал фиксирует вращательный расчетный момент, создаваемый самим электроприводом. Этот момент неэквивалентен величине крутильной деформации валопровода механизма, являющейся реакцией на вычисленный момент электропривода. Он не регистрирует возможные механические резонансные явления, зависящие от собствен-

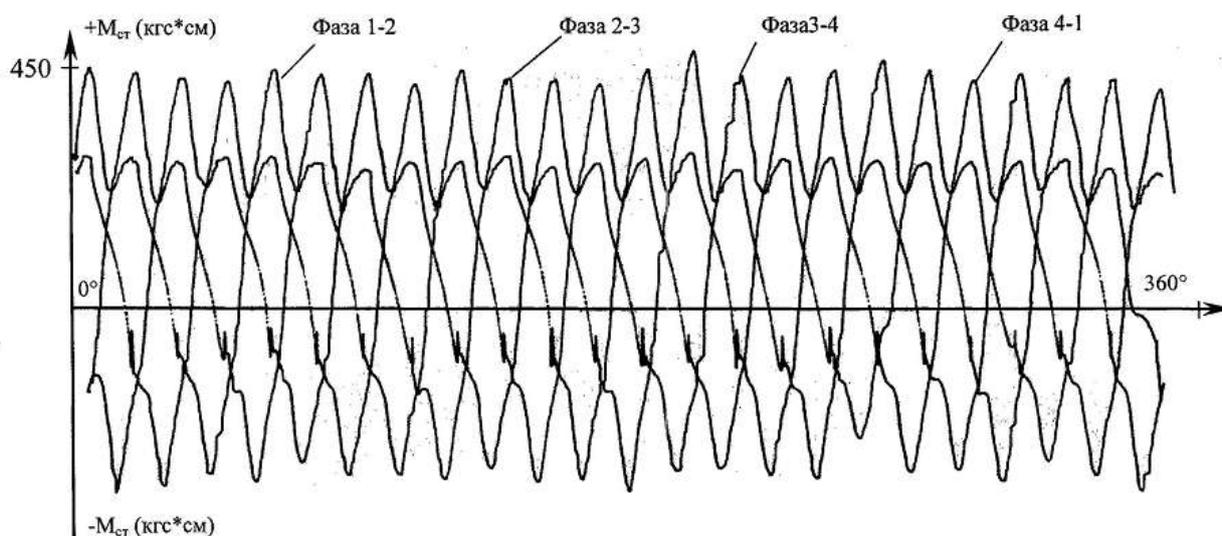
ных частот частей валопроводов и жесткости связей в узлах их соединения. Тензометрирование вала непосредственным быстродействующим датчиком в этом случае наиболее эффективно.

До принятия решения о приобретении системы измерения момента и выбора варианта муфты целесообразно проработать конструктивно совместимость муфты с валами электродвигателя и насоса, методику ее монтажа, а также возможность унификации муфты для разных ГЦН с мощностями одного порядка.

Использование муфты с датчиком крутящего момента должно качественно изменить результаты испытаний ГЦН как в стационарных, так и в переходных режимах работы. Так как датчик момента является достаточно чувствительным элементом и может непрерывно передавать визуальную информацию непосредственно с вала насоса, то система непрерывного измерения момента служит индикатором качества сборки насосного агрегата, включая его узлы уплотнения и подшипники.

С помощью датчика можно также измерять начальный момент страгивания насоса при нулевой частоте вращения. Особый интерес представляют результаты испытаний в квазистационарных режимах, где только с помощью быстродействующей моментной муфты можно увидеть деформации валопроводов, в том числе, возможные резонансы крутильных колебаний. Причем деформации валопроводов могут быть зафиксированы как крутильные, так и изгибные (в зависимости от мест расположения тензорезисторов на валопроводе).

Использование датчика момента для исследования квазистационарных режимов хорошо иллюстрируется на примере стенда испытаний шаговых электродвигателей. Применение быстродействующего датчика момента позволяет не только снять традиционные статические рабочие характеристики шагового двигателя, но и благодаря регистрации быстрой динамики всех переходных процессов, включая режимы пуска, торможения, генераторных режимов, дает возможность проанализировать и найти оптимальную форму электромагнитного момента, повысить плавность хода и минимизировать потери (рис. 6).



**Рис. 6. Зависимость статического момента от угла поворота ротора на 360° при питании фаз (снято с использованием датчика момента)**

На стенде используется датчик T20WN/50NM, предназначенный для более низких значений момента (1-50 нм).

Датчики такого же типа используются при проведении моделирования на испытательных стендах для решения задач исследования и оптимизации гидравлических трасс и возду-

ходов. Очевидно, что здесь нужны очень чувствительные датчики, рассчитанные на небольшие моменты (от 1 до 10 нм).

С использованием таких датчиков исследовались проблемы оптимизации конструкции и внедрения маховика герметичного электронасоса. Задача эксперимента заключалась в минимизации момента трения и механических потерь.

Не менее целесообразно внедрение датчиков момента при испытаниях подшипниковых узлов и уплотнений насосов и газодувков, когда происходит поиск материалов и узлов трения с точки зрения минимизации потерь и оценки надежности во всех возможных режимах, имитирующих рабочие и аварийные режимы установок. Датчики Т10FM с диапазоном измеряемых моментов уже внедрены на стенде испытания уплотнений ГЦН 1,2 БН-800, намечено их применение на стендах испытаний газовых уплотнений, резервных подшипников по установке ГТ-МГР.

Таким образом, целесообразность внедрения датчиков момента на испытательных стендах очевидна, но в то же время необходимо учитывать, что внедрение датчиков момента затратно и требует повышенной квалификации персонала испытателей.

В связи с этим имеет смысл иметь единый информационный банк имеющихся на предприятии датчиков момента. Целесообразно разработать метрологическую методику поверки и установку для её проведения, так как поверка датчиков момента в метрологических центрах весьма дорогая. В заключение следует отметить, что датчики момента могут стать хорошим инструментом на различных испытательных стендах атомной отрасли.

#### Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Расчет пульсаций электромагнитного момента и крутильных колебаний электропривода насосного агрегата по схеме асинхронного вентильного каскада / Е.Ю. Анишев, В.В. Юдин // Электротехническая промышленность. Серия «Электропривод». 1984. Вып. 1 (123). С. 8–11.
2. **Анишев, Е.Ю.** Вопросы прочности насосного агрегата РУ АЭС БН-600 / Е.Ю. Анишев, Ф.М. Митенков, В.М. Чистяков // Научно-технический сборник XXIII Международного совещания по проблемам прочности двигателей. Россия. М. апрель 2002. С. 6–7.

*Дата поступления  
в редакцию 22.10.2010*

**E.Y. Anishev**

#### **EXPERIENCE OF APPLICATION OF CONTACTLESS A TORQUE TRANSDUCER ON TEST BENCH**

The article presents separate examples analysis of the torsion fluctuations of the large components, and also test bench of the units.

*Key words:* a torque transducer, the strain gage, bench, resonance, torsion fluctuations, step motors.

УДК 621.3

Е.Ю. Анишев, Е.В. Роцин

**ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ АЭС**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Проанализированы аспекты влияния и способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных регулируемых асинхронных электроприводов собственных нужд атомных электростанций.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, электроприводы, атомные электростанции, асинхронный вентильный каскад, преобразователи частоты.

В последние десятилетия мощный регулируемый электропривод находит все большее применение в системах регулирования расхода теплоносителей главных контуров АЭС. С ростом суммарной мощности электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН), а она составляет в среднем 2–2,5% от выходной мощности блока, растут единичные мощности электроприводов ГЦН, которые достигают 5 МВт (для блока БН-800). Это выдвигает на первый план проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов в системе собственных нужд АЭС (СН АЭС).

Проблемы ЭМС включают в себя целый комплекс требований:

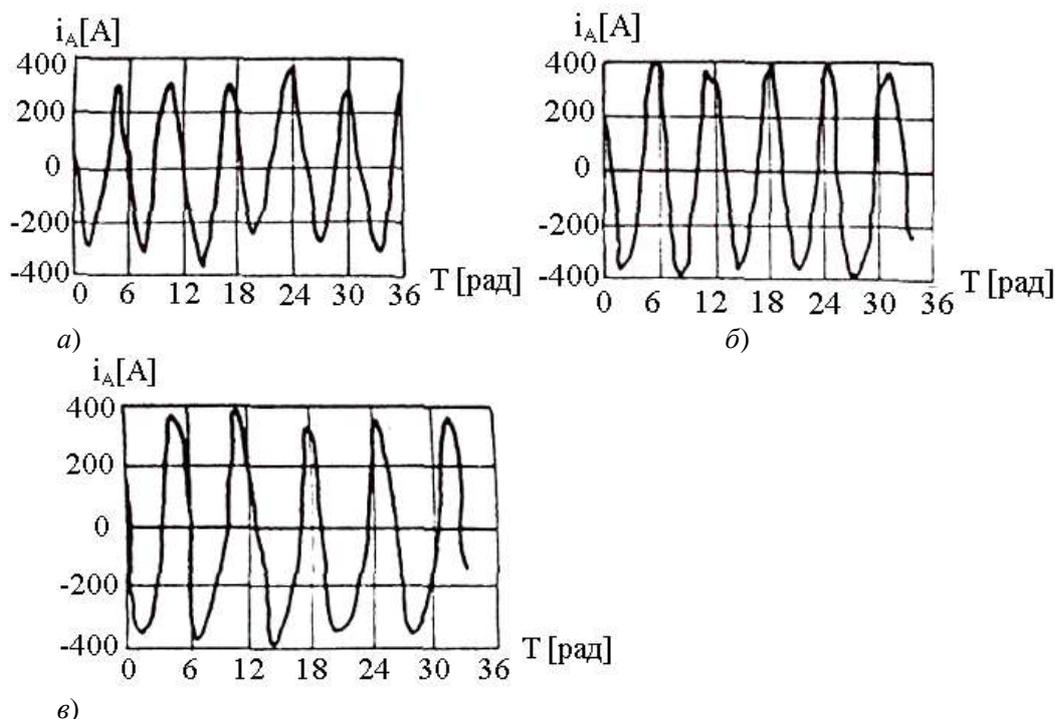
- влияние высших гармонических (ВГ) тока и напряжения на потери мощности и вращающий момент приводного электродвигателя;
- влияние ВГ на изоляцию статора и питающие кабели электродвигателя;
- воздействие коммутационных перенапряжений преобразователя частоты (ПЧ) относительно Земли, а также ВГ, создаваемых ПЧ, на изоляцию оборудования и кабельные линии энергосистемы собственных нужд.

Анализ проблем ЭМС для электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК), работающего почти 30 лет в качестве привода ГЦН 1-го и 2-го контуров блока БН-600 Белоярской АЭС, подробно рассмотрен в работе [1].

При расчетах искажений сети электроснабжения собственных нужд и энергетических показателей электроприводов ГЦН по схеме АВК ток статора асинхронного электродвигателя (АД) обычно принимают синусоидальным, а основным источником ВГ считается инвертор. Между тем, несинусоидальность тока статора АД необходимо учитывать при работе АВК на пониженных частотах вращения в автономной энергосистеме (при питании от аварийного дизель-генератора), содержащей конденсаторные установки.

На рис. 1 показан фазный ток статора двигателя  $i_A$ , рассчитанный для случая питания АВК мощностью 3500 кВт от автономного СГ мощностью 4000 кВА, а также опытные осциллограммы тока при питании от сети неограниченной мощности и автономного СГ. Анализ опытных и расчетных кривых показывает, что ток каждой фазы АД в общем случае носит непериодический характер, так как является суммой трех токов с частотами  $(1-s)\omega$ ,  $\omega$ ,  $(1+s)\omega$  ( $\omega$  - круговая частота вращения,  $s$  - скольжение ротора АД).

Расчет показывает, что добавочные потери от высших гармоник в обмотках статора и ротора АД оказывают существенное влияние на общие потери АВК и нагрев машины. Наиболее заметна несинусоидальность токов и влияние гармонических на КПД привода при малых частотах вращения. Для двигателя ВАКЗ-16-64-6 (3500 кВт, 1000 об/мин) дополнительные потери от ВГ (без первой) на частоте вращения 750 об/мин составили для ротора 2,7 кВт, для статора 0,84 кВт, КПД в целом снижается на 0,6% (рис. 2).

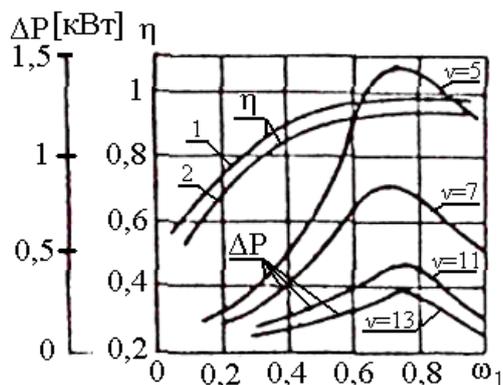


**Рис. 1. Фазный ток статора двигателя АВК 3500 кВт при скольжении  $s=0,25$ :**

*a, б* – питание от генератора (*a* – расчет, *б* – эксперимент);

*в* – питание от сети (эксперимент)

Экспериментальные исследования показывают, что влияние тока статора на гармонический состав сетевого тока незначительно, особенно в зоне подсинхронных частот вращения. Определяющими в спектре гармоник общего тока АВК являются гармоники тока инвертора.



**Рис. 2. Зависимости потерь ( $\Delta P$ ) для 5, 7, 11, 13 гармоник и кпд ( $\eta$ ) двигателя от частоты вращения ротора:**

*1* – без учета, *2* – с учетом потерь от высших гармоник

Анализ распределения ВГ в сетях СН АЭС производился на основании построения эквивалентной схемы замещения блока АЭС и определения спектрального состава токов и напряжений в расчетных точках по известному спектру тока источника ВГ. В сети СН АЭС группы потребителей: источники питания - турбогенератор или дизель-генератор; источники ВГ - регулируемые электропривода ГЦН; потребители - асинхронные и синхронные электродвигатели, трансформаторы, нагреватели, сети освещения и т.д. Расчет гармонических сопротивлений блока производился в соответствии с [3]. По указанной методике произведен анализ распределения ВГ, коэффициентов несинусоидальности напряжений  $K_{НС}$  и перегрузки  $K_{П}$  отдельных потребителей для блока АЭС БН-600. Величина  $K_{НС}$  для напряжений в

различных точках блока не превышает величины 5%, регламентированной ГОСТ 13109-97. Перегрузка потребителей незначительна и составила для высоковольтных двигателей максимальной мощности не более 0,3%, для турбогенератора - не более 0,15%. В основных режимах станции (при питании сети собственных нужд от турбогенератора) конденсаторные установки обычно отсутствуют и частотная характеристика схемы замещения практически линейна. В условиях промышленной сети, имеющей меньшую, чем на АЭС, мощность (например, на испытательном стенде) искажения сети и влияние ВГ на потребителя проявляется более резко. Кроме того, частотная характеристика схемы замещения из-за наличия конденсаторных установок имеет явно выраженные максимумы вследствие резонансов токов и напряжений на некоторых гармониках (рис. 3).

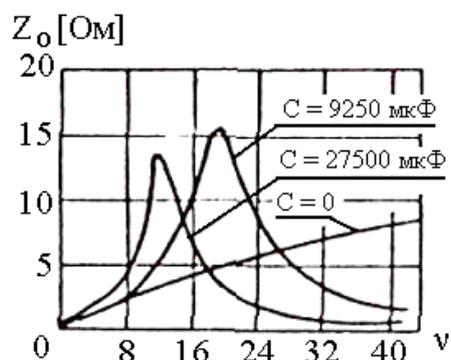


Рис. 3. Частотная характеристика схемы замещения с выключенными ( $C=0$ ) и включенными конденсаторными батареями

Это может привести к перегрузке конденсаторных установок. Так, при совместной работе электроприводов ГЦН-1 и ГЦН-2 перегрузка составила  $\sim 30\%$ , что повлекло к необходимости введения специальных токоограничивающих реакторов.

Аналогичные явления могут наблюдаться при питании ГЦН в аварийном режиме, когда АВК питается от дизель-генератора и используются конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности. В общем случае энергосистема по отношению к АЭС, как к источнику ВГ, может играть роль фильтр-пробки ( $X_{gv} = \infty$ ) или режекторного (отсасывающего) фильтра. Практические наблюдения показывают, что в основном ВГ замыкаются внутри сети СН АЭС, а гармоники, циркулирующие в энергосистеме, имеют высокий порядок ( $\nu = 25 \div 35$ ) и величина их незначительна (рис. 4).

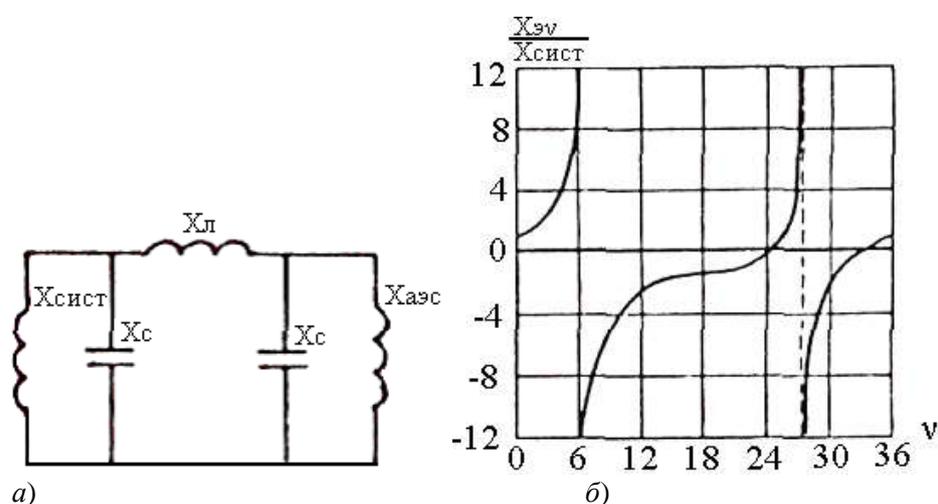


Рис. 4. Схема замещения (а) и частотная характеристика (б) энергосистемы

Таким образом, в системе электропривода АВК искажение гармонического состава токов АВК оказывает незначительное влияние на работу электродвигателя в части его нагрева от высших гармоник и снижения КПД, а также на работу энергосистемы собственных нужд и её потребителей.

Более серьезными проблемами для электропривода АВК оказались искажения тока, создаваемые вентиляльным преобразователем в цепи ротора и приведшие к низкочастотным пульсациям электромагнитного момента электродвигателя. Частота этих колебаний линейно связана со скольжением ротора асинхронных электродвигателей и снижается по мере приближения его к номинальному режиму работы. В связи с тем, что ГЦН – это механизмы высокоинерционные, имеющие низкие величины собственных частот крутильных колебаний, они могут быть подвержены опасным резонансным явлениям в валопроводах насосных агрегатов (рис. 5). Это явление в последние годы хорошо исследовано теоретически и практически и освещено в литературе [3, 4].

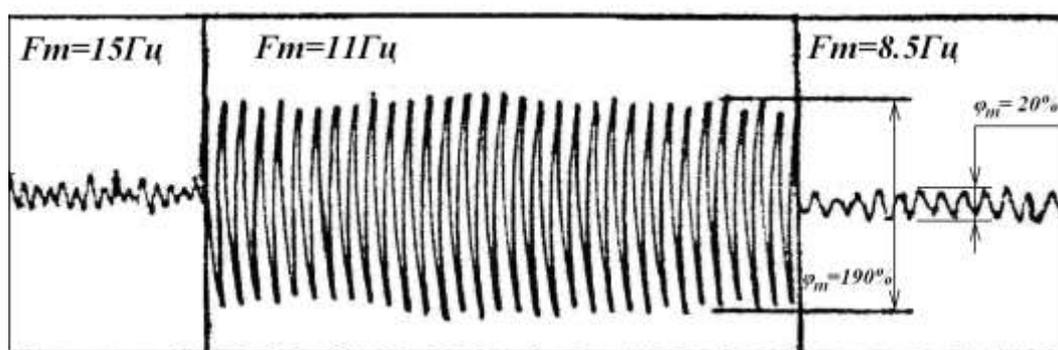


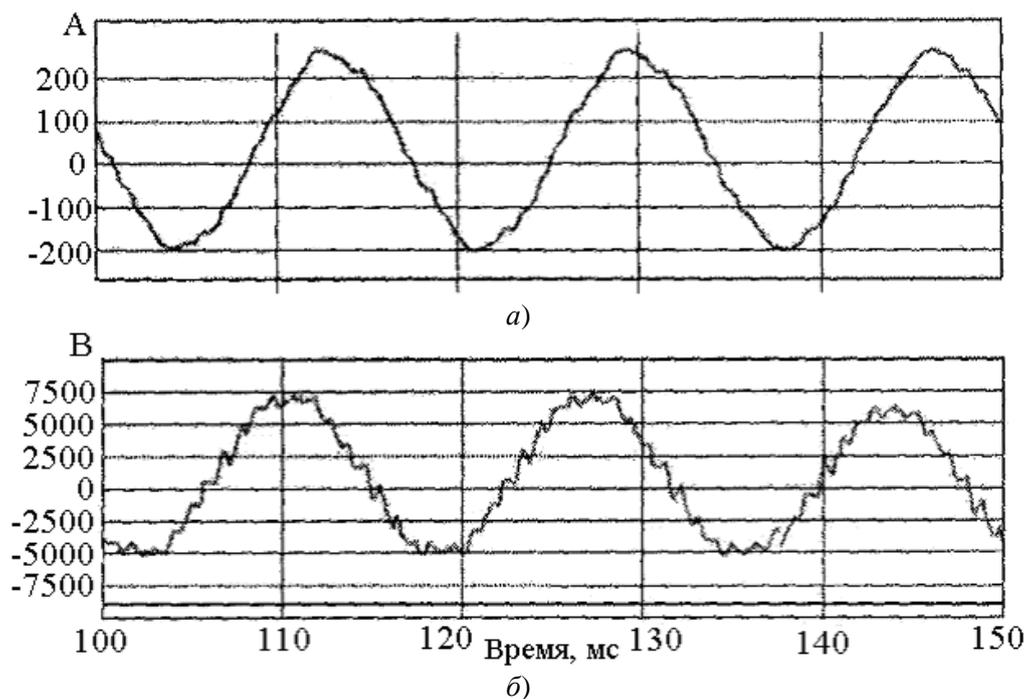
Рис. 5. Резонанс крутильных колебаний валопровода насоса в системе АВК 3500 на частоте вращения 965 об/мин

Для приводов всех типов важна форма токов и напряжений в двигателе, которая должна быть максимально близка к синусоидальной. В отличие от системы привода по схеме АВК привод с преобразователем частоты вследствие высоких частот коммутации токов в статоре резонанс крутильных колебаний валопроводов ГЦН маловероятен. В этом случае важны проблемы снижения электропотерь в активных частях электрической машины, а также сохранение качества изоляции токоведущих частей собственно двигателя и кабельных линий.

Очевидно, что влияние ПЧ в значительной мере определяется его топологией и алгоритмами управления автономного инвертора. Наиболее оптимально обеспечивается ЭМС преобразователей частоты с автономным инвертором тока (АИТ) на GTO или SGCT- тиристорах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В таких инверторах, благодаря тому или иному алгоритму ШИМ обеспечивается минимизация искажений токов двигателя и на выходе АИТ формируется ток, основная гармоника которого практически может достигать 100%. Форма напряжения статора не содержит пиков коммутационных перенапряжений, близка к синусоидальной, а доля основной гармоники в напряжении статора также близка к 100%.

Например, преобразователь частоты PowerFlex 7000 фирмы Allen-Bradley обеспечивает близкую к синусоидальной форму кривых тока и напряжения двигателя, что исключает заметный дополнительный нагрев двигателя или нагрузку на его изоляцию. Температура двигателя при работе от частотно-регулируемого привода возрастает примерно на 3°C по сравнению с работой двигателя от сети. Значение  $du/dt$  в кривой напряжения не превышает 10 В/мкс. Амплитуда напряжения, приложенного к изоляции двигателя, соответствует величине действующего напряжения, деленной на 0,707. Проблемы отраженной волны и  $du/dt$ , часто связываемые с приводами на основе инвертора напряжения, не являются актуальными. Типичные формы тока и напряжения двигателя представлены на рис. 6. Такие благоприят-

ные для двигателя формы тока и напряжения получены благодаря использованию метода селективного подавления гармоник в инверторе для устранения высших гармоник главного порядка в сочетании с выходным конденсатором небольшой емкости (в составе привода) для устранения гармоник при работе на высоких скоростях.



**Рис. 6. Форма тока и напряжения двигателя при полной нагрузке и максимальной скорости:**

*а* – форма тока; *б* – форма напряжения

По рекомендациям фирмы и, как показала практика, ПЧ на основе АИТ с ШИМ без ограничений можно сопрягать со стандартными асинхронными двигателями без снижения их номинальной мощности, и на длину соединительного кабеля между инвертором и двигателем не накладывается никаких ограничений (до 15 км).

Иначе обстоит дело при применении ПЧ на основе АИН с ШИМ. В этих преобразователях при высоковольтном исполнении применяются модули IGBT или последовательно соединенные IGCT. Такие преобразователи получили широкое распространение в мощных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, но при их применении необходимо обеспечить снижение воздействий импульсов выходного напряжения АИН на изоляцию обмотки статора и локализацию волновых процессов в соединительном кабеле между инвертором и двигателем, сопровождающихся перенапряжениями (проблема "длинного кабеля").

В зависимости от длины кабеля возможно появление отраженной волны напряжения на выводах статора двигателя, достигающего в худшем случае практически двукратного значения, как результат несогласованности волнового сопротивления кабеля с входным сопротивлением двигателя, определяемым индуктивностью рассеяния статора и эквивалентной частотой фронта импульса. Возможность повреждения изоляции тем выше, чем меньше время нарастания импульсов выходного напряжения АИН, т.е. чем выше  $du/dt$ .

Для устранения негативных последствий, связанных с формой выходного напряжения, на практике в высоковольтных ПЧ применяют резонансные (LC) фильтры, подключаемые к выходу АИН.

Проблема электромагнитной совместимости вентиляльных преобразователей с примыкающими сетями электроснабжения связана, главным образом, с двумя факторами – потреб-

лением реактивной мощности на основной частоте и искажениями формы питающих преобразователи напряжений.

Оценку ЭМС можно проводить по расчету такого показателя качества электроэнергии, как коэффициент несинусоидальности  $K_{нс}$ . Величина  $K_{нс}$  зависит от того, какой выпрямитель, 6- или 12-пульсный, содержит ПЧ.

Для того, чтобы ни в одном режиме  $K_{нс}$  напряжения на шинах сети не превосходили норму по требованиям стандарта (<5%), отношение мощности короткого замыкания  $S_{кз}$  на этих шинах и номинальной мощности преобразовательного трансформатора  $S_{ном}$  (или номинальной полной мощности выпрямителя при бестрансформаторном подключении к сети) должно подчиняться неравенству

$$\frac{S_{кз}}{S_{ном}} \geq 20 \sqrt{\frac{1}{e_k^*} - 1}, \quad (1)$$

где  $e_k^*$  - напряжение КЗ преобразовательного трансформатора (или эквивалентное ему значение индуктивного сопротивления входного реактора), о.е.

Практическое осуществление этого способа означает необходимость замены существующего трансформатора собственными нужд более мощным. Очевидно, что такое решение в целом является экономически и технически нецелесообразным. Очевидно, что способ, основанный на улучшении топологии схемы преобразования, является более предпочтительным, чем рассмотренный ранее, но он требует применения специального разделительного трансформатора и усложнения преобразователя частоты (ПЧ).

Наиболее просто осуществляется двенадцатипульсная схема выпрямителя ( $\mu=12$ ) путем параллельного или последовательного соединения шестипульсных выпрямителей, подключаемых к вторичным обмоткам трехобмоточного трансформатора, соединенным в «треугольник» и «звезду».

Одним из наиболее радикальных и перспективных способов решения задачи электромагнитного совмещения тиристорных электроприводов, уменьшения их влияния на сети электроснабжения и другие нагрузки (двигатели, трансформаторы) является разделение потребителей, при котором для регулируемых электроприводов формируется отдельная сеть электроснабжения.

Наличие в системе «сеть электроснабжения – преобразователь частоты – асинхронный двигатель» внутренних индуктивностей и емкостей оборудования относительно «земли», образующих колебательные контуры, приводит к тому, что электромагнитные процессы нормальной коммутации в преобразователе могут сопровождаться развитием перенапряжений относительно «земли».

Эти перенапряжения воздействуют на изоляцию оборудования преобразовательной схемы и нагрузки (приводного электродвигателя), ухудшая условия их эксплуатации. Кроме того, они вызывают увеличение токов утечек, замыкающихся по заземлениям, металлическим частям конструкции, броне кабелей и существенно повышающих уровни помех на системы управления и защиты преобразователя, и, в ряде случаев, могут приводить к ложному срабатыванию защит от замыкания на «землю».

Для демпфирования высокочастотной составляющей предложено, в частности, применять различные схемы включения RC-фильтров нулевой последовательности.

Наиболее рациональным способом увеличения индуктивного сопротивления в звене постоянного тока при сохранении приемлемых массогабаритных показателей ПЧ является включение последовательно со сглаживающими реакторами специального реактора с замкнутой магнитной системой. При этом магнитопровод такого реактора не должен насыщаться при протекании по его обмоткам рабочих токов ПЧ.

Указанным требованиям удовлетворяет реактор (РМ) с двумя встречно-параллельно включенными обмотками, расположенными на одном замкнутом магнитопроводе (рис. 7).

Каждая обмотка РМ включена в один полюс звена постоянного тока ПЧ. При этом магнитные потоки, обусловленные рабочим током  $i_p$  ПЧ взаимно уничтожаются, т.е. для рабочего тока РМ имеет малое сопротивление (сопротивление рассеяния).

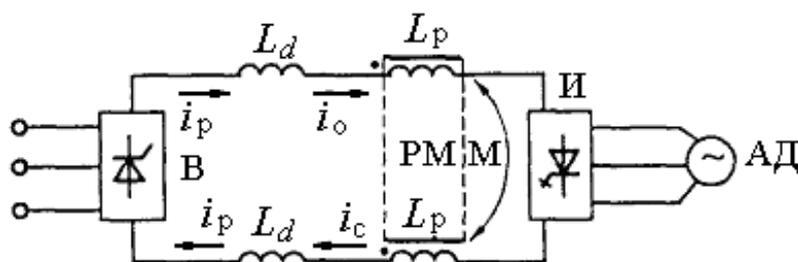


Рис. 7. Схема включения реактора с магнитопроводом в звено постоянного тока ПЧ

На рис. 8 приведена обобщенная зависимость амплитуды перенапряжений относительно "земли" при применении реактора с замкнутым магнитопроводом в звене постоянного тока ПЧ. Здесь максимальное напряжение относительно земли  $U_{max}$  отнесено к амплитуде фазного напряжения. Поэтому при известной эквивалентной емкости  $C_э$  выбор индуктивности РМ следует проводить по соотношению

$$L_p = L_{p,э} = \frac{(5 \div 10) \cdot 10^{-6}}{C_э}, \text{ Гн.} \quad (2)$$

Область оптимальных значений произведения  $L_{p,э}C_э$  выделена на рис. 8 штриховкой.

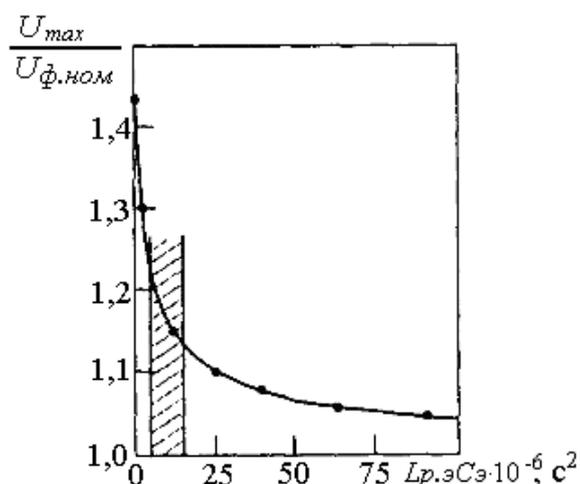


Рис. 8. Зависимость напряжения относительно «земли» на изоляции статора от параметров  $L_{p,э}C_э$  схемы замещения

В целом, оценивая проблемы ЭМС различных типов электроприводов, следует сказать, что вариант с преобразователем частоты, построенном на элементной базе нового поколения, которая имеет на несколько порядков более высокую надежность, является более перспективным. Некоторые проблемы ЭМС ПЧ решаются более радикальным путем: повышение класса изоляции электрических машин и кабелей на выходе ПЧ до уровня реальных перенапряжений. За рубежом разработаны специальные кабели, рассчитанные на  $U_{max} du/dt$  и предназначенные для использования в сетях с преобразователями частоты. Выбор способа решения проблем ЭМС с учетом всех вышеуказанных факторов должен базироваться на технико-экономическом расчете.

### Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Исследование гармонического состава токов электропривода по схеме асинхронно вентильного каскада / Е.Ю. Анишев, В.В. Юдин // Электропривод и автоматизация в машиностроении. ВЗМИ. Москва, 1986. С. 30–34.
2. **Жежеленко, И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1974.
3. **Анишев, Е.Ю.** Крутильные колебания вертикальных валопроводов в системе «мощный электропривод с регулируемой частотой вращения – центробежный циркуляционный насос» // Электротехника. 2009. №6.
4. **Анишев, Е.Ю.** Резонансные крутильные колебания в электромагнитных системах «асинхронный электропривод – насос» большой мощности // Приводная техника. 2009. №1.
5. **Лазарев, Г.Б.** Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. № 10.
6. **Лазарев, Г.Б.** Обеспечение электромагнитной совместимости при применении частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в системах электроснабжения собственных нужд ТЭС // Вестник ВНИИЭ. 2000.

*Дата поступления  
в редакцию 22.10.2010*

**E.Y. Anishev, E.V. Roschin**

### **PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF VARIABLE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN CIRCULATING PUMPS OF THE ATOMIC POWER STATION**

The aspects of influence and ways of electromagnetic compatibility providing of power variable asynchronous electric drives in auxiliaries of the atomic power station have been analyzed.

*Key words:* electromagnetic compatibility, electric drives, atomic power station asynchronous salve cascade, frequency converter.

УДК 621.314.2.38

Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАТОРА  
НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА  
С ЗОННОЙ ШИМ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассмотрен принцип повышения коэффициента мощности электротехнологической установки большой мощности. Устройство выполняет компенсацию реактивной мощности и мощности искажений в системе питания выпрямительной нагрузки с резкопеременным характером. Корректор построен на базе многоуровневого каскадного преобразователя с зонной ШИМ. Представлена математическая модель в синхронных  $dq$ -координатах и результаты имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink.

*Ключевые слова:* корректор коэффициента мощности, СТАТКОМ, многозонная ШИМ, реактивная мощность, мощность искажений, активный фильтр.

Проблема повышения качества электроэнергии приобретает особую актуальность вследствие непрерывного роста мощных несимметричных, нелинейных и быстроизменяющихся потребителей электроэнергии, существенно ухудшающих показатели качества электроэнергии. К таким потребителям, прежде всего, относятся мощные электрометаллургические установки, тяговые подстанции, предприятия металлообработки и др. [1, 2].

К крупным токоприемникам относятся токоприемники с потребляемой мощностью выше 1000 кВт, которые подключаются чаще всего непосредственно к сетям промышленных предприятий 6–10 кВ. К таким мощным токоприемникам относятся электропечные агрегаты, установки контактной электросварки и преобразовательные агрегаты электролизных установок. Реактивная нагрузка этих приемников может составлять до 80–130% активной нагрузки.

При работе электрооборудования на питающих шинах сети переменного тока возникают скачки потребляемой реактивной мощности, искажения с коэффициентом несинусоидальности до 10 – 20%, а также при несимметричной нагрузке возникает несимметрия токов фаз. Все данные явления негативно сказываются не только на потребителях, подключенных к данной питающей сети, но и на силовом распределительном оборудовании.

Обычные меры для улучшения качества напряжения (усиление питающей сети, установка фильтро-компенсирующих емкостно-индуктивных элементов) зачастую оказываются дорогостоящими и неэффективными, особенно в области высоких напряжений и больших мощностей. Появление мощных быстродействующих преобразователей напряжения с полностью управляемыми вентилями позволяет реализовать их в узлах с мощными, нелинейными и резкоизменяющимися нагрузками.

Мощность электротехнологических установок может достигать десятков и даже сотен МВА. При этом из-за невысокого значения их коэффициента мощности величина потребляемой реактивной мощности и мощности искажений составляет значительную долю. При нагрузке с управляемым выпрямителем, например, дуговой печи постоянного тока (ДППТ), рациональным является использование многоуровневого корректора коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ (рис. 1) при напряжении питающей сети 10 кВ.

Для компенсации неактивной составляющей мощности на стороне высокого напряжения предлагается использовать четырехуровневый корректор коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ на высокой частоте (рис. 1). Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно из-за экономичного

использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формой выходного напряжения инвертора, а также идентичного их построения – однофазных мостовых инверторов, что упрощает не только конструкцию, но и математический анализ данного типа компенсатора [3, 4].

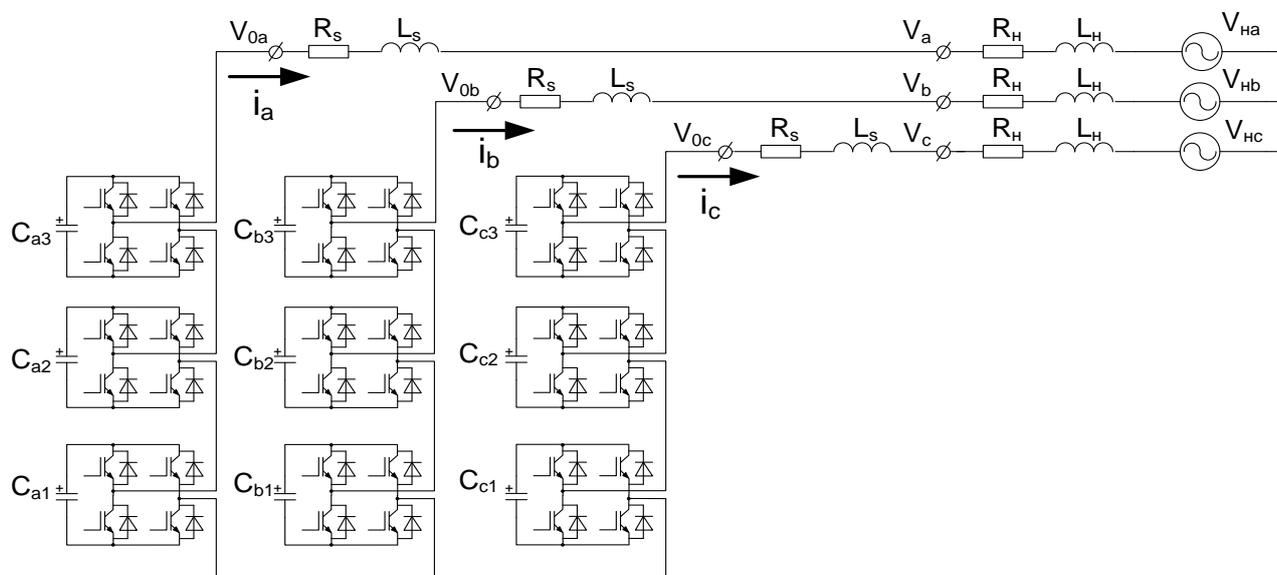


Рис. 1. Четырехуровневый корректор коэффициента мощности с зонной ШИМ

Принцип компенсации реактивной мощности заключается в перераспределении потока мощности в системе «питающая сеть – ККМ – нагрузка» таким образом, что весь поток реактивной мощности и мощности искажений циркулирует между ККМ и нагрузкой, не переходя в питающую сеть. Принцип компенсации мощности искажений заключается в генерировании ККМ в питающую сеть тока, все гармоники которого равны по амплитуде, но противоположны по фазе высшим гармоникам тока нагрузки. На рис. 2 представлена структурная схема перераспределения мощностей [5].



Рис. 2. Структурная схема потоков мощности при использовании ККМ

Математический анализ исследуемой схемы проводился в синхронной системе  $dq$ -координат, ориентированной по вектору напряжения питающей сети. Было получено описание ККМ для усредненной (1)–(2), и малосигнальной (3)–(4) математических моделей:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s/\omega \cdot L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s/\omega \cdot L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s/\omega \cdot L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_j}{dt} = -\frac{3E_j}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} m_{dj} & m_{qj} & m_{0j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix} + \frac{3 \cdot e}{\omega L_s} \begin{bmatrix} M_d \\ M_q \\ M_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s/\omega L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s/\omega L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s/\omega L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\frac{de_j}{dt} = -\frac{3e_j}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} I_d & I_q & I_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{dj} \\ m_{qj} \\ m_{0j} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} M_{dj} & M_{qj} & M_{0j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $m, i, e, v$  – соответственно отклонения параметров скважности ШИМ, тока ККМ, напряжения на конденсаторах и сети от точек покоя  $M, I, E$  и  $V$  соответственно.

Используя математическое описание каскадного многоуровневого ККМ можно найти передаточные характеристики основных параметров устройства. Провести анализ устойчивости функционирования системы управления и рассчитать параметры регулировочных звеньев можно либо по передаточным функциям (5)–(7), либо по уравнениям разностным дискретным уравнениям (8) и (9) представляющих собой систему векторного управления ККМ с реализацией алгоритма быстрого вычисления. По известному состоянию ККМ и нагрузке (токи и напряжения) определяется необходимое выходное напряжение ККМ для формирования компенсирующего тока.

$$W_{idd} = W_{iqq} = \frac{NE(R_s + pL_s)}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (5)$$

$$W_{iqd} = \frac{-NE\omega L_s}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (6)$$

$$W_{Eidj} = -\left( \frac{Y_{dj} L_s p + Y_{qj} L_s \omega + Y_{dj} R_s}{3p^2 C L_s + 3p C R_s + Y_{dj} Y_{qj} N} \right), \quad (7)$$

$$u_{df}^*(k) = u_{ds}(k) + \omega_s L_s i_{qf}(k) - \left[ \frac{L_s}{T_s} + \frac{R_s}{2} \right] \cdot \left[ (i_{df}^*(k) - i_{df}(k)) + \frac{T_s}{\left[ \frac{L_s}{R_s} + \frac{T_s}{2} \right]} \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} [i_{df}^*(n) - i_{df}(n)] \right], \quad (8)$$

$$u_{qf}^*(k) = \omega_s L_s i_{df}(k) - \left[ \frac{L_s}{T_s} + \frac{R_s}{2} \right] \cdot \left[ (i_{qf}^*(k) - i_{qf}(k)) + \frac{T_s}{\left[ \frac{L_s}{R_s} + \frac{T_s}{2} \right]} \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} [i_{qf}^*(n) - i_{qf}(n)] \right], \quad (9)$$

где  $N$  – число инверторов в фазе;  $E$  – напряжение на конденсаторах;  $R_s$  и  $L_s$  – активное сопротивление и индуктивность фазного реактора;  $C$  – емкость конденсатора;  $Y_j$  – коэффициент заполнения ШИМ;  $u_{ds}$  – напряжение питающей сети;  $T_s$  – период дискретизации;  $i_f$  – ток ККМ;  $i_f^*$  – опорный ток.

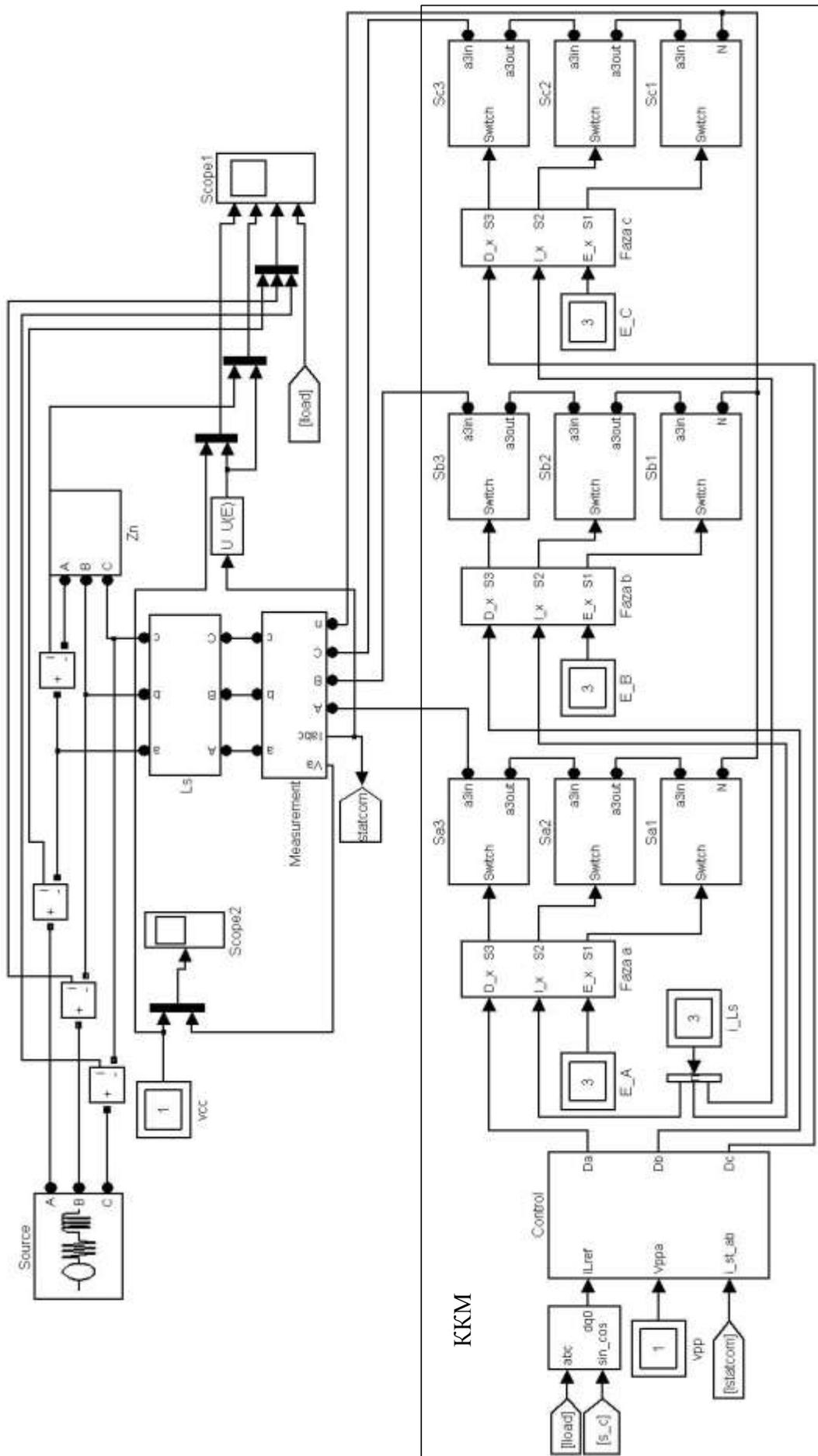


Рис. 3. Имитационная модель четырехуровневого корректора коэффициента мощности

Имитационная модель «сеть – ККМ – нагрузка», представленная на рис. 3, была реализована в пакете MATLAB Simulink. В качестве нагрузки был взят управляемый мостовой выпрямитель (блок  $Z_n$  на рис. 3). Источник переменного трехфазного напряжения учитывает индуктивное и активное сопротивление генератора (блок  $Source$ ).

Силовая часть модели ККМ состоит из девяти однофазных полномостовых инверторов по три в каждой фазе ( $S_{a1}–S_{a3}$ ,  $S_{b1}–S_{b3}$ ,  $S_{c1}–S_{c3}$ ). На основе математической модели, была разработана структурная схема системы управления ККМ – блок расчета ( $Control$ ) и блок ШИМ ( $Faza$ ), представленные на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Блок расчета  $Control$  включает в себя преобразование Парка (прямое и обратное) и синхронизацию с сетью посредством ФАПЧ. Благодаря преобразованию Парка все необходимые сигналы реального времени перенесены в  $dq$ -координатное пространство. ФАПЧ необходим для синхронизации  $dq$ -координат с сетью. Выходными данными блока являются синусная и косинусная функции, однозначно определяющие угол положения вектора трехфазного напряжения, являющегося базисным для системы управления.

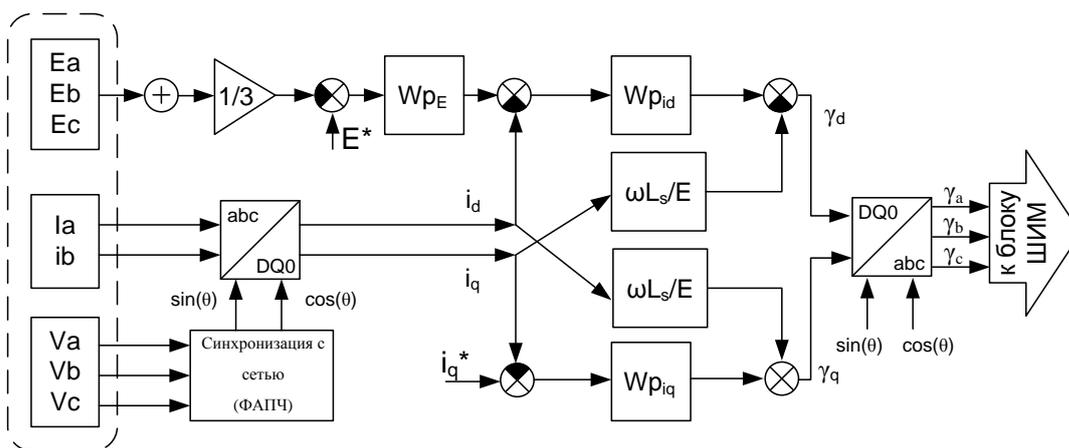


Рис. 4. Структурная схема системы управления

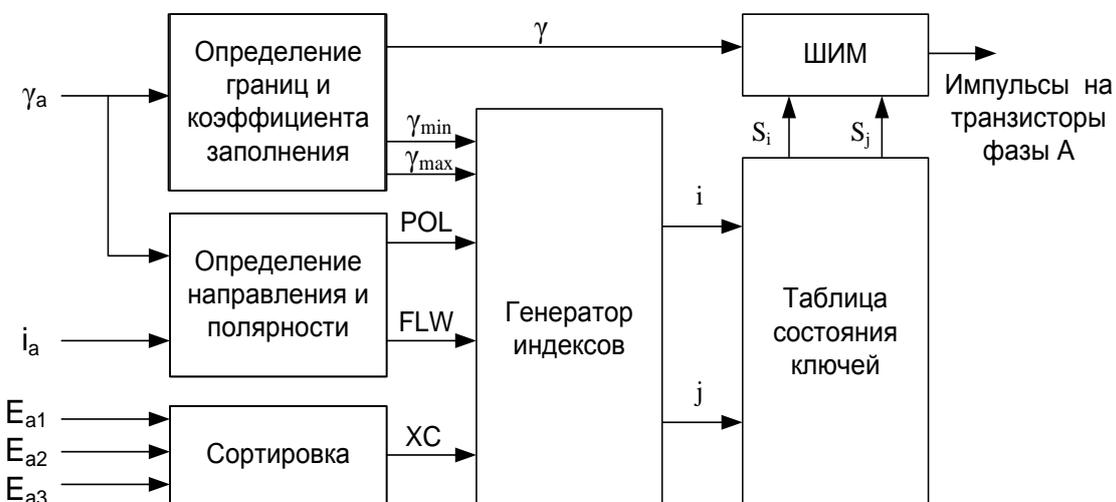
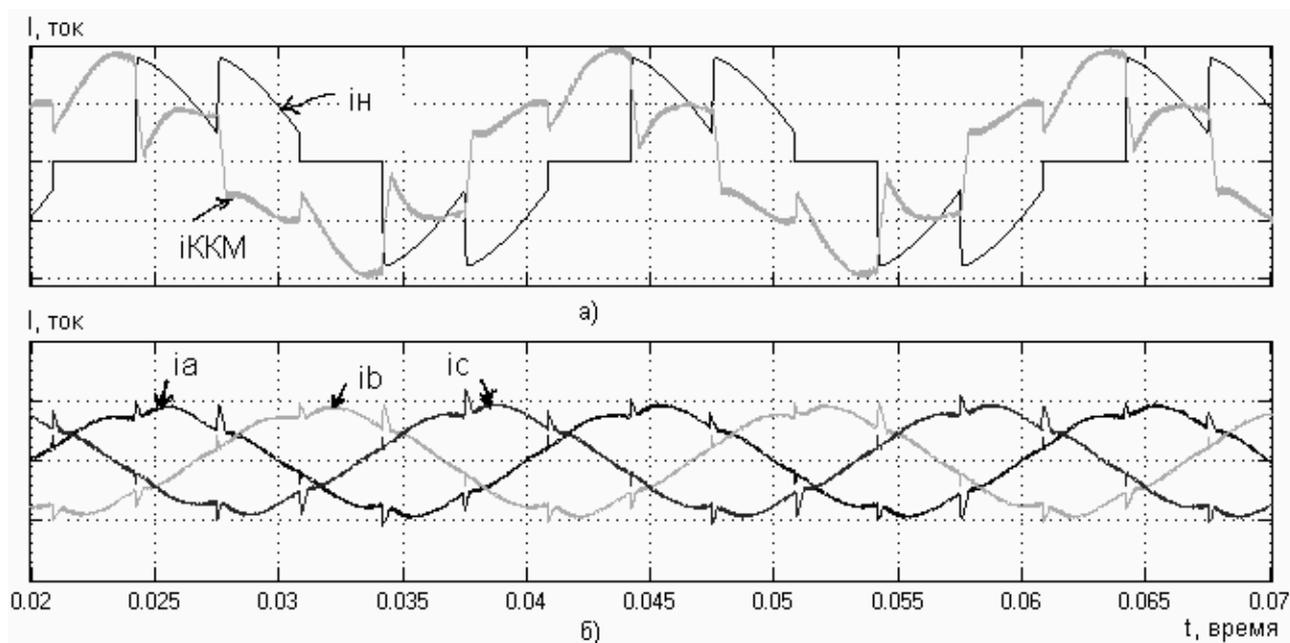


Рис. 5. Функциональная схема блока ШИМ

Блок ШИМ определяет включенные полупроводниковые элементы. Алгоритм работы блоков «*Определение границ и коэффициента заполнения*», «*Определение направления и полярности*» и «*Сортировка*» реализованы на языке программирования C. «*Генератор индек-*

сов» по текущим параметрам формирует выборку из «Таблицы состояний включенных ключей».

Временные зависимости тока, потребляемого нагрузкой, тока ККМ, а также тока питающей сети, полученные в результате имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink, представлены на рис. 6. В качестве объекта исследования была взята электротехнологическая установка с управляемым трехфазным мостовым выпрямителем.



**Рис. 6. Результаты имитационного моделирования:**  
 а – ток нагрузки и ток ККМ фазы А; б – фазные токи сети

Исследования, проведённые на имитационной модели, показали практически нулевой фазовый сдвиг между током и напряжением питающей сети, значительное повышение коэффициента мощности  $\chi$  и снижение коэффициента искажений  $K_H$  (с 40% до 7% при  $\alpha = 45^\circ$ ) в спектре тока питающей сети в полном диапазоне изменения угла управления выпрямителем, а также устойчивую работу ККМ в установившихся и динамических режимах. Для улучшения качества тока сети, целесообразно уменьшать инерционность реактивных элементов и предустановок в системе управления ККМ. Использование ККМ на мощности менее 10% от номинала нежелательно из-за увеличения высших гармоник в выходном токе компенсации, и как результат сетевых токов.

### Выводы

1. Показана необходимость использования компенсирующих и корректирующих устройств для мощных потребителей, обладающих нелинейной и резкопеременной нагрузкой. От качества электроэнергии напрямую зависят как экономические, так и техникоэксплуатационные показатели.

2. Разработано математическое описание ККМ на базе многоуровневого каскадного инвертора напряжения в синхронных  $dq$ -координатах, ориентированных по вектору напряжения питающей сети. Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно из-за экономичного использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формы выходного напряжения инвертора, идентичного их построения, а также простоты конструкции и математического описания.

3. По разработанной математической модели сформирована имитационная модель в

среде Matlab\Simulink, защищенная свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [6]. Предложена система управления для ККМ на базе многоуровневого каскадного инвертора.

4. Достоверность результатов моделирования подтверждается результатами экспериментального исследования физического макета ( $\approx 4$  кВА) основных узлов устройства, предназначенного для непосредственного подключения к трехфазной сети 380 В, 50 Гц. Система управления выполнена с использованием сигнальных цифровых процессоров.

#### Библиографический список

1. **Горюнов, И.Т.** Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалева, В.А. Богданов // Электрические станции. 2001. № 1.
2. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Донской, Н.** Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. №1.
4. **Алтунин, Б.Ю.** Корректор коэффициента мощности в высоковольтной распределительной электросети на базе многоуровневого каскадного преобразователя с ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, М.Н. Слепченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2008. №11(111).
5. **Кириенко, В.П.** Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажений в системах питания с управляемыми выпрямителями / В.П. Кириенко, М.Н. Слепченко. – М.: Электричество, 2006. № 11.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Имитационная модель корректора коэффициента мощности на базе многоуровневого инвертора/ Карнавский И.А. № гос. регистрации 2009613526 от 30.02.2002 г.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**B.U. Altunin, I.A. Karnavskiy**

#### **MATHEMATICAL MODEL OF THE COMPENSATOR OF INACTIVE POWER ON BASE OF MULTILEVEL INVERTER WITH ZONAL PWM AT THE HIGH FREQUENCY**

This paper presents the principle of an increase in the capacity rate of the electrotechnological installation of large power is examined. Device carries out the compensation for reactive power and power of distortions in the power-supply system of rectifying load with the sharply varying nature. Corrector is built on the base of multilevel cascade converter with the zonal PWM. Is represented mathematical model in the synchronous dq-coordinates and results of imitation model in the program Matlab/Simulink.

*Key words:* corrector of power coefficient, STATCOM, multilevel cascade inverter, reactive power, distortion power, active filter.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

---

УДК 620.17: 669.131

Д.А. Болдырев

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Исследовательский Центр ОАО «АВТОВАЗ», г. Тольятти, РФ

На основе систематизации и обобщения сведений о модифицировании чугунов в условиях немодернизированного производства созданы технологии, позволяющие снизить себестоимость изготовления как уже освоенной, так и новой продукции при обеспечении требуемого уровня качества, а также обеспечить повышение специальных свойств продукции при возросших требованиях к работоспособности и ресурсу.

*Ключевые слова:* чугун; графитизирующее, сфероидизирующее модифицирование; микроструктура; лигатура.

#### Введение

В настоящее время заготовительные производства машиностроения и, в частности, автомобилестроения находятся в состоянии обновления. Заготовительные производства являются наиболее значимым и крупным элементом машиностроительного комплекса, закладывающим изначальный уровень качества продукции. Оценивая степень их оснащенности, следует отметить, что уровень и ресурс оборудования старого поколения как отечественного, так и зарубежного производства, уже не обеспечивает возросших требований к производительности и качеству продукции. Оборудованием нового поколения для заготовительных производств и, в частности, для литейного производства (печи, формовочные линии и т. д.), могут быть укомплектованы цеха только при выделении необходимого объема финансовых средств. У большинства производств на начальном этапе отсутствуют необходимые средства на модернизацию и реконструкцию материально-технической базы. В чугунолитейном производстве, изготавливающим наибольшее количество литых заготовок по сравнению с литейными производствами цветных сплавов, эта проблема стоит особенно остро. Таким образом, главной проблемой, которую необходимо решить, является разработка переходных и совершенствование существующих технологий получения чугунных отливок с использованием новых основных и вспомогательных материалов, позволяющих в зависимости от предъявляемых требований соответствовать либо заданному, либо возросшему уровню качества. Решению данной проблемы должны предшествовать обобщение и систематизация сведений о процессах модифицирования чугунов, как одних из наиболее важных в технологии получения литья. Реализация всех перечисленных мероприятий позволит производствам заработать средства, необходимые для запуска начальной стадии процесса модернизации.

Таким образом, **цель проводимой работы** – обобщение и развитие технологических основ модифицирования различных типов и марок конструкционных чугунов в отливках автомобилестроения.

### Объекты исследования

Все виды конструкционных чугунов с различным типом графита, фазовым составом и структурой металла матрицы: высокопрочный чугун с шаровидным графитом, чугун с вермикулярным графитом и серый чугун с пластинчатым графитом.

В работе исследовались как отечественные (ЧВГ40, ВЧ50), так и зарубежные (Gh190B, Gh56-40-05, Gh65-48-05, Gh75-50-03) марки чугунов, применяемые в металлургическом производстве ОАО «АВТОВАЗ» для получения отливок деталей легкового автомобиля.

В частности, проводились исследования отливок деталей из следующих марок серого и высокопрочного чугунов фирмы Fiat (Италия):

- Gh190B – серый чугун с пластинчатым графитом на перлитной основе; требования по механическим свойствам:  $HB_{5/750} \geq 200$ ,  $\sigma_B \geq 265$  МПа;
- Gh56-40-05 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитно-ферритной основе (перлита  $\geq 50\%$ ), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам:  $HB_{5/750}$  180-250,  $\sigma_B \geq 549$  МПа,  $\delta \geq 5\%$ ;
- Gh65-48-05 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитно-ферритной основе (перлита  $\geq 50\%$ ), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам:  $HB_{5/750}$  190-280,  $\sigma_B \geq 638$  МПа,  $\delta \geq 5\%$ ;
- Gh75-50-03 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом на перлитной основе (феррита  $\leq 8\%$ ), степень сфероидизации графита – не менее 90%; требования по механическим свойствам:  $HB_{5/750}$  250-300,  $\sigma_B \geq 736$  МПа,  $\delta \geq 3\%$ .

### Оборудование и методы проведения испытаний и исследований

Опытные плавки проводились на следующем оборудовании металлургического производства ОАО «АВТОВАЗ»: «дуплекс»-процесс – электродуговая плавильная печь LBS-48 или 6ДСП-40 + индукционная тигельная печь LFD-20 или индукционная канальная печь LFR-45; индукционная тигельная печь-ковш ИСТ-0,4; формовочно-заливочные линии SPO, Georg Fisher, DISA. В работе использовалось следующее лабораторное испытательное оборудование: разрывные машины AMSLER 20ZBDA и TiraTest 2300 (определение временного сопротивления на разрыв  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$ ); твердомер ТБ 5006 (определение твёрдости по Бринеллю); спектроанализатор Quantovak ARL 2460; газоанализатор Leko CS-400; ICP-спектрометр Liberty Series фирмы Varian; спектрограф Spectroma GDA-750 (определение химического состава); металлографический световой микроскоп UNIMET 8585, фирмы Бюллер; металлографический световой микроскоп фирмы Zeiss; электронный сканирующий микроскоп LEO 1455 VP с блоком рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 (анализ микроструктуры и графитных включений).

### Результаты исследований и их обсуждение

Ввиду стремительного роста цены на никель для экономного сфероидизирующего ковшевого модифицирования и микролегирования чугуна целесообразен переход с никелевой лигатуры на медную, а также использование различных комбинированных лигатур. Была поставлена задача изучить эффективность применения для модифицирования ВЧШГ «тяжёлой» лигатуры на чисто медной основе, а затем – на никелевой и медной основах, разбавленных более дешёвыми элементами (Fe, Si) с учётом их влияния на требуемый диапазон содержания магния (14...17%).

Ковшевой расход «тяжёлой» лигатуры Cu-Mg-PЗМ, имеющей следующий химический состав: Mg 14...17%; PЗМ 0,4...0,6%; Cu – остальное, составляет 0,83%. По сравнению с

расходом лигатуры Ni-Mg-PЗМ – 0,45%, имеющей аналогичное содержание магния и PЗМ, расход лигатуры Cu-Mg-PЗМ выше в 1,85 раза. Однако, принимая во внимание в 3-4 раза меньшую стоимость меди по сравнению с никелем, технология обработки расплава чугуна лигатурой Cu-Mg-PЗМ в 1,5-2 раза дешевле, чем лигатурой Ni-Mg-PЗМ. Кроме того, назначаемая температура нормализации отливок деталей, полученных с помощью лигатуры Cu-Mg-PЗМ в среднем на 40°C ниже (870°C), чем для получаемых с лигатурой Ni-Mg-Ce (910°C). Нормализация при температуре 870°C по сравнению с литым состоянием позволяет получить требуемую прочность чугуна (844-903 МПа), сформировать более однородную перлитную структуру, устранять скопления свободного феррита вокруг графита («бычий» или «мягкий» глаз), снижать общее содержание свободного феррита с 5-12% до 4-5% без снижения относительного удлинения (>3,6%) при обеспечении необходимой твёрдости чугуна (НВ 269-298). Таким образом, переход на лигатуру Cu-Mg-PЗМ обеспечивает не только снижение себестоимости, но и стабилизацию качества отливок.

При ведении плавки на обогащённом медью возврате в расплаве снижается содержание никеля и марганца. Совместный прирост меди как из возврата, так и из лигатуры, до концентрации 1% позволяет полностью скомпенсировать снижение, а затем и полное отсутствие содержания никеля при поддержании содержания марганца в расплаве 0,25...0,35%.

По результатам испытаний лигатуры Cu-Ni-Mg-PЗМ сделан вывод о том, что она может быть использована в качестве переходного варианта для плавной, постепенной отработки технологического процесса сфероидизирующего модифицирования при замене лигатуры Ni-Mg-Ce на Cu-Mg-Ce. Ввиду того, что изначально влияние перехода на «тяжёлую» лигатуру с иной металлической основой неизвестно и может вызвать отклонения по структуре и свойствам, была предложена технология пошаговой замены лигатуры Ni-Mg-PЗМ на Cu-Mg-PЗМ при параллельной корректировке химического состава чугуна в печи.

Исследовано влияние более дешёвой добавки железа на эффективность работы «тяжёлых» лигатур на лигатурах с никелевой (Fe-Ni-Mg-PЗМ) и медь-никелевой (Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ) основами. Результаты испытаний показали худшее усвоения магния расплавом чугуна из «тяжёлой» лигатуры Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ по сравнению с лигатурой Fe-Ni-Mg-PЗМ. Более низкое усвоения магния, оцениваемое по степени сфероидизации графита в микроструктуре чугуна (ССГ), из лигатуры Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ (ССГ 40-70%), по сравнению с Fe-Ni-Mg-PЗМ (ССГ 50-70%), обусловлено её большей легкоплавкостью. При этом увеличение навески на 20% не обеспечило улучшения ССГ. Полученные результаты показывают нестабильность усвоения магния из опытных железосодержащих «тяжёлых» лигатур, которая объясняется следующим. Магний нерастворим в железе, однако при одновременном сплавлении железа с медью (никелем), он образует с ними насыщенные твёрдые растворы. Такие сплавы с повышенной концентрацией магния характеризуются низкой температурой плавления, что отрицательно влияет на усвоение из них магния расплавом чугуна, повышая его угар. Также следует отметить высокую склонность магния к ликвации: из-за его низкой плотности основное его содержание сосредотачивается в верхних слоях слитка, а нижние слои оказываются обеднёнными по магнию. В исследованных «тяжёлых» лигатурах железо использовалось для повышения общей температуры плавления сплава за счёт образования твёрдых растворов железа с медью и железа с никелем, имеющих более высокие температуры плавления, чем у чистой меди и никеля. Однако по результатам исследований ожидаемый ощутимый положительный эффект «условной тугоплавкости» выявлен не был.

Принимая во внимание результаты апробации «тяжёлых» лигатур Fe-Ni-Mg-PЗМ и Fe-Ni-Cu-Mg-PЗМ, был учтён вклад содержания железа в растворимость магния и при освоении производства «тяжёлой» лигатуры «железо-кремний-медь-магний-PЗМ» был предложен следующий оптимальный химический состав: Fe 8...11%, Si 11...14%, Mg 14...17%, PЗМ 0,9...1,2%, Cu – остальное. Данная лигатура наиболее экономична из всех «тяжёлых» магнийсодержащих лигатур. В указанных пределах железо практически не влияет на раство-

римность магния в расплаве и служит в качестве относительно тугоплавкой добавки, повышающей общую температуру плавления лигатуры. Кремний при данном содержании в лигатуре несколько улучшает усвоение магния в расплаве и нивелирует влияние железа, а также служит охрупчивающей добавкой, улучшающей дробление лигатуры. По результатам исследований структуры и свойств чугуна в отливках (перлитная структура без сплошной толстой ферритной оторочки вокруг графитных включений («бычий» или «мягкий» глаз),  $\sigma_B = 873$  МПа,  $\delta = 6\%$ ) сделан вывод об идентичной работоспособности лигатур Fe-Si-Cu-Mg-PЗМ и Cu-Mg-PЗМ.

Таким образом, общий подход к разработке химического состава «тяжёлых» магнийсодержащих лигатур заключается в определении наиболее дешёвой металлической основы, хорошо растворяющей магний, и других добавок, дополнительно снижающих её стоимость и улучшающих технологические свойства (в частности, дробимость) при сбалансированном подборе их совместного содержания относительно заданного диапазона содержания магния.

При разработке и опробовании технологий ковшевого модифицирования высокопрочного чугуна на основе «сэндвич»-процесса с использованием «лёгких» лигатур типа ФСМг принималось во внимание, что новый технологический процесс должен органично вписываться в существующую схему производства чугуна с задействованием имеющегося базового оборудования и оснастки.

Учитывая, что «сэндвич»-процесс рекомендуется для модифицирующей обработки ВЧШГ в открытых ковшах, имеющих характеристическое соотношение (отношение высоты ковша к его среднему диаметру) – 2...2,5:1, на первом этапе опытных работ ставилась задача видоизменения основной схемы «сэндвич»-процесса с учётом конструкции базовых ковшей металлоёмкостью 1,2 т, имеющих характеристическое соотношение 1,4:1. Для опытных работ были выбраны «лёгкие» лигатуры марок ФСМг6 и ФСМг6Ла.

В первом варианте конструкции заливочного ковша, карман для модификатора в отличие от классического варианта был изготовлен в форме асимметричного усечённого конуса в центре пода футеровки ковша и расположен таким образом, чтобы наклон самой длинной образующей был направлен в сторону носка ковша.

Во втором варианте конструкции заливочного ковша в качестве кармана для модификатора была использована керамическая вставка в виде полого усечённого конуса из огнеупорного материала – муллитовой массы.

В третьем варианте конструкции заливочного ковша для создания реакционного кармана были использованы огнеупорные кирпичи различной конструкции и типоразмеров.

На практике при опробовании всех 3-х разработанных технологических схем была многократно подтверждена принципиальная невозможность стабильного модифицирования высокопрочного чугуна по «сэндвич-процессу» в открытых серийных заливочных ковшах с самой различной конструкцией и расположением реакционного кармана для размещения модификатора. Анализ всех трёх способов ковшевого модифицирования ВЧШГ, созданных на базе «сэндвич»-процесса, показывает, что несмотря на получаемые в отливках требуемые структуру и свойства, из-за увеличения времени технологического цикла, связанного с обслуживанием ковшей с изменённой конструкцией футеровки, они успешно могут быть применены в мелкосерийном производстве. В ходе отработки всех трёх вариантов ковшевого модифицирования на основе ресурсосберегающего подхода были подобраны концентрационные диапазоны содержания легирующих элементов, необходимых для микролегирования расплава с целью обеспечения требуемых нормативно-технических показателей.

При существующем характеристическом соотношении в ковше – 1,4:1 устойчивость технологического процесса модифицирования ВЧШГ может быть обеспечена только путём его усовершенствования, дооснащения и в итоге – трансформации в процесс «ковш с крышкой». Использование данной технологии может быть оправданным при получении отливок из средних марок высокопрочного чугуна, например, Gh56-40-05, Gh65-48-05 (перлитно-

ферритная металлическая матрица, ССГ – 90%, НВ 180-249). По технологии «ковш с крышкой» модификатор типа ФСМг размещается на днище ковша в его носковой части, а крышка надевается таким образом, чтобы верхнее отверстие заливочной воронки для заливки расплава чугуна располагалось диаметрально противоположно носку ковша.

По результатам опытных работ доказано, что при изготовлении отливок из более низких марок высокопрочного чугуна – до ВЧ50 включительно – могут быть использованы более упрощённые по отношению к «сэндвич-процессу» технологии для открытого ковша – «заливка сверху» и «контейнерная» технология. Полученные структура и свойства в опытных отливках: для ЧВГ40 – перлитно-ферритная металлическая матрица, преобладание вермикулярного графита над шаровидным, НВ 187-239, для ВЧ50 – перлитно-ферритная металлическая матрица, ССГ  $\geq$  80%, НВ 170-229.

Определение необходимого баланса содержания функционально значимых элементов (Mg, Ca и PЗМ) в составе специальных модификаторов для получения ЧВГ имеет особое значение с точки зрения стабильности графитообразования. Анализ результатов сравнительных испытаний двух модификаторов ФСМг4,5PЗМ4,5 и ФСМг5,5PЗМ6 на чугуне марки ЧВГ40 показал, что химический состав модификатора ФСМг5,5PЗМ6 несбалансирован по сравнению с составом модификатора ФСМг4,5PЗМ4,5. Это выражается нестабильностью образования и неоднородностью распределения вермикулярного графита по длине отливки, и связано с повышенным содержанием в составе модификатора магния, PЗМ и кальция.

Учитывая, что ЧВГ называется чугун, в микроструктуре которого находится не более 40% шаровидного графита, оптимальный расход модификатора ФСМг5,5PЗМ6 составляет 3,6 кг на 1200 кг чугуна (0,3%). При меньшем расходе данного модификатора в микроструктуре чугуна начинает появляться пластинчатый графит. Пропорциональное изменение содержания магния и PЗМ в модификаторе неэквивалентно пропорциональному изменению его расхода. Это подтверждает тот факт, что 5 кг модификатора ФСМг4,5PЗМ4,5 обеспечивают лучшее структурообразование и формирование свойств ЧВГ (перлит, феррита не более 20%, вермикулярный графит, шаровидного графита не более 15%, НВ 229-239), чем 3,7-4,5 кг модификатора ФСМг5,5PЗМ6 (перлит, феррит 5-30%, вермикулярный и шаровидный графит при содержании последнего от 3 до 60%, НВ 217-275). То есть в составе специализированного модификатора для получения ЧВГ должно содержаться около 4,5% магния и PЗМ и строго ограниченное содержание кальция (бария) и алюминия.

Таким образом, основываясь на результатах производственных экспериментов, предложены технологические схемы получения отливок из основных марок ВЧШГ и ЧВГ ковшевым модифицированием без изменения существующего состава шихты, оборудования и оснастки в зависимости от требуемой марки: Gh56-40-05, Gh65-48-05 – технологии «ковш с крышкой», «сэндвич»-процесс; ЧВГ40, ВЧ50 – технология «заливка сверху», «контейнерная» технология; Gh75-50-03 – технология модифицирования «тяжёлой» лигатурой на медной основе. Установлено, что результат влияния различных технологических параметров заключается в получении из расплава чугуна одного и того же химического состава нескольких марок чугунов за счёт применения различных модифицирующих материалов и технологий модифицирования.

Показано, что использование классического ферросиликомагния (на примере модификатора ФСМг7) в качестве сфероидизирующей добавки при модифицировании в форме имеет ряд недостатков, в числе которых – повышение склонности к образованию усадочной пористости и наличие в микроструктуре чугуна шлаковых включений ввиду невозможности их вывода за пределы литниковой системы.

Известно, что добавки PЗМ в качестве дополнения к магнию способствуют росту графита более правильной формы и повышают стабильность модифицирующего эффекта. Однако особенности влияния PЗМ в составе магниевого модификатора описаны по результатам

исследования мишметалла – смеси, содержащей около 50% Ce, 25% La, 15% Nd и 10% Pr. Влияние конкретных РЗМ в составе магнийсодержащих модификаторов на структурообразование ВЧШГ до сих пор остаётся недостаточно изученным.

Лантан по сравнению с другими РЗМ обладает более слабым карбидообразующим и сфероидизирующим действием в чугунах. Выдвинуто предположение, что лантан в качестве дополнительной добавки к магнию, снижающей его активность, способен пролонгировать реакцию модификатора с расплавом и процесс графитообразования, что может снизить склонность чугуна к усадке.

Результаты испытаний показали, что процент брака отливок по усадке при использовании модификатора ФСМг5,5Ла (0,19%) более чем в три раза ниже, чем с модификатором ФСМг7 (0,62%). Визуальная оценка состояния поверхности отливок показывает её более высокую чистоту, отсутствие шлаковых дорожек. По сравнению с модификатором, содержащим мишметалл, ФСМг5,5Ла обеспечил количество глобул шаровидного графита больше в 1,75 раза.

При использовании модификатора ФСМг5,5Ла получено образование большого количества мелких глобул вторичного графита и конгломератов крупных глобул первичного графита с ярко выраженным бимодальным асимметричным статистическим распределением диаметров графитных включений. Влияние лантана на графитообразование в ВЧШГ проявляется в уменьшении скорости роста графита, что повышает вероятность коагуляции графитных глобул в жидком расплаве. Снижением скорости роста графита также объясняется задержка выделения графита из аустенита и формирование мелких глобул вторичного графита. Более позднее по времени выделение вторичного графита компенсирует усадочные процессы в отливке в момент прекращения функционирования прибылей, что обеспечивает снижение пористости и повышение механических свойств чугуна (для ВЧШГ марки Gh56-40-05:  $\sigma_b = 589-657$  МПа,  $\delta = 5-6\%$ , HB 198-249).

При получении ЧВГ внутриформенным способом модифицирования в отличие от ковшевого перемешивания расплава существенно хуже и в результате полноценного равномерного перераспределения компонентов чугуна не происходит, развивается расслоение шаровидного и вермикулярного графита. Дополнительным фактором, ухудшающим структурообразование, является использование в качестве материала для внутриформенной обработки ЧВГ модификатора с относительно высоким содержанием магния (свыше 6,5%) и низким содержанием РЗМ (менее 0,8...1,0%) в количестве, недостаточном для получения необходимой степени сфероидизации графита.

Всё указанные недостатки наиболее ярко выражены при получении длинномерных отливок (при соотношении среднего диаметра к длине  $\geq 1:15$ ). Структура, получаемая в отливках из ЧВГ по технологии внутриформенного модифицирования, отличается от регламентируемой для ЧВГ отклонениями не только по количеству шаровидного графита (ШГ более 40%), но и по его распределению как по сечению, так и по длине отливки. При использовании классического ферросиликомагния (модификатора ФСМг7, среднее содержание магния – 7%, РЗМ – 0,5%) для формирования вермикулярной формы графита за счёт эффекта немодифицирования в микроструктуре отливки наблюдаются следующие отклонения.

Во-первых, имеет место морфологическое расслоение графита по высоте сечения отливки: в верхней половине отмечается наличие преимущественно шаровидного графита, а в нижней – преимущественно вермикулярного. Механизм расслоения графита по высоте сечения заключается в том, что расплав при затекании в полость формы в процессе реакции с модификатором в реакционной камере плохо перемешивается и магний, имеющий малый удельный вес ( $1,7$  г/см<sup>3</sup>) всплывает в верхнюю часть отливки, вызывая, тем самым, образование в ней преимущественно шаровидной формы графита. Такая особенность распределения графита по сечению отливки провоцирует при сверлении внутреннего отверстия увод пу-

шечного сверла в её нижнюю, более мягкую часть. При этом разброс по твёрдости между верхней и нижней половинками сечения отливки составляет в среднем 20...25 НВ.

Во-вторых, имеет место неоднородность структуры по длине отливки, что вызывает значительный разброс по твёрдости (от 12 до 56 НВ) между 1-м (структура с преобладанием вермикулярного графита ВГф2, ВГф3 над шаровидным) и 8-м (структура с шаровидным графитом – ШГд25, ШГд18) кулачком.

В-третьих, из-за относительно высокого содержания в модификаторе шлакообразующего элемента – кальция и несколько завышенного содержания магния микроструктура чугуна загрязняется шлаковыми включениями. Один из таких характерных дефектов был детально исследован с помощью электронного микрорентгеноспектрального анализа. Из анализа спектра следует, что шлаковые включения представляют собой конгломераты комплексных оксидов магния и кальция.

Известно, что РЗМ являются наилучшими стабилизаторами вермикулярной (при повышенном содержании РЗМ и пониженном содержании магния) и шаровидной (при пониженном содержании РЗМ и повышенном содержании магния) форм графита в чугуне. Однако также следует учитывать, что содержание РЗМ в модификаторе ограничивается их высокой стоимостью и антиграфитизирующими свойствами.

Таким образом, главной задачей по совершенствованию состава модификатора для внутриформенной обработки чугуна с целью получения преимущественно вермикулярной формы графита является, как и при ковшевом модифицировании, сбалансированный подбор концентраций магния и РЗМ. При подборе рецептуры был взят за основу классический модификатор ФСМг7, в химическом составе которого постепенно повышали содержание РЗМ и снижали содержание магния. При этом содержание графитизирующих элементов (Ba, Ca, Al), входящих в состав модификатора для внутриформенного модифицирования, необходимо строго минимизировать из-за их склонности к шлакообразованию и скоплению образовавшихся включений преимущественно на границах зёрен, учитывая отсутствие возможности проведения операции шлакоудаления.

Для опытной работы по повышению качества чугуна в отливках из ЧВГ был приготовлен специальный модификатор ФСМг6РЗМ1,5 с содержанием магния 5,8...6,3%, РЗМ 1,2...1,5% и кальция – до 0,4%. Перлитно-ферритная структура ЧВГ во всех опытных отливках характеризуется наличием 90% вермикулярного графита при однородном его распределении как по сечению, так и по длине отливки и обеспечивает следующие механические свойства:  $\sigma_b = 476-500$  МПа,  $\delta = 1,2-1,6\%$ , НВ 229-255.

Для изучения технологических особенностей получения ЧВГ в отливках при внутриформенном модифицировании сплавами системы Fe-Si-РЗМ с различным содержанием РЗМ были проведены опытные заливки отливок с модификаторами ФС40РЗМ10 и ФС50РЗМ20. Анализ микроструктуры опытных отливок, залитых с ФС40РЗМ10, показал постоянно присутствующие типы графита – ПГр1 и ПГр9, а в 8-м кулачке, куда поступают первые порции расплава чугуна с повышенной концентрацией модификатора, также присутствует и тип ПГр7. Микроструктура отливок полностью представлена пластинчатым перлитом. Следовательно, при концентрации РЗМ в расплаве 0,04%, даже принимая во внимание концентрационный перепад по длине отливки, вермикулярная форма графита ещё не образуется.

Однако присутствие в микроструктуре 8-го кулачка крупнорозеточной формы графита показывает наличие первой стадии процесса формирования вермикулярного графита. Относительно низкая твёрдость отливки (до 163 НВ), учитывая её полностью перлитную структуру, позволяет сделать вывод о графитизирующем и смягчающем действии малых добавок РЗМ (до 0,04%) в чугуне. Анализ микроструктуры опытных отливок, залитых с ФС50РЗМ20, показал, что графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной формой, а в объёме 8-го кулачка, обогащённого РЗМ, также присутствуют соседствующие области

мелкодисперсного междендритного графита и полностью безграфитные области с включениями свободного цементита.

Микроструктура отливок состоит из пластинчатого перлита с равномерно распределёнными включениями вторичного цементита (Ц10-15). Концентрация РЗМ в расплаве 0,075% позволила получить полностью вермикулярную разветвлённую форму графита. Концентрационный перепад РЗМ по длине отливки вызвал более высокое содержание свободного цементита в 8-м кулачке. Для получения однородной по графиту и с минимальным перепадом механических свойств бесцементитной структуры отливки по всей длине была предложена технология внутриформенного модифицирования ФС50РЗМ20 с предмодифицированием кусковым ФС75. Графит в отливке практически полностью представлен вермикулярной формой и в 1-м и в 8-м кулачке. Предварительное графитизирующее модифицирование позволило нивелировать в ЧВГ градиент концентрации РЗМ по длине отливки, в результате чего была получена достаточно однородная бесцементитная структура с небольшим количеством феррита (П85-90), обладающая следующими свойствами:  $\sigma_b = 432$  МПа,  $\delta = 1,2\%$ , НВ 239-244.

Для повышения прочностных свойств ЧВГ может быть использован такой наименее энергоёмкий и технологичный вид термической обработки как нормализация. Для исследования была выбрана та же деталь «Вал распределительный». Операция нормализации проводилась в проходной газовой печи по ступенчатому режиму: нагрев отливок вместе в печи до температуры 750°C, выдержка 40 мин, нагрев до температуры 910°C, выдержка 1 ч 40 мин, охлаждение на воздухе в течение 2-х часов. Микроструктура ЧВГ до нормализации: ВГф2, ВГф3, ВГ90, ПГф1; Пт1, П85. В структуре ЧВГ после нормализации содержание феррита осталось неизменным, а основная структура металлической матрицы представлена сорбитообразным перлитом. То есть после нормализации произошло повышение дисперсности и уплотнение перлитной составляющей при неизменном  $\delta = 1,2\%$ , твёрдость нормализованного чугуна возросла с 229 НВ до 260 НВ, а  $\sigma_b$  – до 500 МПа.

По результатам расширенных производственных испытаний барийсодержащего графитизирующего модификатора ФС65Ба4 сделан вывод о его высокой эффективности: снижение расхода модификатора ФС65Ба4 по сравнению с ФС75лб составляет от 14,3 до 50% в зависимости от габаритов и толщины стенки конкретной отливки. Механические свойства и микроструктура чугуна в отливках находятся в соответствии с установленным нормативом для каждой марки чугуна.

При сравнении твёрдости и анализе особенностей микроструктуры чугуна в отливках при первичном (ковшевом) и вторичном (в чаше формы) модифицировании становится очевидным, что эффективность позднего модифицирования намного выше раннего.

При вторичном модифицировании расплава чугуна в чаше формы кусковым модификатором ФС55Ба22, оценивая морфологию графита, следует отметить значительное преобладание правильной шаровидной формы графита ШГф5, а при первичном модифицировании расплава чугуна модификатором ФС55Ба22 в крупке шаровидный графит представлен, преимущественно, типом ШГф4 – неправильной формой.

Обе формы шаровидного графита допустимы в микроструктуре ВЧШГ, однако тип ШГф5 характеризует более высокое качество и эффективность графитизирующей обработки высокобаристым ферросилицием, проводимой в момент заполнения формы, что связано с большим количеством остающихся в расплаве ЦЗ. Становится также очевидным, что при использовании высокобаристого ферросилиция для первичного модифицирования в микроструктуре отливок более мелких графитных включений ШГд45 в среднем больше, чем при вторичном модифицировании кусковой фракцией в чаше формы, а количество более крупных включений ШГд90 в обоих случаях одинаково. Установлено, что первичное модифицирование ВЧШГ позволяет обеспечить снижение твёрдости чугуна в отливках (НВ 182-255) и более высокое содержание феррита (П30-80), а вторичное модифицирование – рост твёрдости (НВ 202-272) и более сильную перлитизацию матрицы (П45-80).

Основу комплексных смесевых модификаторов (МК) нового поколения в отличие от традиционных смесевых модификаторов, получаемых из отсеков выплавляемых модификаторов, составляют порошки активированного высокотемпературной обработкой углерода (графита) и полученного физико-химическим путём кристаллического кремния при синтезе органогалогенсиланов. Главная особенность МК заключается в их высокодисперсном фракционном составе (10-30 мкм), что должно обуславливать резкое повышение модифицирующей способности и «живучести» смеси.

Литая микроструктура отливок «Вал коленчатый» из чугуна Gh75-50-03, полученных с применением смесового модификатора МККа21, с соотношением массовых частей углеродсодержащего материала к кремнийсодержащему 2:1 и добавлением 5% Са, имеет до 1% цементита по границам зёрен, следовательно, расход данного модификатора 1 и 2 кг на ковш 1200 кг не обеспечивает необходимый модифицирующий эффект при получении требуемых механических свойств ( $\sigma_b = 785-804$  МПа,  $\delta = 8,0-8,8\%$ , НВ 229-285). Механические свойства чугуна в отливках «Вал коленчатый» после нормализации:  $\sigma_b = 834-873$  МПа,  $\delta = 5,2-8,0\%$ , НВ 255-302. Микроструктура нормализованных отливок имеет от 2 до 5% вторичного цементита по границам зёрен. Данное явление, по-видимому, объясняется недостатком общего содержания кремния в химическом составе чугуна из-за его малого содержания в модификаторе. То есть имеющийся мелкодисперсный графит оказывает определённое влияние только на формирование структуры чугуна из жидкого состояния и не влияет на его структуру после термообработки (нормализации).

На практике установлено практически полное отсутствие графитизирующего эффекта при вводе материала МК21 (C:Si = 2:1) на днище ковша. Графит в отливках полностью представлен типом ШГф4 – шаровидной неправильной формой, что объясняется достаточной для формирования глобулей концентрацией остаточного магния при недостаточном количестве центров зарождения графита, в результате чего нарушается их равномерный объёмный рост.

При засыпке в стояк литейной формы перед заполнением её чугуном 0,1% (65 г) материала МКМг19 (C:Si = 1:9 с добавлением 5% Mg) отбел уменьшился до 10% на глубину 8 мм от поверхности. Одновременное присутствие в структуре чугуна вместе с перлитом феррита и цементита указывает на недомодифицирование чугуна, так как при достаточном количестве модификатора углерод перераспределяется и участвует в формировании перлитной структуры. Механические свойства в отливках из чугуна ВЧ50:  $\sigma_b = 775$  МПа,  $\delta = 9,6\%$ , НВ 239-255. Увеличение расхода материала МКМг19 в форму свыше 0,15% (100 г) позволило полностью устранить свободный цементит, следовательно, количество модификатора оказалось достаточным для полноценной обработки расплава чугуна. Механические свойства в отливках из чугуна ВЧ50:  $\sigma_b = 765$  МПа,  $\delta = 8,8\%$ , НВ 249-255. Видно, что твёрдость отливок осталась на том же уровне, что и у отливок, залитых с 0,1% МКМг19. По результатам определения механических свойств можно заключить, что свойства чугуна в отливке соответствуют марке ВЧ70. Таким образом, для получения высокопрочного чугуна марки ВЧ70 может быть рекомендована следующая схема модифицирования: сфероидизирующая ковшевая обработка с последующим введением в стояк формы 0,15% модификатора МКМг19.

Для достижения рациональной литой структуры чугуна при нарушении технологии модифицирования (в случае недомодифицирования, перемодифицирования), отклонений химсостава чугуна и модификаторов, применена технология встречного модифицирования с использованием модификатора, условно названного – Glitter (от англ. – блестеть) на основе теллурида висмута –  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

Использование модификатора Glitter для подавления ферритообразования в структуре ВЧШГ, перемодифицированного графитизирующим модификатором, явилось достаточно эффективным: при увеличении расхода ФС75лб в 1,7 раза (2,2 кг вместо 1,3 кг) в структуре чугуна преобладает перлитная составляющая П60-70 (НВ 241-246).

При исключении операции ковшевого графитизирующего модифицирования ВЧШГ, введение модификатора Glitter в ковш совместно с поздним графитизирующим модифицированием кусковым ферросилицием вызывает повышенное ферритообразование: доля перлита в структуре сокращается до 15% (НВ 197-207).

Совместное введение в расплав чугуна в ковше модификатора Glitter и ФС75лб без последующего вторичного модифицирования кусковым ФС75лз в заливочной чаше формы позволило получить практически полную перлитизацию металлической матрицы ВЧШГ (П95) при твёрдости НВ 255-272.

Таким образом, модификатор Glitter в зависимости от стадийности ввода с графитизирующим модификатором или без него может быть использован для изменения механических свойств ВЧШГ и получения практически любой структуры металлической основы (от чисто перлитной до ферритной).

В качестве альтернативы вторичному графитизирующему модифицированию ВЧШГ кусковым ферросилицием была разработана технология модифицирования брикетами из отсевов производства графитизирующих модификаторов (ФС75, ФС65Ба1 и др.). Технология изготовления брикетов из ферросилиция с добавками активных элементов для вторичного графитизирующего модифицирования ВЧШГ является ресурсосберегающей, так как при этом используются отходы основного производства, и энергосберегающей – в результате ухода от переплава отходов (отсевов) и связанного с этим дополнительного расхода энергоносителей.

К отработке были предложены 2 схемы вторичного модифицирования – в заливочной чаше и внутри формы. По результатам испытаний установлена кинетика растворения брикета в расплаве чугуна. Процесс протекает в несколько этапов: начало формирования («намораживания») на поверхности брикета корочки чугуна; её рост до полного обволакивания брикета; вскипание связующих веществ на поверхности брикета; разделение брикета на фрагменты и автономное растворение фрагментов брикета.

Анализ полученных результатов показывает, что возникающая в некоторых случаях недостаточная степень сфероидизации графита в чугуне отливки связана с нестабильностью растворения брикета из-за неточного дозирования связующих компонентов. При этом возможны два случая:

- преждевременное растворение брикета за время наполнения формы из-за недостаточного количества связующих материалов и/или высокой температуры заливаемого чугуна;
- неполное растворение брикета за время наполнения формы из-за избыточного содержания связующих материалов и/или низкой температуры заливаемого чугуна.

Таким образом, успешное применение брикетированных отсевов производства модификаторов для вторичного модифицирования ВЧШГ возможно только при строгом контроле количества связующих веществ, давления прессования, а также определения для каждой отливки необходимой температуры заливки чугуна с точки зрения пролонгированного и, в то же время, полного растворения брикета за время заполнения формы. При достижении таких условий кинетика растворения брикета будет сопоставима с кинетикой растворения кускового ферросилиция.

В ходе выполнения исследований установлено, что применение литых быстроохлаждённых вставок на основе ферросилиция для графитизирующего внутрiformенного модифицирования позволяет улучшить форму шаровидного графита (преобладание формы ШГф5), продлить действие магниевого модификатора, уменьшить размер и обеспечить равномерное распределение графита по объёму металлической матрицы, предупредить появление цементита и подавить появление крупнодисперсных ферритных областей. Дополнительно достигнута высокая прочность и полностью перлитная структура в отливках из ВЧШГ высоких марок. Достижение такого комплексного эффекта объясняется мелкодисперсной структурой литой вставки, отливаемой в водоохлаждаемый кокиль.

На первом этапе была реализована попытка с помощью литых вставок получить в лите структуре, соответствующую нормативам для нормализованных отливок «Вал коленчатый» с содержанием равномерно распределённого феррита в структуре чугуна не более 8%. Стендовые натурные испытания показали преодоление деталью требуемых 600 часов ходимости. Испытания на усталостную долговечность показали, что все три детали выдержали 90 тыс., 111 тыс. и 140 тыс. циклов до разрушения.

На втором этапе работы была решена задача получения требуемых характеристик структуры и свойств чугуна в отливках только за счёт использования быстроохлаждённой литой вставки без первичного графитизирующего модифицирования и нормализации. Показано, что внутриформенное модифицирование ВЧШГ литыми вставками позволяет повысить временное сопротивление деталей «Вал коленчатый» в литом состоянии в среднем на 70 МПа, а в нормализованном – в среднем на 40 МПа.

Для получения объективной информации о влиянии на структурообразование чугуна активных добавок, входящих в состав графитизирующих модификаторов, были проведены сравнительные производственные испытания на одной и той же детали из чугуна одной марки. Сопоставительные испытания были проведены на сером чугуне марки Gh190В для отливки «Блок цилиндров» при использовании трёх видов модификаторов ФС65Ба1, ФС75СтЦр и ФС75Ба2,5.

На первом этапе проведено подробное изучение модифицирующей способности модификаторов ФС75СтЦр и ФС75Ба2,5. Металлографический анализ чугуна отливок показал, что при использовании модификатора ФС75Ба2,5 в отличие от ФС75СтЦр форма графита даже в зоне литейной корки гильзы цилиндров не междендритная (ПГ р8, ПГ р9), а равномерно распределённая, без преимущественного направления (ПГ р1).

На втором этапе установлено снижение расхода модификатора ФС75Ба2,5 по сравнению с ФС75СтЦр примерно на 20%. Металлографический анализ одной из отливок опытной партии показал полное соответствие микроструктуры и механических свойств установленному нормативу.

На третьем этапе работ были проведены расширенные производственные испытания модификатора ФС75Ба2,5 без добавления графита в зёрнах при расходе 3...4 кг на ковш. Снижение в два раза количества возвращенных ковшей при использовании модификатора ФС75Ба2,5 показывает его высокую эффективность, обеспечивающую стабильность процесса модифицирования по сравнению с ФС75СтЦр в совокупности с графитом в зёрнах.

Таким образом, по результатам расширенных производственных испытаний данных модификаторов подтверждено влияние содержания кремния, а также количества и вида активных добавок на эффект графитизирующего модифицирования.

При графитизирующем модифицировании чугуна в ковше микроструктура поверхностных слоёв и на глубине в достаточно крупных отливках, например, «Блок цилиндров», характеризуется неоднородным распределением графита и наличием свободного феррита. Одним из возможных вариантов подавления свободного феррита является микролегирование. При доведении в чугуне Gh190В содержания меди до 0,4% и олова до 0,13% свободный феррит в отливках «Блок цилиндров» был устранён. Другим возможным вариантом снижения содержания феррита является уменьшение дозы вводимого модификатора, однако при этом повышается вероятность получения отбела. Для преодоления этого противоречия опробовано вторичное внутриформенное модифицирование литыми вставками на основе ферросилиция с активными графитизирующими добавками. Для удобства установки в нижнюю полуформу литая вставка была совмещена с керамическим фильтром в виде комбифильтра. Наличие в составе модификатора Са, Мп, РЗМ позволило снизить массу литой вставки до 0,1% (110 г) от металлоёмкости литниковой системы. Результаты исследований показали, что наиболее приемлемым вариантом для эффективного модифицирования низкосернистого чугуна

для крупногабаритных отливок является следующая двухступенчатая схема: ФС40РЗМ10 в количестве 1,0 кг в ковш в сочетании с литой вставкой массой 110 г в форму.

В технологии получения мелкого тонкостенного литья из серого чугуна с повышенным содержанием серы – 0,06...0,08%, например, отливок «Поршневое кольцо», ввиду высоких требований к качеству структуры и свойств совместно применяется смесь следующих модификаторов – ФС65Ба1 и комплексного модификатора ФС30У60, состоящего, в свою очередь, из ферросилиция, силикокальция и графита. Общая масса навески данного смесового модификатора – около 1,1 кг. Несмотря на то, что сера снижает жидкотекучесть чугуна и несколько повышает его склонность к отбелу, в сером чугуне для мелких тонкостенных отливок она позволяет формировать регламентируемый нормативом розеточный ППг7 мелкодисперсный графит ППд15-25. Совместное применение модификаторов ФС65Ба1 и ФС30У60 в данном случае позволяет увеличить количество центров кристаллизации графита для обеспечения роста пластинчатого графита в чугуне, снизить степень переохлаждения чугуна в процессе эвтектической кристаллизации, что позволяет свести к минимуму вероятность образования отбела, особенно в тонкостенных отливках, и улучшить обрабатываемость. Однако совместное действие этих модификаторов явилось недостаточно эффективным – уровень литейного брака в виде шлаковых включений и газовых раковин превышает установленный норматив. Указанные недостатки данного комплексного модификатора обусловлены наличием в его составе повышенных концентраций алюминия, вызывающего газовую пористость, и кальция, стимулирующего повышенное шлакообразование при связывании серы. Таким образом, с целью повышения эффективности использования графитизирующего модификатора для высокосернистого чугуна (при содержании серы от 0,05% и выше) необходимо введение в его состав элементов, имеющих высокое сродство к сере, при максимальном ограничении шлакообразующих (барий и кальций) и газообразующих элементов (алюминий).

Для опробования были взяты модификаторы ФС75Ст и ФС75СтЦр. Анализ результатов заливки опытно-промышленной партии поршневых колец с применением опытных модификаторов показал: снижение на 21% внутреннего литейного брака и на 33% – внешнего брака при механической обработке; высокую эффективность опытного модификатора при обработке расплава серого чугуна марки СЧ40, что дало возможность снизить его навеску до 0,4 кг; снижение отбела в микроструктуре отливок с 0,06% до 0,003%.

При исследовании эффективности работы смесового модификатора на СЧПГ для отливок деталей «Блок цилиндров» усвоение углерода и кремния из модификатора в металле составило 35-65% и 50-100% соответственно. Микроструктура и твердость полученных отливок: перлит, феррит до 5%, кромочный цементит на глубину до 2 мм, междендритный графит ППг8, ППг9; НВ 229. Одной из версий низкого усвоения мелкодисперсных компонентов модификатора и, как следствие, недостаточного модифицирования чугуна, может быть наличие большого количества фракции, имеющей размер меньше критического, с точки зрения смачивания и растворения в расплаве чугуна, которая выносятся на поверхность зеркала металла и сгорает на воздухе. Однако при увеличении размера фракции модификатора теряется эффект кластерного зарождения включений графита.

Таким образом, на практике для составляющих модификатора – мелкодисперсного графита, являющегося кластерными зародышами графитных включений в чугуне и мелкокристаллического кремния, усиливающего образование и рост включений графита, главной проблемой является улучшение их усвоения расплавом. Ввиду того, что в микроструктуре отливки присутствует и феррит и цементит, имело место немодифицирование расплава.

По результатам испытаний смесового модификатора на СЧПГ необходимо отметить следующее.

1. Ковшевое модифицирование расплава чугуна материалом МК21 в количестве ~ 0,15% (2 кг) не обеспечило необходимое качество чугуна в отливке. В отливке присутствует поверхностный отбел на глубину 5 мм и графит типов ППг8, ППг9; НВ 229.

2. При введении в стояк формы 0,05% (15 г) материала МКМг19 отбел с поверхности уменьшился с 5 до 1,5 мм, а также был устранён междендритный графит ПГр9; НВ 217-229.

3. Увеличение расхода материала МКМг19 в форму до 0,1% (30 г) позволило полностью устранить свободный цементит и графит ПГр8, следовательно, количества модификатора оказалось достаточным для полноценной обработки расплава, в результате чего переохлаждение чугуна было устранено; НВ 207-217.

Таким образом, введение 0,1% смесового модификатора МКМг19 в стояк формы после предварительной ковшевой обработки расплава чугуна в ковше 2 кг (~ 0,15%) модификатора МК21, вводимого под струю единой порцией, позволяет получить необходимое качество чугуна в отливке.

При внутриформенном графитизирующем модифицировании серого чугуна смесовым модификатором МКМг19 в отливках был обнаружен междендритный графит, цементит в углу сечения при относительно низкой твёрдости – НВ 197-207. Следовательно, внутриформенное графитизирующее модифицирование серого чугуна без предварительной обработки графитизатором в ковше неэффективно и нецелесообразно.

Анализ результатов исследований графитизирующей способности модификатора для встречного модифицирования Glitter показал, что его введение в расплав серого чугуна, модифицированного по серийной технологии, позволяет снизить выделение свободного феррита в микроструктуре чугуна на 5% (с 10% до 5% и с 5% до 0) при неизменной твёрдости НВ 207-217, а также способствует получению наиболее благоприятной морфологии графита – ПГр1 (росту более крупных пластинок графита одинакового размера) и более равномерному его распределению по объёму металлической матрицы. Введение модификатора Glitter в ковш с последующим поздним графитизирующим модифицированием позволяет устранить свободный цементит.

### Выводы

1. Установлено влияние лантана на образование большого количества мелких глобул вторичного графита и конгломератов крупных глобул первичного графита, имеющих бимодальное асимметричное статистическое распределение по диаметру включений.

2. При получении ВЧШГ в зависимости от стадийности ввода одного и того же графитизирующего модификатора (ФС55Ба22) происходит изменение механических свойств и морфологии шаровидного графита.

3. Экспериментально доказано, что при графитизирующем модифицировании низкосернистого чугуна модификатором ФС75Ба2,5 морфология графита как в теле отливки, так и в литейной корке (зоне припуска) представлена равномерно распределённой формой ПГр1; при обработке расплава модификатором ФС75СтЦр в литейной корке графит представлен междендритными формами ПГр8, ПГр9.

4. На практике доказано, что позднее графитизирующее модифицирование ВЧШГ литыми быстроохлаждёнными внутриформенными вставками на основе ФС75 с добавками алюминия, кальция и РЗМ позволяет полностью исключить использование графитизирующего модификатора для первичной ковшевой обработки чугуна, а также позволяет получать бесферритную микроструктуру в литом состоянии, соответствующую нормализованной.

5. Исследована эффективность использования всех разновидностей «тяжёлых» лигатур на никель и/или медной основах с позиций модифицирующей и микролегирующей способности.

6. Разработаны и внедрены в производство равнозначные по эффективности технологии получения отливок из ВЧШГ низких марок и ЧВГ – «заливка сверху» и «контейнерная технология».

7. Разработаны и опробованы составы модификаторов для получения отливок из ЧВГ внутриформенным модифицированием: магнийсодержащего – ФСМг6РЗМ1,5 и безмагниевого – ФС50РЗМ20.

8. Установлены особенности каталитического влияния ПАЭ – Вi и Те – на структурообразование чугунов в зависимости от стадийности ввода с графитизирующим модификатором или без него с целью получения требуемой или стабилизации литой структуры чугуна.

9. Разработаны технологические схемы получения отливок из ВЧШГ высоких марок (свыше ВЧ70) с применением смесевых комплексных модификаторов.

*Дата поступления  
в редакцию 24.09.2010*

**D. A. Boldyrev**

### **SCIENTIFIC-TECHNOLOGICAL BASES OF MODERN METHODS OF MODIFYING CONSTRUCTIONAL CAST IRONS**

On a base of ordering and generalization of data on modifying cast irons in conditions of not modernized manufacture the technologies are created, allowing to lower the cost price of manufacture both already mastered, and new production at maintenance of a required degree of quality, and also to provide increase of special properties of production at the increased requirements to serviceability and a resource.

*Key words:* cast iron; graphitizing, spheroidizing modifying; microstructure; rich alloy.

УДК 620.178

С.Е. Невский, А.Ю. Горохов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ УСТАЛОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Дзержинский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Приведены сведения о специальном оборудовании для исследования материалов на стабильность упругих свойств при многоцикловом нагружении с частотой в сотни герц. Даются экспериментальные данные влияния режимов термообработки сталей на предел усталости и дефект модуля упругости.

*Ключевые слова:* усталость, термообработка, модуль упругости.

К современным гидроакустическим излучателям, используемым в акустической океанографии, предъявляются высокие требования. Излучатели должны развивать акустическую мощность в десятки киловатт в режиме когерентного излучения и обеспечивать высокую эффективность преобразования энергии. Весо-габаритные характеристики должны допускать их использование в морских условиях. Исходя из этого материалы, применяемые для изготовления упругих элементов излучателей, служащих для преобразования электрических колебаний в механические, должны выдерживать высокие амплитудные напряжения на базе в сотни миллионов циклов нагружения и обладать стабильностью частоты собственных колебаний. Так, относительное изменение частоты колебаний не должно превышать 1% в процессе работы излучателя.

Необходимые сведения о свойствах и поведении материалов, работающих в указанных условиях, а также влиянии на них технологических факторов в литературе отсутствуют. Стандартные методики не позволяют осуществлять многоцикловое усталостное воздействие при определении модуля упругости.

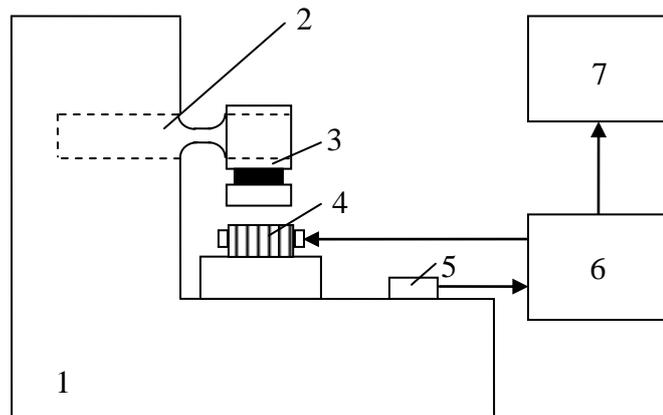
Нашей задачей явилось создание специального испытательного оборудования и проведение на нем необходимых исследований. При этом учитывалось, что для заданных практических целей необходимо знать относительное изменение упругих постоянных, а не их абсолютные значения.

В разработанной установке стабильность упругих свойств материалов оценивается на основе изменения частоты собственных колебаний образцов. Вид деформации – консольный изгиб. Установка работает в автоколебательном режиме на частоте собственных колебаний образца. Диапазон исследуемых параметров: амплитуда колебаний образца 0,3–3 мм; максимальное напряжение цикла нагружения 100–1000 МПа; частота механических колебаний 150–300 Гц. Частоты колебаний и схема нагружения определяются условиями работы реальных изделий.

Установка (рис. 1) состоит из трех основных элементов: станины 1, блоков питания и автоматики 6, а также средств измерения параметров колебательного процесса 7.

Испытываемый образец 2 жестко крепится одним концом в станине, другим к ферромагнитному якорю 3. Статор электромагнитного возбудителя 4 жестко крепится к станине через виброизоляционные прокладки. Станина воспринимает колебания образца и передает их пьезоэлектрическому датчику 5.

Сигнал с датчика поступает в блок управления 6, который вырабатывает импульсы тока для питания катушки электромагнитного возбудителя с частотой, равной частоте собственных колебаний образца. Блок управления содержит усилитель-преобразователь, резонансный тиристорный инвертор, формирователь импульсов управления тиристорами, стабилизатор амплитуды колебаний образца.

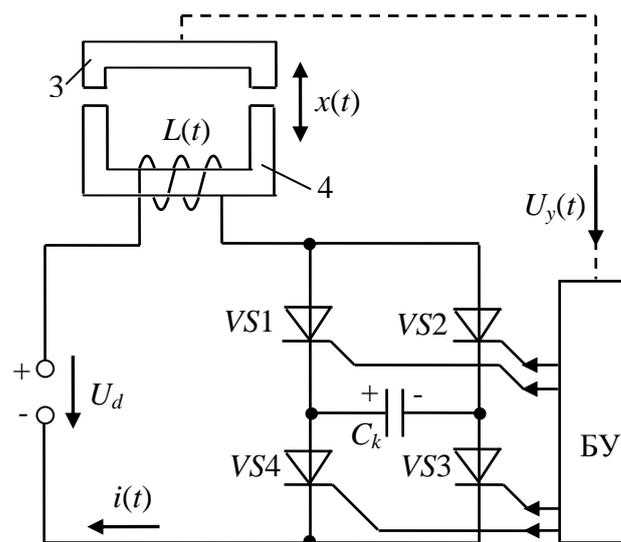


**Рис. 1. Схема установки для испытаний на стабильность частоты собственных колебаний**

Для возбуждения механических колебаний образца применяется электромагнитный силовозбудитель однократного действия с обратным движением образца за счет сил упругости.

Рассмотрим работу установки на рис. 1 как электромеханической системы для возбуждения механических колебаний в режиме, когда частота возбуждающей силы всегда равна частоте собственных механических колебаний образца, выполненного из исследуемого материала.

На рис. 2 показаны статор электромагнитного силовозбудителя 4, состоящий из неподвижной части магнитопровода с катушкой, подвижная часть магнитопровода (якорь) 3, с прикрепленным к нему испытываемым образцом и резонансный инвертор на тиристорах VS1-VS4, с помощью которого создается ток необходимой частоты в катушке силовозбудителя.



**Рис. 2. Электромеханическая система**

Резонансный контур инвертора образуется индуктивностью рабочей катушки и коммутирующей емкостью  $C_k$ . Через емкость протекает переменный ток, а через катушку однополярный импульсный, так как она включена в цепь питания постоянного тока. Длительность импульса тока  $t_{и}$  определяется частотой электрических колебаний резонансного контура и задается коммутирующей емкостью  $C_k$ , которая выполнена в виде батареи конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости. Последовательно с катушкой включается

силовой транзистор (на рис. 2 не показан), с помощью которого за счет изменения напряжения на инверторе и рабочего тока  $i(t)$  задается и поддерживается неизменной амплитуда механических колебаний.

При включении пары тиристоров  $VS1, VS3$  или  $VS2, VS4$  в электрической цепи возникает колебательный переходный процесс и через рабочую катушку протекает импульс тока в виде полуволны синусоиды. Когда этот импульс проходит через ноль, включенная ранее пара тиристоров закрывается, разрывая электрическую цепь, и наступает пауза тока. При протекании тока через катушку возникает электромагнитная сила  $F_3$ , под действием которой образец изгибается к низу. Во время паузы тока  $F_3 = 0$  образец совершает обратное перемещение под действием силы упругости. Затем возникает новый импульс тока и цикл повторяется.

С помощью пьезоэлектрического датчика получается электрическое напряжение, пропорциональное ускорению движения образца. Это напряжение усиливается и дважды интегрируется электронным блоком управления БУ.

В результате получается сигнал обратной связи, пропорциональный величине перемещения образца  $x(t)$  и имеющий частоту, равную частоте собственных механических колебаний образца. Частота напряжения обратной связи задает частоту подачи напряжения управления тиристорами. Благодаря этому частота включения импульсов тока, протекающего через рабочую катушку, и, соответственно, частота возбуждающей электромагнитной силы  $F_3$  равна частоте собственных колебаний подвижной части 3 электромеханической системы. При изменении частоты механических колебаний автоматически изменяется частота возбуждающей силы вследствие изменения частоты импульсов тока катушки.

Ввиду того, что внешняя сила несинусоидальна, а также вследствие зависимости этой силы от положения образца, форма движения образца отличается от синусоидальной, и амплитуда колебаний при движении вниз будет больше, чем при движении вверх. Однако анализ формы движения образца показал, что при скважности тока  $q \geq 2$  содержание постоянной составляющей и высших гармоник в кривой  $x(t)$  не превышает 1%, то есть форма колебаний образца практически является синусоидальной. Осциллограммы тока в катушке  $i(t)$  и перемещения подвижной части  $x(t)$ , приведенные на рис. 3, подтверждают это допущение.

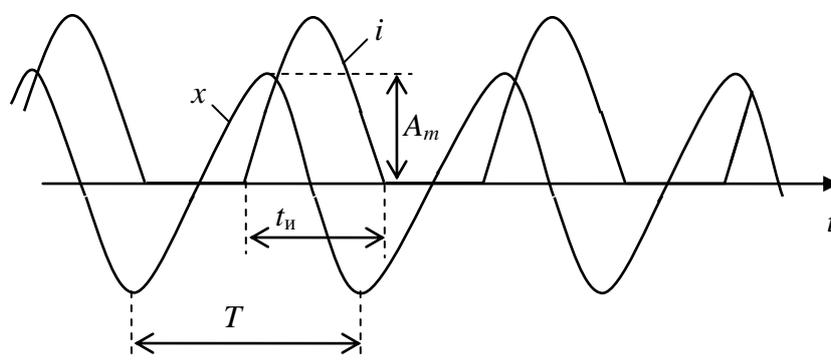


Рис. 3. Осциллограммы тока в катушке  $i$  и перемещения образца  $x$

Возбуждение механических колебаний осуществляется слабым ударом резинового молоточка по образцу, после чего система поддерживает колебания с заданной амплитудой и частотой. По мере увеличения числа циклов колебаний изменяются упругие свойства материала образца и частота собственных колебаний, что фиксируется средствами измерений. Основные из них следующие:

- измерение частоты колебаний и счет числа циклов нагружения с помощью электромагнитных частотомеров;

- измерение амплитуды колебаний с помощью пьезоэлектрического датчика и цифрового вольтметра после предварительной тарировки;
- наблюдение за колебательным процессом с помощью осциллографа.

На рис. 4 приводится форма реального образца. Его основные размеры:  $a=10$  мм,  $l=43$  мм,  $h=5$  мм,  $H=13$  мм. Ширина образца  $b=10$  мм. Рабочие поверхности длиной  $l$  и высотой  $h$  тщательно шлифуются.

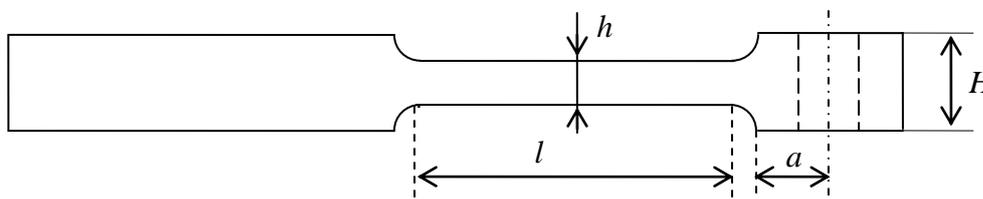


Рис. 4. Форма испытываемого образца

Максимальное напряжение цикла нагружения в расчетном сечении рассчитывается по измеряемой амплитуде колебаний образца. При установлении расчетной зависимости предполагалось, что в динамическом режиме действующие на образец силы создадут такие же максимальные напряжения и перемещения, как и статическая сила, равная по величине результирующей динамической. Статическим нагружением образца на специальном стенде определяется зависимость между приложенной силой  $F_m$  и перемещением  $A_m$  образца в точке ее приложения. Затем находится коэффициент упругости, характеризующий упругие свойства образца,

$$K_y = F_m / A_m. \quad (1)$$

Реальному образцу приводится в соответствие прямоугольный стержень равномерного сечения, равного расчетному, испытывающему изгиб под действием силы  $F_m$ . Причем, длина этого стержня  $l_3$  берется такой, чтобы коэффициент упругости стержня совпадал с коэффициентом  $K_y$  реального образца. Известно, что при консольном изгибе балки равномерного прямоугольного сечения под действием сосредоточенной силы максимальное механическое напряжение, возникающее в месте заделки,  $\sigma_m$  и максимальное смещение в точке приложения силы  $A_m$  определяются из выражений

$$\sigma_m = \frac{6F_m l_3}{bh^2}; \quad A_m = \frac{4F_m l_3^3}{Eb h^3},$$

где  $F_m$  - амплитуда действующей на образец силы,  $E$  - модуль нормальной упругости материала образца,  $b$ ,  $h$  - размеры расчетного сечения. Отсюда находим эквивалентную длину с учетом (1):

$$l_3 = h \left( \frac{Eb}{4K_y} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), а также формулу для напряжения в расчетном сечении консольной балки, нагруженной сосредоточенной силой, получим зависимость между максимальным напряжением  $\sigma_m$  в расчетном сечении и амплитудой колебаний  $A_m$ :

$$\sigma_m = \frac{3,78 A_m}{h} \left( \frac{EK_y^2}{b^2} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Контрольные исследования показали, что отклонение напряжений  $\sigma_m$ , рассчитанных по формуле (3), не превышает 10% от значений максимального напряжения цикла нагружения, полученных с помощью тензометрирования в динамическом режиме.

При изменении упругих свойств материала под действием длительной знакопеременной нагрузки происходит изменение частоты собственных колебаний образца, по которому можно судить о стабильности упругих свойств.

Известно [1], что квадрат частоты собственных колебаний образца определяется соотношением

$$f^2 = kE, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от номера гармоники, условий закрепления концов образца, плотности и линейных размеров образца. Считая  $k$  постоянным для данного образца и зная относительное изменение частоты собственных колебаний, можно определить  $\delta_E$  – дефект модуля упругости (относительное изменение модуля  $E$ ).

Разложив соотношение (4) в ряд и ограничившись членами первого порядка малости, можно получить

$$\delta_E = \frac{\Delta E}{E_0} = 2 \frac{\Delta f}{f_0}, \quad (5)$$

где  $E_0$ ,  $f_0$  и  $\Delta E$ ,  $\Delta f$  – модуль Юнга, частота собственных колебаний в начале испытаний и их абсолютные изменения.

Так как частота колебаний образцов составляет ~200 Гц, а изменение ее определяется с абсолютной погрешностью 0,01 Гц, то относительная погрешность в определении  $\delta_E$  будет равна ~10% при абсолютном изменении частоты колебаний на 0,1 Гц. При увеличении  $\Delta f$  эта погрешность уменьшается.

Исследовались различные материалы, в том числе, стали и титановые сплавы. Далее приводятся данные для двух типов сталей, рекомендованных к исследованию.

Для исследования были выбраны малолегированная конструкционная сталь 6ХС и высоколегированная мартенситно-старяющаяся сталь Н18К9М5Т (ВКС-210). Режимы термообработки сталей представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Режимы термообработки сталей

Марка стали	Закалка	Отпуск (старение), °С	Время выдержки, ч
6ХС	920°С, время выдержки 20 мин в масле	370	1
		550	1
		600	1
		150+370	0,5+1
ВКС-210	820°С, время выдержки 1 ч в воде	500	3
		525	3
		550	3
		350+510	1+3

Выбор температур и условий закалки производился по режимам, рекомендованным заводом-изготовителем. Температура последующего отпуска (старения) изменялась с целью выяснения оптимальных соотношений между усталостными свойствами материала и стабильностью упругих свойств.

Наибольшее значение предела усталости для стали 6ХС наблюдалось у образцов, термообработанных по режиму с отпуском при температуре 370°C, - 720 МПа. Значения пределов усталости для серий образцов, отпущенных после закалки при температуре 550°C, 600°C и с двойным отпуском (160°+370°), составили 700, 680 и 650 МПа соответственно.

Максимальное значение дефекта модуля нормальной упругости на базе  $10^8$  циклов нагружения для образцов из стали 6ХС составило: 2,5% (двойной отпуск), 2% (отпуск при температуре 600°C), 1% (отпуск при температуре 550°C) и 0,8% (отпуск при температуре 370°C). Наименьшее значение дефекта модуля упругости наблюдалось у образцов из стали, имевших температуру отпуска 370°C. Эта температура отпуска предшествует температурному интервалу, при котором начинается интенсивное образование цементита и способствует сохранению в структуре стали довольно высокого содержания когерентных метастабильных карбидных фаз. При данной температуре отпуска значительно снижается уровень закалочных напряжений, способствующих протеканию микропластической деформации [2]. Увеличение дефекта модуля нормальной упругости при увеличении температуры отпуска предположительно можно объяснить изменениями, происходящими в мартенситной матрице вследствие ухода углерода из твердого раствора и укрупнения карбидов.

Наибольшее значение предела усталости для стали ВКС-210 700 МПа было получено при температуре старения 550°C. При более низкой температуре старения пределы усталости имеют меньшее значение: 650 МПа (525°C); 480 МПа (500°C) и 550 МПа (350°+510°C).

Для стали ВКС-210 при повышении температуры старения от 500 до 550°C наблюдалось уменьшение дефекта модуля нормальной упругости. Так, для образцов, имевших температуру старения 500°C, максимальное значение  $\delta_E$  составило 2,8%, а для образцов с температурой старения 550°C – 1%.

Сталь ВКС-210 относится к мартенситно-стареющим. В закаленном состоянии мартенситно-стареющие стали содержат остаточный аустенит и мартенсит. При нагреве закаленной стали, начиная с некоторых температур, происходит выделение из мартенсита дисперсных включений интерметаллидов и карбидов, что обуславливает ее упрочнение. При более высоких температурах начинается обратное превращение  $\alpha$ - $\gamma$  [3].

Электронно-микроскопические исследования тонких фольг «на просвет» показали, что микроструктура стали 6ХС после закалки и отпуска при температуре 370°C представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор на основе железа. Встречаются выделения округлой формы размером 0,1-0,5 мкм. Сталь ВКС-210 после закалки и старения при температуре 550°C имеет разориентированную субзернистую структуру. Наблюдается очень дисперсная (~0,04 мкм) равномерно распределенная в матрице фаза  $(\text{FeNiCO})_2\text{Mo}$ , имеющая нечеткие очертания.

Установлено, что при многоцикловом нагружении для стали 6ХС дефект модуля нормальной упругости возрастает с повышением температуры отпуска. Для мартенситно-стареющей стали ВКС-210 при повышении температуры старения до 550°C наблюдается уменьшение дефекта модуля упругости. В структурах обеих сталей, соответствующих наиболее упрочненному состоянию, наблюдаются мелкодисперсные частицы, являющиеся эффективными препятствиями для движения дислокаций.

Таким образом, определение предела усталости в режиме, приближенном к реальным условиям работы, и дефекта модуля упругости материалов при усталостном воздействии позволяет подобрать материалы и режимы их термообработки, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к упругим элементам при их работе в реальных условиях, и на базе полученных данных провести расчет упругих элементов излучателей различной мощности.

#### Библиографический список

1. Вибрации в технике / под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1976. Т. 1. – 352 с.
2. Сарак, В.И. Локальные напряжения в мартенсите закаленной стали / В.И. Сарак, Г.А. Филиппов // Взаимодействие дефектов и свойства стали. – Тула: ТГТУ. 1976. С. 101–104.

3. **Спиридонов, В.В.** Фазовый состав мартенситно-стареющих сталей на основе композиции ООН18К9М5 / В.В. Спиридонов [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1974. №4. С. 850–856.

*Дата поступления  
в редакцию 21.09.2010*

**S.E. Nevsky, A.U. Gorohov**

**DETERMINATION OF MATERIALS COEFFICIENT OF ELASTICITY FLAW UNDER  
FATIGUE LOAD**

Information about special equipment studying the materials for detecting stability of elastic characteristics at high-cycle loading with the frequency of hundreds of hertz has been given in the report. Experimental data about the influence of steels heat- treatment conditions on the fatigue limit and the coefficient of elasticity flaw have been presented.

*Key words:* fatigue, heat treatment, coefficient of elasticity.

УДК 539.519

Г.А. Мишаков<sup>1</sup>, А.И. Родионов<sup>2</sup>**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
ПОСЛЕ ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)<sup>2</sup>

Изучено распределение микротвердости на глубине в образцах из различных конструкционных сталей, подвергнутых диффузионному борированию и последующей лазерной обработке. Исследованы режимы лазерного облучения, позволяющие частично или полностью растворять боридные слои в ванне расплава. Показана возможность полного сохранения боридного слоя с получением под ним закалочной зоны из жидкой ванны расплава.

*Ключевые слова:* диффузионное борирование, лазерная обработка, закалочная зона.

Известно, что полученные диффузионными методами боридные слои на сталях обладают высокой твердостью и хорошо работают в парах трения [1]. Основными недостатками боридных слоев являются низкая скорость роста и склонность к растрескиванию с увеличением их толщины. Высокие эксплуатационные качества достигаются лишь в том случае, когда под слоем прочих боридов имеется достаточно твердая основа. Физические процессы, протекающие при лазерном борировании металлов из боросодержащих обмазок, достаточно подробно исследованы в работах [2, 3], но микротвердость поверхностного слоя, полученного этими методами, значительно ниже микротвердости после диффузионного борирования.

Таким образом, представляется целесообразной разработка методов комплексной химико-термической и лазерной обработки как инструментальных, так и конструкционных сталей с целью увеличения рабочего ресурса деталей машин и механизмов. Особенно эффективны эти методы для изделий, имеющих области интенсивного локального износа.

В настоящей работе исследована возможность создания закалочной зоны под слоем боридов, полученных диффузионными методами, путем их последующей обработки излучением технологического СО<sub>2</sub>-лазера. Особое внимание уделено поиску режимов лазерной обработки, не приводящих к заметному разрушению боридного слоя, но создающего под ним закалочную зону из жидкой ванны лазерного расплава.

Для экспериментов были выбраны стали 40Х, 20Х, 9Х, Ст.20, Ст.3, Ст.45. Жидкостное безэлектродное борирование проводили в течение 2÷8 часов в боризаторе, содержащем 35% В<sub>4</sub>С 75% NaВ<sub>4</sub>О<sub>7</sub> при Т = 1050°С. Борирование из твердой фазы осуществляли в герметичном контейнере с В<sub>4</sub>С и AlF<sub>3</sub> (1,5%) при 1000 °С в течение 9 часов. После химико-термической обработки образцы обрабатывали излучением СО<sub>2</sub>-лазера «Комета-2» с длиной волны 10,6 мкм и плотностью мощности ~ 5 · 10<sup>4</sup> Вт/см<sup>2</sup> при скорости сканирования 1,5÷3,0 мм/с. Лазерный луч фокусировали на поверхность металла фокусирующей системой на основе полированных медных зеркал с водяным охлаждением. В результате на поверхности образца формировалось пятно диаметром  $d = 2,3$  мм. Специального поглощающе-легирующего покрытия не использовали.

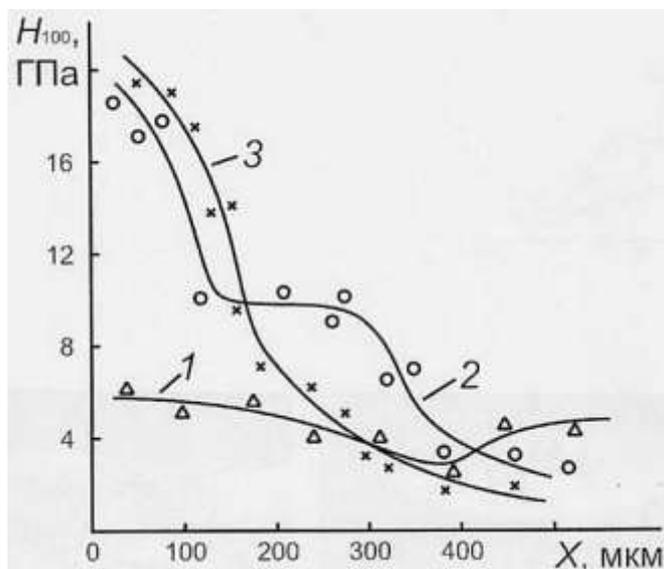
Из обработанных таким образом образцов готовили поперечные металлографические шлифы, которые протравливали в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микротвердость боридных слоев и закалочной зоны под ними измеряли микротвердомером ПМТ-3.

Для анализа концентрации бора в зоне обработки использовался метод  $\alpha$ -трековой автордиографии. Метод основан на фиксации твердотельными детекторами следов

$\alpha$ -частиц, являющихся продуктами расщепления естественного изотопа  $B^{10}$  тепловыми нейтронами. Образцы с плотно прижатыми детекторами облучали нейтронами в канале реактора ВВР-СМ при плотности потока  $2 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в течении  $20 \div 1200 \text{ с}$ . Треки  $\alpha$ -частиц выявляли с помощью травления детекторов. Плотность треков анализировалась на металлографическом микроскопе.

Проведенные исследования показали, что при указанных выше режимах химико-термической и лазерной обработки в образцах с тонкими боридными слоями (до 50 мкм) происходит чаще полное, реже частичное их разрушение, а в образцах с боридными слоями  $\sim 100 \text{ мкм}$  и выше возможно полное их сохранение. Так, на стали 9Х с боридным слоем 20 мкм после облучении наблюдали полное растворение боридов в ванне расплава. Зона упрочнения с микротвердостью  $H=10 \div 12 \text{ ГПа}$  сформировалась до глубины 400 мкм (рис. 1, кривая 1).

На образцах из Ст.45 также наблюдали расплавление тонких  $\sim 50 \text{ мкм}$  боридных слоев, однако между расплавом боридов и зоной проплава матрицы основного металла наблюдали четкую границу (рис. 2, а). Перемешивание ванн расплавов не произошло. Микротвердость в зоне расплава боридов достигала величины  $H=19 \text{ ГПа}$ , а в зоне лазерной закалки из жидкой ванны  $\sim 10 \text{ ГПа}$ . Общая глубина зоны упрочнения  $\sim 350 \text{ мкм}$  (рис. 1, кривая 2).



**Рис. 1. Распределение микротвердости в образцах с полным (1) или частичным (2) проплавлением боридного слоя, а также его полным сохранением (3)**

После лазерной обработки боридных слоев толщиной  $220 \div 230 \text{ мкм}$  наблюдали либо частичное разрушение боридного слоя, либо полное его сохранение. На Ст.3 при скорости сканирования лазерного луча  $1,5 \text{ мм/с}$  толщина боридного слоя уменьшилась до  $150 \text{ мкм}$ . Микротвердость сохранившегося боридного слоя убывает от  $19$  до  $14 \text{ ГПа}$ . В закалочной зоне под боридами микротвердость составила  $H=6 \div 7 \text{ ГПа}$ . Закалка произошла из жидкой ванны лазерного расплава на что указывает четкая граница закалочной зоны. Микротвердость на основе  $H=3 \text{ ГПа}$  (рис. 1, кривая 3).

Типичные концентрационные профили бора, сформировавшегося в результате последовательного химико-термической и лазерной обработки Ст.3, приведены на рис. 2.

В зоне расплава наблюдали равномерное распределение концентрации бора, хотя на трекограммах наблюдали отдельное его скопление. Возможно, эти скопления соответствуют фазе FeB. Равномерное распределение бора в ванне расплава согласуется с моделью термо-

капиллярного массопереноса, согласно которой скорость движения частиц расплава велика и перемешивание ванны расплава достаточно интенсивное.

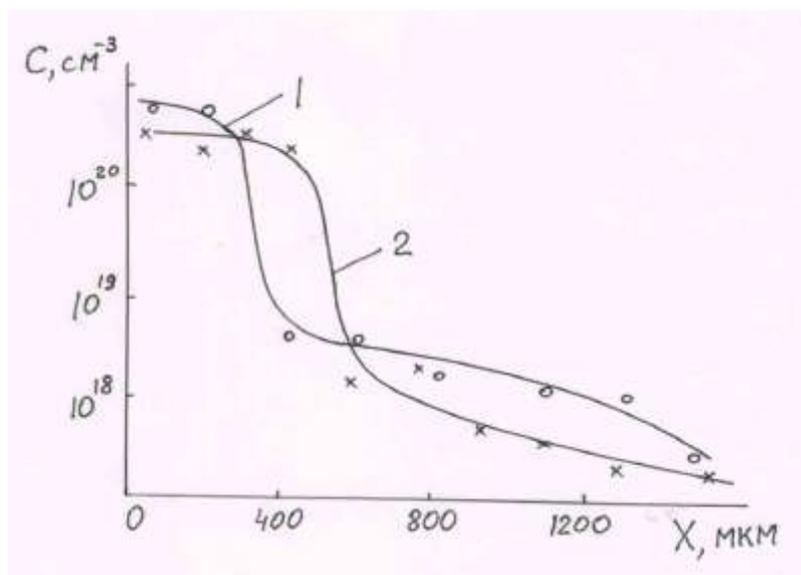


Рис. 2. Распределение содержания бора в Ст.3 при частичном (1) и полном (2) проплавлении боридного слоя

В твердой фазе под ванной расплава концентрации бора  $10^{18} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что указывает на ускоренную диффузию бора по границам зерен. Некоторые закономерности этого массопереноса обсуждались нами в работе [3].

При скорости сканирования лазерного луча менее 2 мм/с наблюдали появление небольшого числа микротрещин в боридном слое. При скорости сканирования 1,5 мм/с наблюдалось частичное разрушение боридных слоев даже значительной толщины (рис. 3).

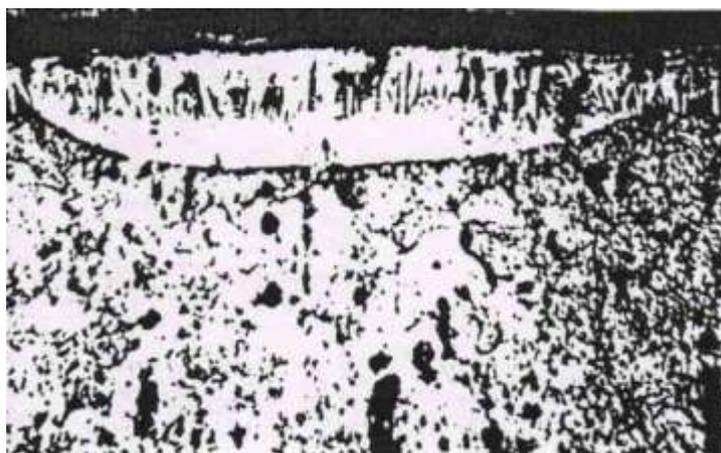


Рис. 3. Фотография микрошлифа с частичным разрушением боридного слоя (~230 мкм) при скорости сканирования лазерного луча ~ 1,5 мм/с (Ст.3)

С увеличением скорости сканирования до 3,0 мм/с толстые боридные слои полностью сохранялись. Под слоем боридов на стали 40Х металл расплавился на глубину до 200 мкм (рис. 4, б). Содержание бора в ванне расплава, полученное с помощью  $\alpha$ -трековой автордиографии, составило не более  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует примерно 0,1 %. Это подтверждает практически полное сохранение боридного слоя. Лазерное облучение боридного слоя не привело к заметному изменению его микротвердости, которая осталась достаточно высокой

$H=20\div 22$  ГПа. В затвердевшей ванне расплава под боридами микротвердость была  $H=8\div 9$  ГПа. Общая протяженность зоны упрочнения составила  $\sim 450$  мкм.

Можно предположить, что сохранение боридного слоя связано с кинетикой его растворения в ванне расплава матрицы металла. Несмотря на то что температуры плавления боридов FeB ( $1650^{\circ}\text{C}$ ) и  $\text{Fe}_2\text{B}$  ( $1410^{\circ}\text{C}$ ) сравнимы с температурой плавления стали, за время существования жидкой ванны расплава ( $\sim 1$  с) они не успевают раствориться и сохраняются на поверхности, а процесс кристаллизации матрицы не приводит к заметному их разрушению.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что лазерная обработка боридных слоев толщиной более 200 мкм, полученных на поверхности металла диффузионными методами, может быть проведена с полным или частичным сохранением боридного слоя. Выбором оптимального режима лазерной обработки можно сохранить высокую микротвердость в боридном слое и в тоже время создать под слоем боридов достаточно твердую основу, полученную из жидкой ванны лазерного расплава. Сохранение боридных слоев толщиной менее 50 мкм после лазерной обработки не представляется возможным.

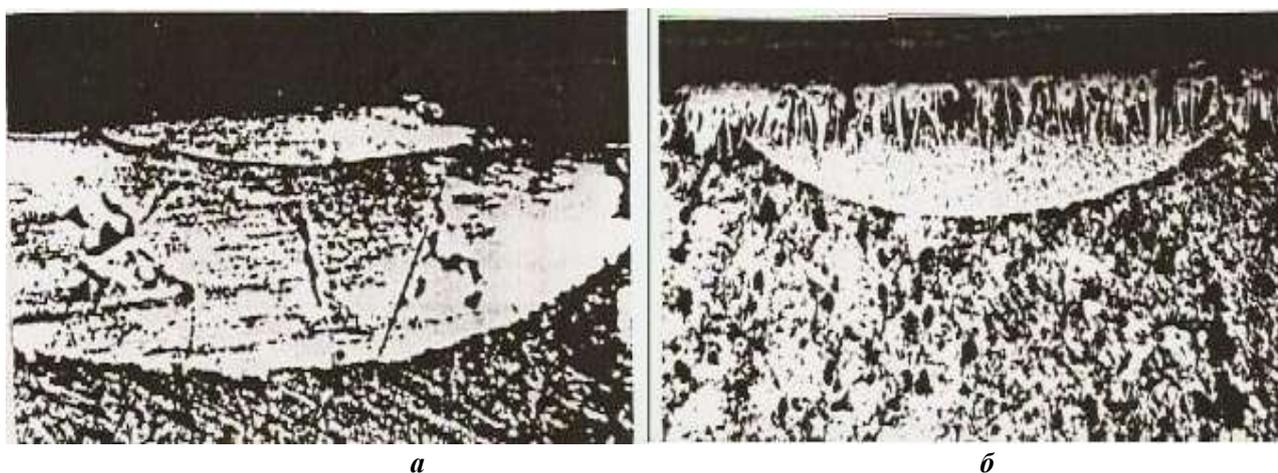


Рис. 4. Фотографии с микрошлифов, полученных после диффузного борирования и лазерной обработки с оплавлением (а) и сохранением (б) боридного слоя

Дополнительную лазерную обработку деталей, подвергнутых диффузионному борированию, можно рекомендовать в том случае, когда детали машин и механизмов имеют зоны локального износа, и именно они определяют конечную эксплуатационную стойкость изделия. Лазерная обработка борированных поверхностей большой площади экономически нецелесообразна.

Практическая реализация рассмотренной технологии лазерной обработки боридных слоев, полученных диффузионными методами, была выполнена на штоках плунжерных насосов высокого давления. Лазерная обработка была проведена в местах наиболее интенсивного износа. Эксперимент был проведен на 20 штоках. Достигнуто увеличение эксплуатационной стойкости примерно в два раза.

#### Библиографический список

1. Химико-термическая обработка металлов и слоев / под ред. М.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Лахтин, Ю.М. Поверхностное насыщение стали бором при воздействии излучения лазера / Ю.М. Лахтин, Я.Л. Коган, А.Н. Бурякин // Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 11. С. 9–11 с.

- 
3. **Мишаков, Г.А.** О массопереносе бора в зону термического влияния под жидкой ванной лазерного расплава металла / Г.А. Мишаков, А.И. Родионов, Ю.Ф. Симахин // Физика и химия обработки материалов. 1991. №5. С. 100–103 с.

*Дата поступления  
в редакцию 21.05.2010*

**G.A. Mishakov, A.I. Rodionov**

### **LASER TREATMENT OF STRUCTURAL STEELS AFTER DIFFUSION BORONIZING**

The research has studied microhardness distribution by depth in samples from different structural steels that have been exposed to diffusion boronizing and the following laser treatment. Laser irradiation conditions allowing partially or fully to dissolve boride layers in a flux tank have been analyzed. The research has proved the possibility of absolute boride layer conservation with the formation of a quenching zone under it from a liquid flux tank.

*Key words:* Diffusion boronizing, laser treatment, quenching zone.

## ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

---

---

УДК 577.112.4

В.М. Востоков<sup>1</sup>, В.М. Смирнова<sup>1</sup>, Г.Л. Дегтяренко<sup>2</sup>

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НУКЛЕОТИДОВ В КОРМОВЫХ ДРОЖЖАХ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Волжский государственный инженерно-педагогический университет<sup>2</sup>

Определение массовой доли нуклеотидов в кормовых дрожжах, предусматривающее выделение всех простых и сложных белков из двух одинаковых навесок с последующей оценкой результатов по двум независимым методикам, и оценка массовой доли нуклеотидов путем сопоставления результатов параллельных измерений.

*Ключевые слова:* кормовые дрожжи, сырой протеин, истинный белок, нуклеотиды.

Проблемы обеспечения человечества доброкачественными продуктами питания в достаточном количестве остаются нерешенными, тем более что темпы развития земледелия и интенсификации природопользования намного отстают от темпов роста народонаселения планеты. Для того, чтобы ликвидировать природный дефицит растительного белка, витаминов, антибиотиков и многих других биологически активных веществ (БАВ), потребовалось разработать современные технологии микробиологического и биохимического синтеза указанных компонентов и построить соответствующие крупнотоннажные биотехнологические производства. Так, с целью решения проблемы природного дефицита растительного белка были созданы нанотехнологии промышленного микробиологического синтеза кормового белка из растительной клетчатки и парафинов нефти и газа, в которых происходит ускоренная ассимиляция азота, минуя продолжительную стадию его усвоения в естественных условиях.

Контролируемыми показателями уровня качества разнообразной биопродукции являются содержание в ней некоторых полезных и вредных биоконпонентов: аминокислот и протеинов; жиро- и водорастворимых витаминов; микроэлементов и тяжелых металлов; микотоксинов; диоксинов; антибиотиков, в том числе, "остаточных"; флавоноидов и т.д. Для указанных БАВ предложены или разработаны различные методы производственного контроля. Для определения содержания белка в кормовых дрожжах, комбикормах обычно используются методы определения содержания «сырого протеина» по Кьельдалю и «истинного белка» по Барнштейну. Однако данные методы не удовлетворяют современным требованиям рутинного контроля биопроизводства как в отношении их достоверности и селективности, так и в отношении контроля экологической чистоты и безопасности выпускаемой биопродукции. Согласно ГОСТ 51417-99 [1] массовая доля белка определяется по общему содержанию азота в анализируемой пробе, что может приводить к погрешностям измерений, так как в пробе могут содержаться азотистые соединения небелкового характера (рис. 1). Вследствие этого возникают систематические погрешности аналитических измерений, и происходит завышение результатов содержания в анализируемой пробе белка. Таким образом, данный

контролируемый показатель качества кормовых дрожжей – массовая доля «сырого протеина» - не является достоверным показателем содержания белка.

Использование метода Кьельдаля для определения белка позволяет фальсифицировать белковую продукцию путем добавления к кормовым дрожжам азотистых соединений небелкового характера (мочевина, аммонийные соли). С целью выявления фальсификации белка был предложен метод определения «истинного белка» по Барнштейну.

Метод Барнштейна не отличается концептуально от метода Кьельдаля, так как содержание белка вычисляется по азоту. Однако на стадии пробоподготовки согласно ГОСТ 28178-89 в методе Барнштейна происходит отделение белка от мешающих азотистых соединений небелкового характера [2].

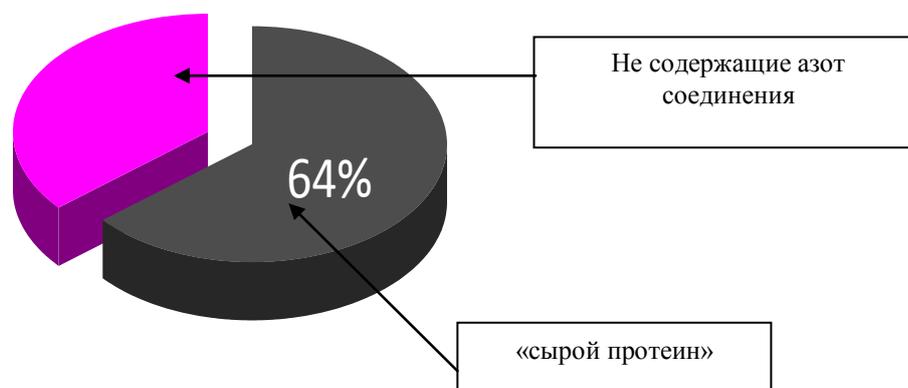


Рис. 1. «Сырой протеин» по Кьельдалю

Белок, определяемый по методу Барнштейна, включает протеиновую и нуклеотидную части. Среди определяемых данным способом компонентов одни белки являются полезными нутриентами, а другие могут нанести вред живому организму. Так, некоторые белковые ингредиенты кормовых дрожжей, в частности, генетически неадекватные живому организму нуклеотиды и нуклеиновые кислоты (РНК и ДНК) способствуют мутагенезу, вызывают аллергические заболевания. Они становятся опасными загрязнителями биосферы.

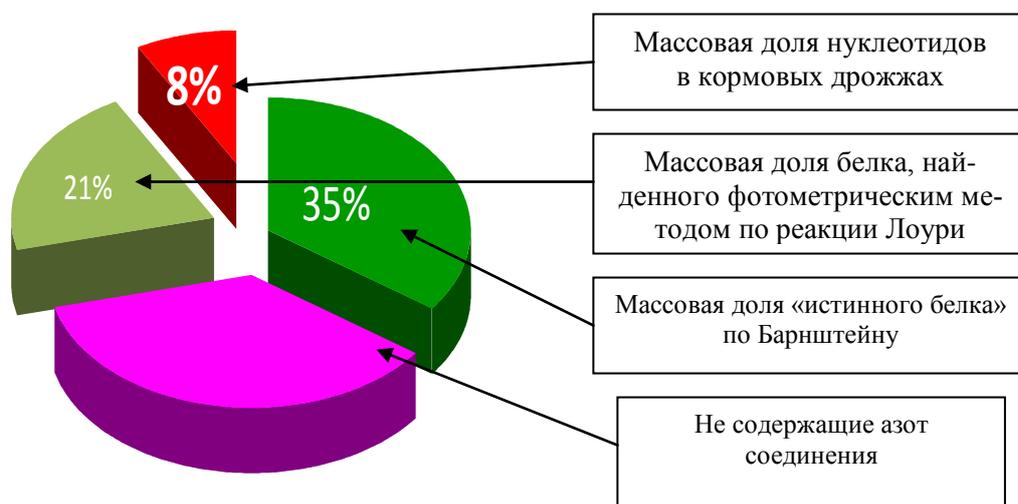
В связи с этим возникла необходимость в экоаналитическом контроле качества белковой биопродукции, где востребован достаточно простой и доступный способ априорной оценки массовой доли нуклеотидов в кормовых дрожжах микробиологического синтеза. Ныне действующие методы количественного определения белка в кормовых дрожжах (по Кьельдалю или по Барнштейну), как и ранее созданный нами, экспрессный и селективный метод фотометрического определения протеинов по реакции Лоури (Авт.св. SU 1401380 F1), оказались непригодными для количественной оценки массовой доли геномодифицированных нуклеотидов в кормовых дрожжах микробиологического производства [3]. Потребовался иной, достаточно простой и доступный способ производственного контроля экологической чистоты и безопасности указанной биопродукции.

Предложен способ количественной оценки содержания нуклеотидов в кормовых дрожжах, где сочетаются две известных и независимых методики определения массовой доли «истинного белка»: по Барнштейну и по Лоури, которые значительно отличаются друг от друга, прежде всего, по своей селективности. В связи с этим, «истинный белок», определенный методом Барнштейна, по общему содержанию азота, по составу существенно отличается от белка, найденного фотометрическим методом по специфической реакции Лоури.

В состав «истинного белка», определяемого неселективным методом Барнштейна, входят все белковые соединения, включая протеины и нуклеотиды. Тогда как в «истинном белке», определенном фотометрическим методом, нуклеотиды отсутствуют, так как они не дают характерного окрашивания, по реакции Лоури. Следовательно, по разности результа-

тов определения массовой доли “истинного белка” двумя указанными альтернативными методами можно оценить массовую долю нуклеотидов в кормовых дрожжах микробиологических производств (рис. 2).

Это становится особенно важным для экоаналитического контроля качества биопродукции, выпускаемой предприятиями микробиологического синтеза кормового белка из жидких парафинов нефти (производство паприна), где значительно возрастает риск выпуска недоброкачественной биопродукции, содержащей генномодифицированные нуклеиновые кислоты (РНК и ДНК). По указанной причине, вследствие надвигающейся угрозы возникновения экологической катастрофы, были остановлены крупнейшие заводы по производству паприна.



**Рис. 2. Массовые доли компонентов кормовых дрожжей, определяемые различными методами**

Для определения массовой доли нуклеотидов по разности результатов определения массовой доли “истинного белка” двумя указанными альтернативными методами требуется выполнять следующие операции:

- 1) выделение белка в раствор путем осаждения производится в одинаковых условиях;
- 2) две навески для анализа делаются одновременно;

3) пробоподготовка на первой стадии осуществляется идентично: берут две точных навески средней пробы кормовых дрожжей, массой каждая около 0,4 г; помещают их в стаканы вместимостью 200 см<sup>3</sup>, добавляют в каждый стакан 50 см<sup>3</sup> доведенной до кипения дистиллированной воды; 10 см<sup>3</sup> 12%-го раствора сульфата меди и, по каплям, при перемешивании, 10 см<sup>3</sup> 2,5%-го раствора гидроксида натрия. После отстаивания осадка его отделяют путем фильтрования через бумажный фильтр, одновременно промывая его методом декантации двумя порциями (по 20 см<sup>3</sup>) дистиллированной воды.

Далее для первой пробы выполняют все аналитические операции, необходимые для определения белка известным методом Кьельдаля по стандартной методике (ГОСТ 51417-99). В ней сначала осуществляют “мокрое сжигание” выделенной белковой массы (осадка) и производят отгонку аммиака в стандартный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Затем, методом обратного титрования полученных аммонийных солей определяют общую массу азота (*mN*) и вычисляют массовую долю белка (*mБ*), определяемую методом Барнштейна по формуле:

$$mБ = mN k 100 / a (1 - \omega/100). \quad (1)$$

где  $mN$  – масса азота в анализируемом образце, г;  $a$  – навеска образца, г;  $k$  – коэффициент пересчета на белок, устанавливаемый для каждого сорта кормовых дрожжей;  $\omega$  – массовая доля влаги в кормовых дрожжах, %.

Для второй пробы промытый осадок медно-белкового комплекса, выделенный на бумажном фильтре, возвращают в исходный стакан вместе с фильтром и добавляют туда при перемешивании 20 см<sup>3</sup> 0,25 М раствора комплексона III и 60 см<sup>3</sup> 1 М раствора едкого натра. Содержимое стакана нагревают в течении 30 мин на кипящей водяной бане, перемешивая раствор стеклянной палочкой. Раствор переносят в мерную колбу на 500 см<sup>3</sup>, оставляя фильтр в стакане, промывая его небольшими порциями горячей воды и сливая все промывные воды в мерную колбу с анализируемым раствором. После охлаждения до комнатной температуры раствор в колбе доводят до метки дистиллированной водой и перемешивают. Аликвоту, 100 см<sup>3</sup> полученного раствора, переносят в мерную колбу на 250 см<sup>3</sup>; раствор доводят до метки водой и перемешивают. С целью удаления взвешенных частиц около 20 см<sup>3</sup> раствора фильтруют в сухой стакан через фильтр, с синей лентой, отбрасывая первую порцию фильтрата. С помощью пипетки отбирают 5 см<sup>3</sup> чистого фильтрата, помещая его в мерную колбу на 25 см<sup>3</sup>. Добавляют туда 15 см<sup>3</sup> свежеприготовленной смеси растворов, содержащей гидроксид и карбонат натрия, калий-натрий виннокислый и сульфат меди. После 10 мин перемешивания в мерную колбу добавляют 1,5 см<sup>3</sup> свежеприготовленного раствора реактива Фолина; доводят раствор до метки водой, перемешивают и дают ему постоять около 30 мин. Методики приготовления указанных растворов приведены в описании изобретения “Способ количественного определения истинного белка в кормовых дрожжах” (Авт.св. № 1401380 от 8.02.88).

Полученный окрашенный раствор (синего цвета) фотометрируют в кювете на 1 см, при длине волны  $\lambda = 690$  нм. В качестве нулевого используют раствор “холостого опыта”, в котором отсутствует белок [4]. По величине оптической плотности исследуемого раствора, используя метод градуировочного графика, находят содержание белка в анализируемой пробе ( $\gamma$ , мкг) и вычисляют массовую долю “истинного белка” ( $mЛ$ ) по формуле

$$mЛ = \gamma \cdot 0,025 / a (1 - \omega/100), \quad (2)$$

где 0,025 – коэффициент, учитывающий разбавление и соотношение размерностей;  $a$  – масса навески дрожжей, г;  $\omega$  – массовая доля влаги в кормовых дрожжах, %.

Массовую долю нуклеотидов в кормовом белке ( $mМ$ ) оценивают по формуле

$$mМ = mБ - mЛ. \quad (3)$$

В качестве примера в табл. 1 приведены сравнительные результаты определения массовой доли белковых соединений в кормовых дрожжах, выпускаемых тремя ведущими предприятиями отрасли: Астраханским ГДЗ, Волжским ГДЗ и Кировским БХЗ. В сравнительных испытаниях использованы известные способы численной оценки массовой доли белка:

- неселективный метод Кьельдаля, предназначенный для оценки содержания “сырого протеина”, в котором белок определяют в пересчете на содержание азота в анализируемой пробе;
- более избирательный метод Барнштейна, используемый для численной оценки массовой доли “истинного белка”, который отличается от метода Кьельдаля лишь тем, что в нем, на стадии пробоподготовки, белок отделяют от небелковых соединений, содержащих азот и мешающих анализу;
- высокоселективный метод фотометрического определения “истинного белка” по фотометрической реакции Лоури, где в реакцию вступают лишь простые протеины.

Таблица 1

**Локальный мониторинг качества биопродукции микробиологических производств**

1. Оценка массовой доли белка в кормовых дрожжах микробиологического синтеза методами Кьельдаля, Барнштейна и методом фотометрического определения белка по реакции Лоури

Заводы по производству кормового белка (кормовых дрожжей)	Интервальное значение ( $n = 10$ ) массовой доли белка, определенное:		
	по Кьельдалю, %	по Барнштейну, %	фотометрическим методом, по Лоури
Астраханский ГДЗ	$54,18 \pm 0,64$	$52,54 \pm 0,92$	$48,94 \pm 0,57$
Волжский ГДЗ	$56,93 \pm 0,97$	$33,36 \pm 1,84$	$30,02 \pm 1,01$
Кировский БХЗ	$46,82 \pm 0,92$	$40,40 \pm 1,34$	$35,94 \pm 0,90$

2. Оценка содержания нуклеотидов из разности результатов определения истинного белка по Барнштейну и по Лоури

Заводы БВК	Средние значения массовой доли белка, %		Массовая доля нуклеотидов, %
	по Барнштейну	по Лоури	
Астраханский ГДЗ	52,54	48,94	3,60
Волжский ГДЗ	33,36	30,02	3,34
Кировский БХЗ	40,40	35,94	4,46

В табл. 2 приведены результаты контрольных испытаний модельных двухкомпонентных смесей простого и сложного белков, приготовленных из альбумина (0,145 г) и эталонного образца ДНК "SERVA", масса которого составляет около 13% от массы альбумина.

Таблица 2

**Оценка содержания нуклеотидов в модельных смесях, имитирующих белковый состав кормовых дрожжей микробиологического производства**

Модельная смесь белков, взято, г		Найдено белка, г, по способам		Найдено нуклеотидов, г по предлагаемому
Альбумин, г	ДНК "SERVA", г	фотометрическому	Барнштейна	
$0,146 \pm 0,001$	0	$0,146 \pm 0,003$	$0,146 \pm 0,003$	0
$0,146 \pm 0,001$	$0,020 \pm 0,001$	$0,145 \pm 0,003$	$0,162 \pm 0,003$	$0,017 \pm 0,003$

Масса белков в анализируемой смеси была определена двумя способами: методом Барнштейна и фотометрическим методом. Как и ожидалось, методом Барнштейна была определена суммарная масса обоих компонентов смеси, а по фотометрической реакции Лоури найдено лишь содержание простого протеина, что подтверждает возможность определения предлагаемым способом массовой доли нуклеиновых кислот или других нуклеотидов в кормовых дрожжах микробиологического производства.

По результатам сравнительных испытаний результатов определения массовых долей белковых соединений в кормовых дрожжах производств и модельных двухкомпонентных смесей можно сделать заключение:

1. Численное значение массовой доли "сырого протеина" в комовых дрожжах, установленное методом Кьельдаля, не дает достоверной информации о качестве выпускаемой биопродукции, так как высокое численное значение этой величины может быть связано не только с высоким содержанием протеинов, но также, с наличием азотосодержащих соединений небелкового характера.

2. Отличие результатов определений массовой доли белка методами Кьельдаля и Барнштейна свидетельствует о высокой "загрязненности" кормовых дрожжей небелковыми азотистыми соединениями.

3. Отличие результатов определений массовой доли “истинного белка” методами Барнштейна и по фотометрической реакции Лоури свидетельствует о том, что в “истинном белке” содержатся нуклеотиды.

4. Содержание нуклеотидов в белковой продукции, выпускаемой однотипными производствами, не одинаково, что можно объяснить генетической неоднородностью используемого в качестве питательной среды биосырья и штаммов, применяемых в данном биопроизводстве.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 51417-99. Комбикорма. Комбикормовое сырье. Методы определения сырого протеина. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 19 с.
2. ГОСТ 28178-89. Дрожжи кормовые. Методы испытаний. М.: Изд. стандартов, 1989. 50 с.
3. Худякова Т.А., Востоков В.М., Арбатский А.П., Мешкова Л.А., Петрова В.П., Рыбакова Л.Г. / А.с. СССР SU 1401380 A1 G 01 N 33/48 Способ количественного определения истинного белка в кормовых дрожжах, / № 4040783/31-13. Заяв. 20.03.86. Бюл. № 21 от 07.06.88.
4. **Востоков, В.М.** Аналитический контроль содержания протеинов в продукции предприятий микробиологического синтеза кормового белка / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин, В.Р. Карташев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 79. № 3. С. 11–24.

*Дата поступления  
в редакцию 05.10.2010*

**V.M. Vostokov, B.M. Smirnova, G.L. Degtjarenko**

#### **DEFINITION NUCLEIC ACIDS IN FODDER YEAST OF MICROBIOLOGICAL MANUFACTURE**

Mass fraction definition nucleic acids in the fodder yeast, providing allocation of all simple and difficult fibers from two identical part with the subsequent estimation of results by two independent techniques, and a mass fraction estimation nucleic acids by comparison of results of parallel measurements.

*Key words:* fodder yeast, crude protein, true fiber, nucleic acids.

УДК 574.495

А.С. Родионов, А.А. Сидягин

## РАСЧЕТ ГАЗОЖИДКОСТНОГО РАВНОВЕСИЯ НА СТАДИИ ДИСТИЛЛЯЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КАРБАМИДА

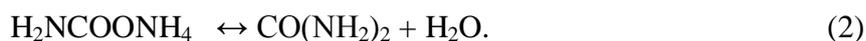
Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

В статье приводится методика расчета параметров равновесного состояния между жидкой и газовой (паровой) фазами на стадии дистилляции низкого давления в производстве карбамида по технологии полного жидкостного рецикла. Предложен краткий обзор существующих аналогичных методик. Сделаны и обоснованы допущения, позволяющие рассмотреть данную систему с упрощенных позиций, позволяющих подойти к расчету газожидкостного равновесия как для простых смесей, поскольку в расчёт вводятся концентрации химически не связанных компонентов. Процесс дистилляции рассматривается как обычная ректификация, что существенно упрощает расчеты.

*Ключевые слова:* производство карбамида, дистилляция, фазовое равновесие, фугитивность, расчет.

Среди производимых азотных удобрений карбамид (мочевина) занимает одно из лидирующих положений. Сегодня в мире он производится в количестве порядка 100 млн т в год. Его широкое применение в сельском хозяйстве обусловлено тем, что карбамид удобен в транспортировке и обладает самым высоким среди азотных удобрений удельным содержанием азота. Также карбамид применяется как пищевая добавка и химическое сырьё в производствах пластмасс, взрывчатых веществ, клея и смол.

Для промышленного производства карбамида во всем мире используют реакцию А.И. Базарова [1] которая в упрощенном виде состоит из двух стадий: образования из аммиака и углекислого газа карбамата аммония и разложения карбамата аммония на карбамид и воду:



В реакторе синтеза карбамида происходит преобразование исходных компонентов: углекислого газа на 60–65 %, аммиака на 40–45%.

Плав, выходящий из узла синтеза, содержит карбамид, как целевой продукт, карбамат аммония, избыток аммиака и углекислого газа, а также воду, образовавшуюся при разложении карбамата аммония по реакции (2). С целью более полного использования сырья необходимо разложить карбамат аммония, находящийся в плаве, а газы ( $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ ) выделить и вернуть в реактор синтеза, для этого плав поступает на стадию дистилляции.

Особенностью производства является многостадийность, причем процессы на разных стадиях протекают в различных режимных условиях, в первую очередь, при существенно различных давлениях. Если для стадий высокого давления, особенно для условий синтеза карбамида, методы расчета газо(паро)-жидкостного равновесия разработаны достаточно хорошо [2–4], то для стадий низкого давления методы практически отсутствуют. Оптимизация стадии дистилляции низкого давления, проектирование и модернизация оборудования производятся преимущественно на основании опыта работы аналогичных установок, в основном, методом проб и ошибок, так как теоретические расчеты затруднены из-за отсутствия надежных методик вычисления газожидкостного равновесия в многокомпонентной системе. В лучшем случае при проведении оценочных расчетов рассматривается бинарная система аммиак – вода, равновесные характеристики которой значительно отличаются от существующих.

Известные методики расчета равновесия в данной системе [5–7] можно разделить на две большие группы. К первой относятся методики, учитывающие химические превращения в рассматриваемой системе, они подходят для стадий производства, где преобладают хими-

ческие процессы: синтез, стриппинг-процесс или первая ступень дистилляции схемы с полным жидкостным рециклом. Ко второй – методики, созданные для инженерных расчётов путём простой аппроксимации экспериментальных данных.

При низком и среднем давлениях смеси обычно представляют собой концентрированные растворы карбамида и аммиака в воде. Диоксид углерода содержится в таких системах преимущественно в связанном с аммиаком виде, образуя карбамид и карбамат аммония. Значительное число работ существует для водных кислых систем без растворенного карбамида [8, 9].

Одной из первых методик, в которой рассмотрено взаимодействие аммиак – карбамид и диоксид углерода – карбамид, является методика С.Вичара [10], который предположил, что в определяемые аналитически концентрации жидкой фазы входят вещества в свободной и связанной форме. Для расчёта равновесия в системе он предложил вычислять концентрации компонентов, находящихся в свободной форме. Анализируя преобразование ионов в жидкой фазе, С. Вичар оценил количества  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$  в жидкости и, применив закон Генри, нашел соответствующие концентрации данных компонентов в газе.

Анализируя данный метод, отметим, что он преимущественно учитывает химические превращения и упрощенно трактует термодинамические процессы, влияющие на равновесие. В работе С. Вичара приведены экспериментальные данные по составу смеси, приходящей на стадию дистилляции в диапазоне давлений 2–25 атм. При ближайшем рассмотрении данных, положенных в основу работы, выясняется, что они представляют собой, по сути, зависимость давления паров аммиака над смесью от концентрации компонентов в смеси, температуры и давления. Концентрации же остальных компонентов паровой фазы являются пренебрежимо малыми и имеют точность в одну значащую цифру, которой нередко является единица. Поэтому расчёты, произведённые в работе, являются чисто эмпирическими.

Большая часть оценок постоянных фазового равновесия  $K$  основывается на соотношениях

$$K = \frac{f_i^L / (x_i p_i^0)}{f_i^V / (y_i P)}, \quad K = \frac{\alpha_i f_i^0 / (x_i p_i^0)}{f_i^V / (y_i P)}, \quad (3)$$

где  $f_i^L$  – фугитивность  $i$ -го компонента в жидкости;  $f_i^V$  – фугитивность (летучесть)  $i$ -го компонента в паре (газе);  $f_i^0$  – стандартная фугитивность  $i$ -го компонента при температуре системы;  $x_i$  – концентрация  $i$ -го компонента в жидкости;  $y_i$  – концентрация  $i$ -го компонента в паре (газе);  $P$  – полное давление в системе;  $p_i^0$  – давление чистого  $i$ -го компонента в паровой фазе;  $\alpha_i$  – активность  $i$ -го компонента.

Фугитивность – искусственно введенное понятие как мера химического потенциала для неидеальных веществ, используемая как удобный инструмент в термодинамических расчетах. Для каждого  $i$ -го компонента смеси условие термодинамического равновесия записывается как

$$f_i^V = f_i^L, \quad (4)$$

то есть при равновесии фугитивности для каждого компонента в обеих фазах должны быть одинаковыми.

Вообще полярные и неидеальные химические системы традиционно рассчитываются с помощью комплексных моделей. В них для расчета коэффициентов фугитивности паров используются уравнения состояния, а для жидкой фазы применяется одна из моделей коэффициентов активности. Модели активности по своей природе являются гораздо более эмпирическими, чем уравнения состояния, и они, как правило, не могут быть использованы для обобщенного применения или экстраполяции на рабочие условия с высокой надежностью. Это, например, модели Ван-Лаара, Маргулиса, Вильсона, NRTL (Non-Random-Two-Liquid), UNIQUAC (UNIversal QUAsi Chemical) [11].

Относительно новые модели (Вильсона, NRTL, UNIQUAC) вполне надежны, но достаточно сложны и используют дополнительные настраиваемые параметры, выявление кото-

рых представляет определенную сложность. Когда количество данных по смеси ограничено, это приводит к необходимости рассчитывать коэффициенты активности с помощью какой-либо подходящей корреляции, которых на сегодняшний день разработано немного, да и те являются чисто эмпирическими.

Заметим, что рассматриваемая нами стадия производства карбамида имеет место, когда большинство химических превращений в системе уже завершено и может протекать только реакция разложения карбамата аммония с образованием аммиака и диоксида углерода. Анализ опытных данных показывает, что эта реакция преимущественно протекает в кипятильнике, а не в самой колонне дистилляции, причем диоксид углерода вследствие крайне низкой растворимости в воде [12] практически полностью переходит в парогазовую фазу. Выделившийся в кипятильнике диоксид углерода поднимается в колонне дистилляции снизу вверх в качестве инерта, а содержание несвязанного  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе пренебрежимо мало, в связи с чем его присутствие фактически не оказывает влияния на равновесное состояние системы. Водный раствор карбамида при этом можно рассматривать как идеальную систему [13]. В связи с изложенным отметим, что собственно для процесса дистилляции, протекающего в колонне, большую роль на равновесие оказывает термодинамическое состояние системы.

В этом случае, как и во многих задачах, связанных с равновесием пар – жидкость, можно в принципе обойтись и без использования понятия активности (коэффициента активности), если использовать достаточно надежное уравнение состояния, которое позволяет осуществить оценку равновесных значений термодинамических величин.

Для расчета равновесия в системе газ (пар) – жидкость разработано достаточно много уравнений состояния, начиная с классического уравнения Ван дер Ваальса. Из наиболее широко применяемых на сегодняшний день уравнений состояния можно назвать уравнение Редлиха – Квонга, модифицированное Соувом [14, 15], уравнение Пенга – Робинсона [16] и уравнение Бенедикта – Вебба – Рубина, модифицированное Старлингом [17]. У каждого уравнения состояния есть свои преимущества и недостатки. Первые два уравнения являются двухпараметрическими, постоянные которых могут быть определены на основе эмпирических данных для каждого компонента смеси. Последнее имеет одиннадцать постоянных, которые приходится определять для каждого из компонентов. Это требует гораздо большего объема данных и существенно усложняет расчеты.

Для сложных систем опасность применения уравнений состояния заключается в том, что результаты расчетов являются надежными только для того диапазона температур и давлений, при которых были рассчитаны эмпирические константы, входящие в состав этих уравнений. Для расчетов вне этого диапазона необходимо экстраполировать данные, что может привести к серьезным ошибкам, особенно если уравнения состояния сложны и содержат много параметров. В связи с данным замечанием отметим, что для решения поставленной задачи разумно использовать достаточно простое уравнение состояния, но ограничить его применение условиями рассматриваемого процесса дистилляции.

В качестве основы для расчета газо(паро)-жидкостного равновесия в рассматриваемых условиях принимаем уравнение состояния Пенга – Робинсона. Это уравнение успешно используется для описания состояния равновесия углеводородных систем, однако опыт его применения показывает, что оно позволяет описывать большой круг систем в широком интервале условий.

Связь фугитивности с температурой и давлением в системе выражается формулой

$$\ln \frac{f}{p} = \int_0^P \left( \frac{v}{RT} - \frac{1}{P} \right) dP, \quad (5)$$

где  $v$  – мольный объём,  $\text{м}^3/\text{моль}$ ;  $T$  – температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R=8314$ , Дж/(кмоль·К).

Фугитивность конкретного  $k$ -го компонента в смеси на основе уравнения состояния Пенга – Робинсона определяется по формуле

$$\ln \frac{f_k}{x_k P} = \frac{b_k}{b} (Z - 1) - \ln(Z - B) - \frac{A}{2\sqrt{2}B} \left( \frac{2 \sum_i x_i a_{ik}}{a} - \frac{b_k}{b} \right) \ln \left( \frac{Z + 2,414B}{Z - 0,414B} \right), \quad (6)$$

где  $k, i$  – номера компонентов,  $x_i$  – концентрация компонента в жидкости,  $Z$  – фактор сжимаемости газа ( $Z = P_0 / RT$ );  $A, B$  – константы уравнения ( $A = aP / (R^2 T^2)$ ,  $B = bP / (RT)$ );  $a, b$  – обобщенные параметры ( $a = \sum_i \sum_j x_i x_j a_i^{0,5} a_j^{0,5} (1 - \delta_{ij})$ ;  $b = \sum_i x_i b_i$ ).

Константы уравнения (6) и фактор сжимаемости связаны соотношением

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0. \quad (7)$$

Обобщенные параметры  $a$  и  $b$ , входящие в уравнение (6), для определения фугитивности рассчитываются на основе бинарных коэффициентов попарного взаимодействия компонентов  $\delta_{ij}$ , отражающих неидеальность раствора и подлежащих определению из экспериментальных данных; параметров  $a_i$  и  $b_i$  для конкретных веществ при конкретной температуре, которые могут быть рассчитаны по значениям критического давления  $P_{кр*i*}$ , критической температуры  $T_{кр*i*}$  для каждого  $i$ -го компонента, масштабного коэффициента, зависящего от редуцированной температуры  $T_{ред}$  и фактора ацентричности молекулы вещества  $\omega$ .

Для компонентов  $H_2O$ ,  $NH_3$  применимость данного подхода вполне возможна, однако задачу осложняет присутствие карбамида и карбамата аммония. Как отмечалось, при малом давлении, соответствующем условиям дистилляции второй ступени, карбамид в растворенном состоянии относится к жидкой фазе и образует с водой идеальную смесь, частично растворяющую аммиак. Для того чтобы расчёт стал возможен, вводим допущение, что карбамид, не обладающий в природе критическим состоянием, в растворенном виде подчиняется термодинамическим закономерностям, характерным для веществ, имеющих критическое состояние. Для определения псевдокритических параметров карбамида параллельно использовались методы Мейснера и Риделя [18], которые дали сопоставимые результаты. Согласно расчётам псевдокритические параметры для карбамида составили  $T_{кр} = 540^\circ K$ ;  $P_{кр} = 74,6$  ат. Затем были определены ацентрические факторы [19] для всех компонентов системы.

Достаточно большую трудоемкость составило определение бинарных коэффициентов взаимодействия компонентов. Для этого использовался массив экспериментальных данных по равновесию систем аммиак – вода, карбамид – аммиак, карбамид – вода, приведенный в [1]. Массив данных анализировался и приводился к условиям рассматриваемой задачи, после чего обрабатывался для получения искомого результата.

Например, данные по равновесию в системе аммиак – вода проиллюстрированы на рис. 1. На графике имеются две ярко выраженные области. Первая область, в пределах которой кривая концентраций близка к прямой линии, может быть ограничена концентрациями в газе 0...60%. Вторая область, при концентрациях в газе выше 60%, характеризуется нелинейным поведением равновесных кривых. Учитывая, что на рассматриваемой стадии производства концентрация аммиака составляет около 5%, нами при выполнении расчетов использованы данные только из первой области.

При обработке данных проводился поиск значения бинарного коэффициента  $\delta$  соответствующего наименьшему значению качественного параметра  $\sigma$ :

$$\sigma = \sum (f_i^V - f_i^L)^2. \quad (8)$$

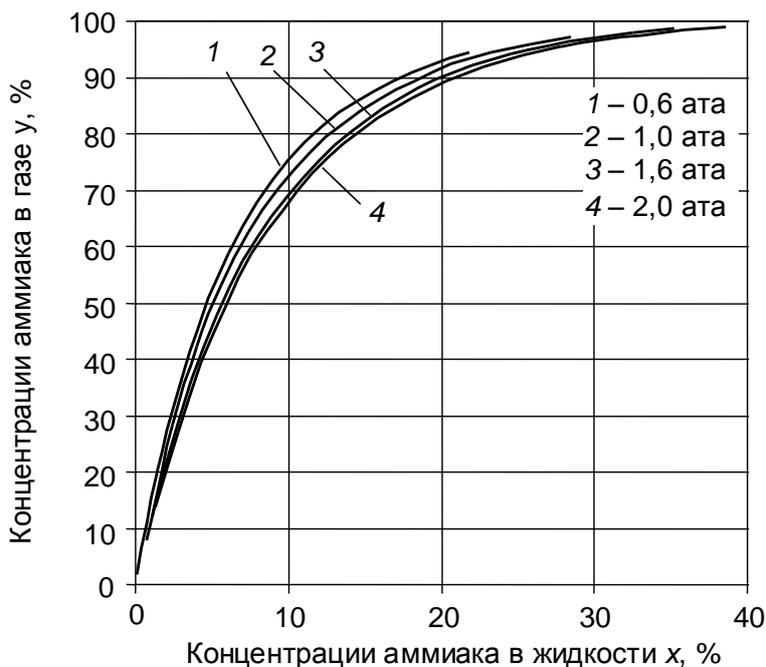


Рис. 1. Равновесие в системе аммиак – вода

При выполнении расчётов возникла необходимость поиска корней уравнения третьей степени, для чего выбран численный способ поиска корня. Для этого составлена специальная программа, с помощью которой происходит сканирование исследуемой функции в заданном интервале с уменьшающимся шагом до момента обнаружения трёх знакопеременных интервалов. Затем, для уточнения корня, процедура повторялась с уменьшающимся шагом. Точность вычисления корня составила  $\pm 0,00001$ . В результате расчётов получено значение  $\delta = -0,25$ . По полученным данным по уравнению (6) получены значения фугитивности аммиака в жидкой и газовой фазах для бинарной системы аммиак – вода. Из графика (рис. 2) видно, что при найденном значении  $\delta$  достаточно четко выполняется условие термодинамического равновесия  $f_i^V = f_i^L$ .

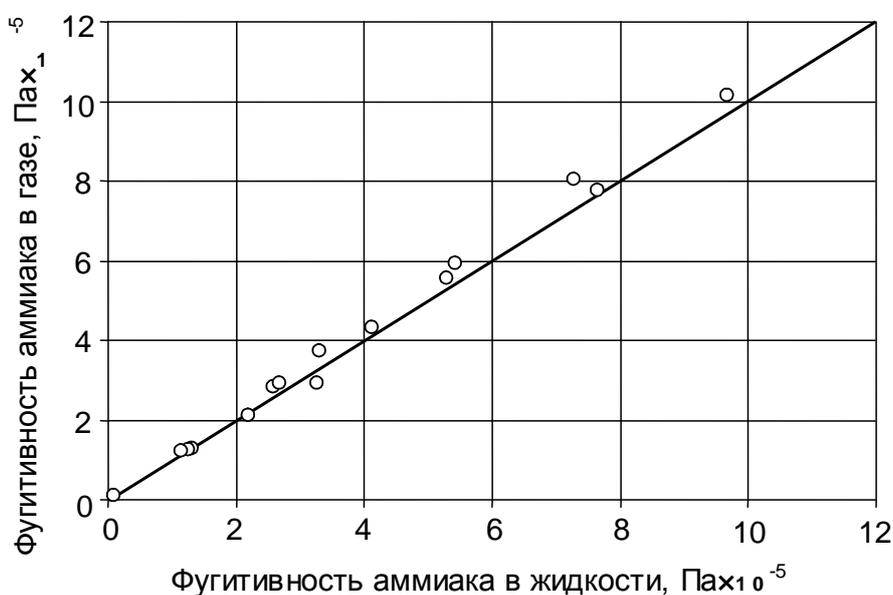


Рис. 2. Рассчитанные значения фугитивности аммиака в жидкости и газе для бинарной системы аммиак - вода

Для выполнения расчётов необходимо знание коэффициента парного взаимодействия  $\delta$  для системы аммиак – диоксид углерода. Анализ диаграммы тройной системы  $\text{CO}_2\text{--NH}_3\text{--H}_2\text{O}$  с нанесёнными изобарами давления насыщенных паров [20] показал, что растворимость диоксида углерода в аммиаке пренебрежимо мала. Вследствие этого, коэффициент  $\delta$  для данной пары был принят равным нулю.

Аналогично, параметр  $\delta$  для системы диоксид углерода – вода из-за низкой растворимости  $\text{CO}_2$  при данных условиях [12], принят равным нулю. Данные допущения не внесут в расчёт значительной погрешности.

Для определения бинарных параметров равновесия системы аммиак – карбамид использованы экспериментальные данные по растворимости карбамида в жидком аммиаке [1, с. 248] и давлению паров аммиака над насыщенными растворами карбамида в жидком аммиаке [1, с. 252]. Последние аппроксимированы выражением

$$p_{\text{ам}} = 0,0112 t + 0,443, \quad (9)$$

где  $p_{\text{ам}}$  – давление паров аммиака над раствором, МПа;  $t$  – температура, °С.

Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,988$ . Затем данные по растворимости пересчитаны в виде функции давления аммиака от концентрации карбамида в растворе (табл. 1), которая послужила отправной точкой для расчета газожидкостного равновесия бинарной системы карбамид – аммиак. При этом введено допущение, что карбамид в газовой фазе отсутствует.

Таблица 1

Параметры газожидкостного равновесия карбамид – аммиак

Температура, °С	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70
Концентрация карбамид, % масс	23,1	28,2	34,3	41,3	49,2	58,0	67,7	75,9	78,7	81,7
Давление аммиака, МПа	0,219	0,331	0,443	0,555	0,667	0,779	0,891	1,003	1,115	1,227

Определение параметра бинарного взаимодействия производилось аналогично рассмотренному для системы аммиак – вода. В результате расчёта получено пренебрежимо малое значение  $\delta = -0,01$ . Для проверки найденных значений производился обратный расчёт концентрации аммиака в жидкости по давлению аммиака над раствором. Вычисленная обратным расчётом концентрация сопоставлена с табличными данными [1] с удовлетворительным результатом.

Определение коэффициента бинарного взаимодействия пары карбамид – вода проводилось на базе экспериментальных данных растворимости карбамида в воде [1, с. 248], температуры кипения водных растворов карбамида и содержания карбамида в парах над его водными растворами [1, с. 250]. Пересчет табличных данных позволил проанализировать поведение системы при равновесии. На рис. 3 показана диаграмма равновесия системы при давлениях, близких к атмосферному.

Для корректировки данных при более высоких давлениях, а также для расчета коэффициента бинарного взаимодействия карбамат аммония – аммиак использованы экспериментальные данные по составу системы аммиак – диоксид углерода – вода – карбамид, приведенные в работе [10]. Эти данные были пересчитаны нами с учетом следующих предположений:

- взаимная растворимость аммиака и диоксида углерода пренебрежимо мала;
- диоксид углерода при рассматриваемых условиях практически не растворяется в воде.

На основании этого примем, что весь экспериментально определяемый в жидкости диоксид углерода связан в форме карбамата аммония. Так как анион карбамата аммония химически связывает две молекулы аммиака и одну молекулу диоксида углерода, то

концентрация свободного аммиака в жидкости определяется вычитанием из количества экспериментально определенного аммиака удвоенной концентрации диоксида углерода. Кроме того, отметим, что карбамид и карбамат аммония при рассматриваемых условиях практически не присутствуют в паровой фазе, поэтому упругость их паров принята равной нулю, однако результаты расчета фазового равновесия будут меняться в зависимости от наличия карбамида, что учитывается ненулевым значением параметров бинарного взаимодействия карбамид – аммиак, карбамид – вода, карбамат аммония – аммиак.

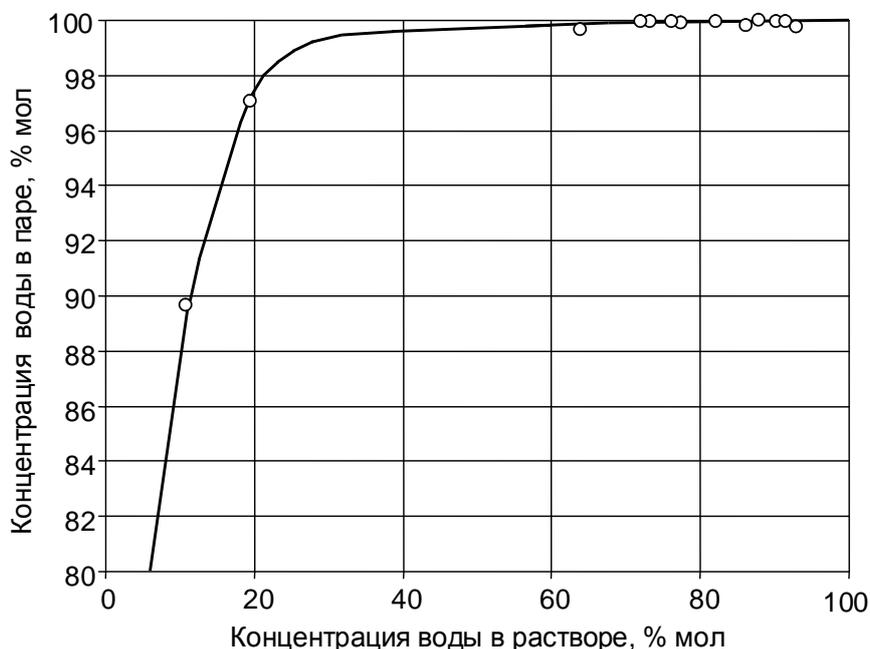


Рис. 3. Диаграмма равновесия системы карбамид – вода

Результаты пересчета приведены в табл. 2. Концентрации веществ нормированы на единицу.

Таблица 2

Результаты пересчета экспериментальных [10] концентраций веществ

Температура, °С	Давление (абс), атм	Содержание веществ в жидкости, (% мольн.)*		
		аммиак	вода	карбамат аммония
60	7,8	0,4475	0,3557	0,0536
60	4,0	0,3082	0,4508	0,0591
60	3,3	0,3032	0,4050	0,1283
60	7,0	0,3674	0,3626	0,1249
60	2,0	0,1437	0,5151	0,1337
60	8,5	0,4400	0,2508	0,0567

\* – остальное карбамид

По данным рис. 3 и табл. 2 производился расчёт параметров бинарного взаимодействия карбамид – вода и карбамат аммония – аммиак, которые составили 0,1 и – 0,09 соответственно.

Определённые коэффициенты бинарного взаимодействия использовались для обратного расчёта равновесных концентраций, которые сопоставлялись с экспериментальными данными [1, 10]. Заметим, что для сопоставления использовались только значения, соответствующие условиям близким к условиям, дистилляции второй ступени. Результаты сравнения показали неплохую сходимость.

Таким образом, задача расчетов составов фаз заключается в том, чтобы с учетом найденных ранее бинарных коэффициентов произвести расчет фугитивностей в фазах по уравнению (6) и выразить концентрации компонентов смеси через фугитивности компонентов по соотношению (3). Разумеется, эта задача требует итерационных расчетов и реализуется с помощью вычислительной техники.

В результате сопоставления экспериментальных и расчетных данных установлено, что они вполне удовлетворительно согласуются. Это позволяет сделать вывод о достоверности предложенной методики и её пригодности для выполнения расчетов.

### Библиографический список

1. Справочник азотчика. Производство разбавленной и концентрированной азотной кислоты: Производство азотных удобрений: Материалы, компрессоры и газгольдеры производств азотной кислоты и удобрений: Энергоснабжение производств связанного азота и органических продуктов: Техника безопасности производств связанного азота и органических продуктов / 2-е изд. перераб., под общ. ред. Е.Я.Мельникова. М.: Химия, 1987. – 464 с.
2. **Piotrowski, J.** Thermodynamic model of chemical and phase equilibrium in the urea synthesis process / J. Piotrowski, R. Kozak, M. Kujawska // *Chemical Engineering Science*. 1998. V. 53. N 1. Pp. 183–186.
3. **Lemkowitz, S. M.** An empirical thermodynamic model for the ammonia-water-carbon dioxide system at urea synthesis conditions / S. M. Lemkowitz, M. De Cooker, P.J. Van Den Berg // *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology* 2007. V.23. N 1. Pp.63–76.
4. **Lemkowitz, S.M.** Phase equilibria in ammonia - carbon dioxide systems at and above urea synthesis conditions / S.M. Lemkowitz, J.C. Van Erp, D.M. Rekers, P.J. Van Den Berg // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 1980. V. 30. N 1. Pp. 85–101.
5. **Горловский, Д.М.** Технология карбамида / Д.М. Горловский, Л.Н. Альтшулер, В.И. Кучерявый. – Л.: Химия, 1981. – 320 с.
6. **Кучерявый, В.И.** Синтез и применение карбамида / В.И. Кучерявый, В.В. Лебедев. – М.: Химия, 1970. – 448 с.
7. **Кучерявый, В.И.** Расчет равновесного распределения  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  между жидкостью и паром и давления в системах  $\text{NH}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{CO}_2 - \text{CO}(\text{NH}_2)_2 - \text{H}_2\text{O}$  / В.И. Кучерявый, Г.Н. Зиновьев // *Химическая промышленность*. 1969. № 5. С. 354.
8. **Pawlikowski, E.M.** Phase Equilibria for Aqueous Solutions of Ammonia and Carbon Dioxide / E.M. Pawlikowski, J. Newman, J.M. Prausnitz // *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1982. V. 21. №4. Pp. 764-770.
9. **Kawazuizhi, K.** Correlation of Vapor-Liquid Equilibrium for the System Ammonia-Carbon Dioxide-Water / K. Kawazuizhi, J.M. Prausnitz // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1987. V.26. №7. Pp. 1482–1485.
10. **Wicar, S.** Calculation of Vapour-Liquid Equilibrium in the System Urea-Ammonia-Carbon Dioxide and Water // *Brit. Chem. Eng.*, 1963. V. 8. №12. Pp. 818–822.
11. **Рид, Р.** Свойства газов и жидкостей: справочное пособие: пер. с англ. / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд; под ред. Б.И.Соколова. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
12. **Пасманик, М.И.** Производство хлора и каустической соды: справочник / М.И. Пасманик, Б.А. Сасс-Тисовский, Л.М. Якименко. – М.: Химия, 1966. – 312 с.
13. **Дыбина, П.В.** Расчеты по технологии неорганических веществ / П.В. Дыбина, А.С. Соловьева, Ю.И. Вишняк; под ред. П.В. Дыбиной. – М.: Высш. школа, 1967. – 523 с.
14. **Redlich, O.** The Thermodynamics of Solutions V: An Equation of State / O. Redlich, Kwong J.N.S. // *Chem. Reviews.*, 1949. V. 44. Pp. 233–244.
15. **Soave, G.** Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State // *Chem. Eng. Sci.* 1972. V. 27. N 6. Pp. 1197–1203.
16. **Peng, D.Y.** A New Two-Constant Equation of State / D.Y. Peng, D.B. Robinson // *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 1976. V. 15. N1. Pp. 59–64.
17. **Starling, K.E.** Thermodata Refined for LPG Industrial Applications / K.E. Starling, M.S. Han // *Hydrocarbon Proc.* 1972. V. 51. Pp. 107–115.

18. **Бретшнайдер, С.** Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета: пер. с польск.; под ред. П.Г. Романкова. – М.-Л.: Химия, 1970. – 535 с.
19. **Pitzer, K.S.** The Volumetric and Thermodynamic Properties of Fluids. II. Compressibility Factor, Vapor Pressure and Entropy of Vaporization / K.S. Pitzer, D.Z. Lippmann, Carl R.F. Jr., C.M. Hug-gins, D.E. Peterson // J.Am.Chem.Soc. 1955. V. 77. N 13. Pp. 3433–3440.
20. Frejacques, M. Les bases theoriques de la synthese industrielle de l'ure // Chim. & Ind. (Paris). 1948. V. 60. N 1. Pp. 22–27.

*Дата поступления  
в редакцию 02.02.2010*

**A.S. Rodionov, A.A. Sidiagin**

### **CALCULATION OF GAS-LIQUID EQUILIBRIA AT THE DISTILLATION STAGE IN UREA PRODUCTION**

In this paper the technique of calculating characteristics of an equilibrium condition between liquid and gas (vapor) phases is presented. The technique is considered for a distillation stage of low pressure in urea production on the technology of a total liquid recycle. In the paper the brief review of existing similar techniques is resulted. The assumptions permitting to consider the given system from simplified positions are made and justified. These positions enable to approach the calculation of gas (vapor)-liquid equilibrium as for simple mixtures because concentrations of chemically unbound components are put into calculation. Thus, the process is considered from a thermodynamic point of view. The calculation is based on equation of state. The main idea is to look at the process as at usual distillation that will allow to essentially simplify calculations.

*Key words:* urea production, distillation, phase equilibrium, fugacity, calculation.

УДК 661.419

М.И. Никандров, И.С. Никандров

## ПОЛУЧЕНИЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Определены параметры тепло- и массопередачи при абсорбции хлористого водорода воды. Дана технологическая схема получения соляной кислоты из печных газов установки обезвреживания отходов.

*Ключевые слова:* хлористый водород, абсорбция, соляная кислота массопередача, технология.

Отходящие газы, содержащие хлористый водород, являются важным источником сырья для производства соляной кислоты и солянокислотных солей.

Производство соляной кислоты из синтез-газа, получаемого из хлора сжиганием избытка водорода, является широко распространенным технологическим процессом. Высокая концентрация хлористого водорода в синтез-газе позволяет вести абсорбцию хлористого водорода водой с высокой эффективностью. Данный процесс проводят как в изотермических, так и в адиабатических условиях.

При огневом обезвреживании отходов и хлорсодержащих абгазов печные газы содержат только 20–35% об. хлористого водорода.

Это существенно затрудняет процесс абсорбции хлористого водорода. Вместе с тем печные газы содержат значительное количество водяных паров, доля которых при сжигании природного газа достигает 14–16% об.

Полученная зависимость общего давления ( $P_{\text{общ}}$ ) от температуры приведена на рис. 1, для кислоты, содержащей 29% масс (1) и 31,5% масс (2) HCl.

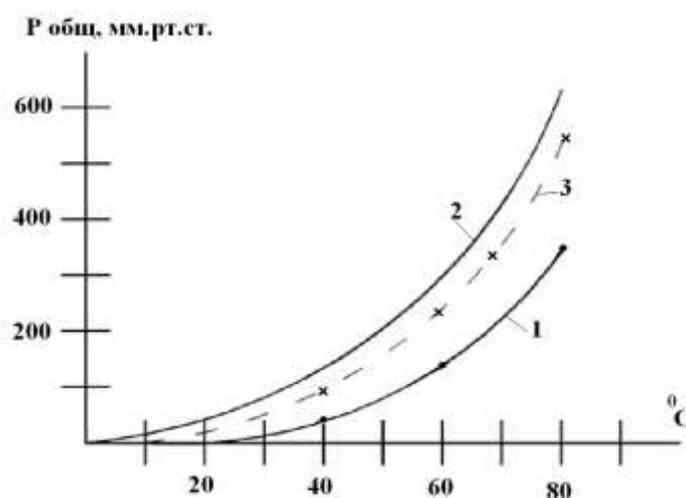


Рис. 1. Зависимость общего давления паров над соляной кислотой от температуры

Давление паров хлористого водорода над кислотой, с долей его в кислоте 31,5% масс, отображается линией 3. Как видно из рис. 2, соотношение давления паров  $P_{\text{HCl}}$  и  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  в газовой фазе равновесной с кислотой, содержащей 32% хлористого водорода в интервале температур 0–30°C уменьшается с 5,2 до 4,6 и далее с повышением температуры плавно возрастает вновь до 5,8 при температуре 80°C.

Для 32% масс кислоты минимум данного соотношения приходится на область температур 25–35 °С. Для кислот с долей хлористого водорода 30% масс минимум соотношением приходится на область температур ~ (- 10°С), а для кислоты с концентрацией более 32% масс температурная область минимума соотношения давления паров  $P_{\text{HCl}} / P_{\text{H}_2\text{O}}$  смещается в область более высоких температур (90 °С для 34% масс).

При поглощении хлористого водорода водой выделяется теплота абсорбции, равная 72,8 кДж/моль. Поэтому эффективность теплоотвода определяет весь технологический процесс. Для получения концентрированной (34–40% масс) соляной кислоты применяют изотермическую абсорбцию с отводом тепла от абсорбционного раствора. Для получения соляной кислоты из разбавленных печных газов обезвреживания отходов изотермическая абсорбция также предпочтительна. Изотермическую абсорбцию можно проводить в поверхностных абсорберах, в частности, в графитовых кожухоблочных абсорберах или в графитовых трубчатых пленочных абсорберах. В абсорберах с подающей жидкостной пленкой может использоваться как противоточное, так и прямоточное движение газа и жидкости.

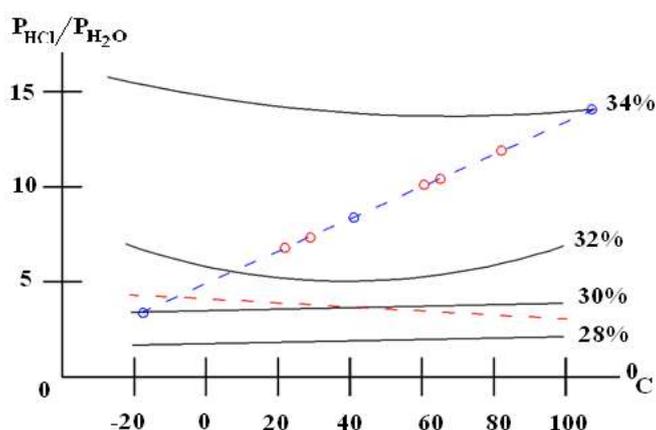


Рис. 2. Влияние температур на соотношение равновесных давлений хлористого водорода и воды над соляной кислотой соответствующих концентраций (28–34%)

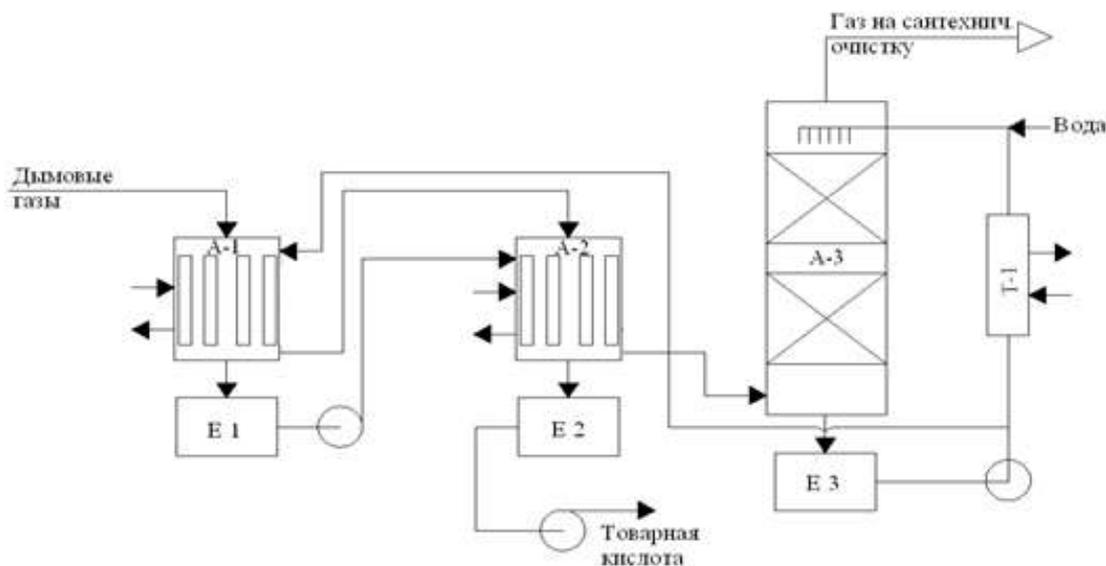


Рис. 3. Схема абсорбции хлористого водорода из печных газов

При температуре печного газа перед абсорбцией 90–95 °С температуру кислоты на выходе из первого абсорбера следует поддерживать близкой к температуре минимума отношения  $P_{\text{HCl}} / P_{\text{H}_2\text{O}}$  (рис. 2) равной ~ 40 °С при получении кислоты с 31,5% HCl.

Стадия абсорбции хлористого водорода из дымовых газов печи огневого обезвреживания организована по технологической схеме, представленной на рис. 3.

Дымовые газы с температурой 90 °С в количестве 1400–2200 м<sup>3</sup>/ч поступают в абсорбер А-1 прямотоком с кислотным раствором, стекающим по трубкам трубчатого аппарата. Температура кислоты на входе равна 22–26 °С, концентрация 11–14% масс. Абсорбер охлаждается оборотной водой с температурой 28 °С. Температура кислоты на выходе из абсорбера А-1 равна 45–50 °С и она с содержанием хлористого водорода 28–29 % масс подается на орошение абсорбера А-2. Газовый поток из абсорбера А-1 подается прямотоком с жидкостью в абсорбер А-2. Абсорбер А-2 также охлаждается оборотной водой с температурой 28 °С. Температура выходящей охлаждающей воды составляет 35 °С. Из абсорбера А-2 кислота с температурой 50 °С стекает в емкость Е-2 с содержанием в ней 31,5% масс хлористого водорода. Газ из абсорбера А-2 поступает в нижнюю часть насадочной колонны А-3. Насадочная колонна орошается циркулирующим раствором, содержащим 13–13,6% масс хлористого водорода, с температурой на выходе 11–12 °С.

Охлаждением раствора в холодильнике Т-1 ведется хладогентом с температурой 5 °С. Плотность орошения насадки составляет 13–17 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

В абсорберах А-1 и А-2 поглощается до 70% хлористого водорода, приходящего с печным газом. На выходе из насадочной колонны А-3 газ, уходящий на очистку в санитарную башню, орошаемую щелочным раствором, содержит ~ 003% об. хлористого водорода. Абсорберы А1 и А2 имеют по 620 контактных трубок с внутренним диаметром 22 мм и длиной 4000 мм. При этом число Рейнольдса газового потока равно 2600–4200, толщина жидкостной пленки в трубках 10–20 мкм. Суммарная поверхность трубок составляет 171 м<sup>2</sup>.

В абсорбере А-1 доля хлористого водорода в газе снижается с 26–33,5% об. 115–15% об. В результате абсорбции достигается средний коэффициент массопередачи  $K_y=0,000115$  кмоль/(м<sup>2</sup>·с). При условии разделения трубок на участки высотой по 1000 мм степень абсорбции от общедостигнутой в абсорбере А-1 величины составляет на участке 1–37%, на участке 2–26%, на участке 3–21% и на участке 4–16%. Значение коэффициента массопередачи меняется от  $K_y=0,000174$  кмоль/(м<sup>2</sup>с) до 0,000075 кмоль/(м<sup>2</sup>с) на четвертом участке. Значительное превышение коэффициента массопередачи на начальном участке объясняется протеканием здесь интенсивной конденсации водяных паров из газового потока и улавливанием хлористого водорода каплями конденсата. Необходимый отвод тепла абсорбции хлористого водорода в абсорбере А-1 обеспечивается поверхностью 70 м<sup>2</sup>. Абсорбция хлористого водорода в абсорбере А-2 проходит с меньшей эффективностью. Среднее значение коэффициента массопередачи составляет 0,000035 кмоль/(м<sup>2</sup>с) с незначительным колебанием по отдельным участкам (~на 10%).

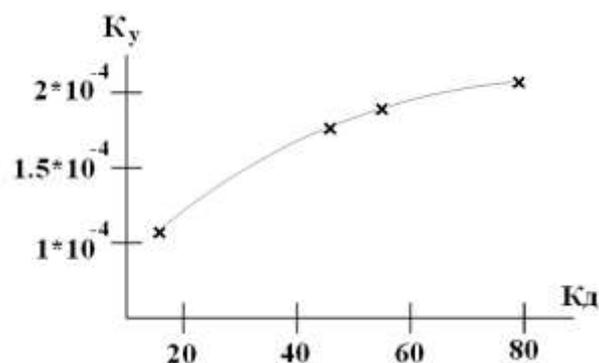


Рис. 4. Влияние плотности орошения ( $K_d$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч) трубчатого абсорбера на коэффициент массопередачи ( $K_y$ , кмоль/(м<sup>2</sup>с))

Насадка абсорбера А-3, разделенная на два слоя высотой по 5000 мм, имеет следующие характеристики: размер керамических колец 25x25, удельная поверхность 200 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>,

свободное сечение  $0,74 \text{ м}^2/\text{м}^2$ , эквивалентный диаметр  $0,015 \text{ м}$  кмоль/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  метр колонны  $1000 \text{ мм}$ , скорость газового потока  $0,46\text{--}0,58 \text{ м/с}$ , объемный расход газа  $0,36\text{--}0,45 \text{ м}^3/\text{с}$ , удельное сопротивление орошаемой насадки  $6300\text{--}9500 \text{ Па/м.э}$

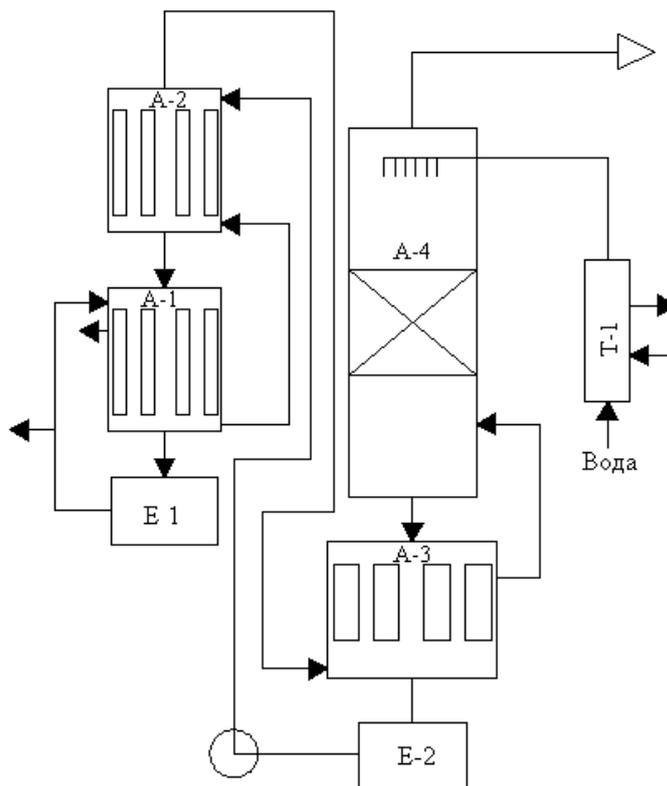
Как видно из рис. 4, коэффициент массопередачи с увеличением плотности орошения абсорбера в расчете на живое сечение трубок с увеличением плотности орошения с  $10,5$  до  $80 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  возрастает  $1,2 \cdot 10^{-4}$  до  $1,94 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Следовательно, увеличение количества орошения на абсорбер А-1 за счет рецикла части продукционной кислоты может повысить коэффициент массопередачи в абсорбер, а, следовательно, примерно в  $1,5$  раза уменьшить поверхность трубок в данном абсорбере.

Средний коэффициент массопередачи  $K_y = 0,0011 \text{ кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ; число Рейнольдса газового потока  $2200\text{--}2600$ .

Гидравлическое сопротивление колонны  $8000 \text{ Па}$ . Таким образом, рассмотренный вариант технологического процесса абсорбции хлористого водорода из печных газов характеризуется низкой эффективностью абсорбции в абсорбере А-2, большой нагрузкой на насадочную колонку и, как следствие этого, ее большими размерами.

В предлагаемой схеме узла абсорбции хлористого водорода (представлена на рис. 5) сохраняется противоток массообменивающихся фаз абсорбера А-1 и противоток потоков теплообмена.



**Рис. 5. Схема абсорбции хлористого водорода из печных газов**

В абсорберах А-2, А-3 и насадочной колонне А-4 принят противоток как массопередающих, так и теплообменивающихся потоков. Для улучшения смачивания трубок в абсорбер А-1 подается рецикл трех объемов продукционной кислоты и раствор из абсорбера А-2 (температурой  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  и содержанием  $\sim 18 \%$  хлористого водорода). После смешения в трубки поступает раствор, содержащий  $27\text{--}28 \%$   $\text{HCl}$ . Газ с долей хлористого водорода  $15\text{--}16 \%$  об. из абсорбера А-1 поступает в абсорбер А-2 снизу. Кислота из абсорбера А-1 с температурой  $45\text{--}48 \text{ }^\circ\text{C}$  собирается в сборник Е-1 и после отбора продукционной кислоты ( $2260\text{--}3800 \text{ кг/ч}$ ) остальная часть подается на верх абсорбера А-0.

Абсорбер А-2 орошается раствором кислоты концентрацией 7–8% масс и с температурой 35 °С, подаваемым из сборника Е-2 абсорбера А-3. Оба абсорбера охлаждаются оборотной водой с температурой 28 °С на входе и 35 °С на выходе.

Абсорбер А-3 орошается раствором из насадочной колонны А-4, имеющим температуру 15–16°С и концентрацию 1,3–1,5% масс хлористого водорода.

Характеристики абсорберов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатель	А-1	А-2	А-3	А-4
Поверхность трубок насадки, м <sup>2</sup>	140	80	80	8
Диаметр абсорбера, мм	1200	1000	700	300
Длина (слоя) трубок, мм	4000	4000	4000	4000
Число трубок	510	290	180	
Толщина пленки жидкости, мм	0,3	0,03	0,04	0,18

На орошение колонны А-4 подается умягченная вода, охлажденная в теплообменнике Т-1 до температуры 10 °С. Для улучшения смачиваемости насадка колонны выполнена из полипропиленовых колец 25х25 и разделена на два последовательных слоя высотой по 2000 мм. Колонна также выполнена из полипропилена. Газ на выходе из колонны содержит менее 0,02 % об. хлористого водорода и направляется перед выбросом в атмосферу на промывку щелочным или содовым раствором в санитарной колонне.

За счет улучшения смачиваемости трубок в абсорбере А-1 коэффициент массопередачи возрастает до  $K_y = 0,00014$  кмоль/(м<sup>2</sup>с), в абсорбере А-3 до  $K_y = 0,0051$  кмоль/(м<sup>2</sup>с).

Абсорберы А-1 и А-2 охлаждаются оборотной водой, подаваемой противотоком орошаемой жидкости. Абсорбер А-3 охлаждается захлажденным хладагентом (гликолевая вода) с температурой на входе 5 °С и на выходе 10°С, подаваемым противотоком жидкости. В трубных пространствах абсорберов для организации потока устанавливают по 7 сегментных перегородок с расстоянием 470 мм друг от друга.

Предлагаемая схема и технологический режим позволяют снизить:

- объем абсорберов и поверхность теплообмена в них – на 30%;
- объем насадочной колонны (А-4) в 25 раз;
- число эмалированных емкостей – на 1 единицу;
- число графитовых насосов – на 2 единицы;
- гидравлическое сопротивление системы абсорбции в 1,2 раза;
- объем стоков из санитарной колонны, передаваемых на станцию биочистки в 1,5 раза;
- расход хладагента с температурой 5°С на 25%.

В результате реализации принятого к проектированию предложения достигнуто сокращение объема капиталовложений по узлу абсорбции в 1,8 раза, сокращение энергозатрат в 1,3 раза.

Дата поступления  
в редакцию 02.02.2010

**M.I. Nikandrov, I.S. Nikandrov**

### **GETTING THE HYDROCHLORIC ACID FROM THE FURNACE GASES NEUTRALIZATION OF WASTE GASES AND WASTE PRODUCTION OF ORGANOCHLORINE COMPOUNDS**

Absorption hydrogen chloride is studding. Technological cheme of production chlor hydric acid's is giving.

*Key words:* hydrogen chloride, absorption, water, chlorhydric acid, production.

## ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

---

УДК 983.29.07

В.В. Пальцев

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ КЛАСТЕРОВ КАК ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается проблема создания кластеров в экономике с целью повышения конкурентоспособности как резидентов кластера, так и в целом региона. В статье описаны законодательные предпосылки формирования кластеров в РФ, а также рассматривается опыт конкретного региона (Нижегородской области).

*Ключевые слова:* экономический кластер, промышленные предприятия, инновации, локализация, синергия, бизнес-инфраструктура.

В настоящее время, по мнению многих ученых, экономику следует рассматривать через призму кластеров, а не через традиционное группирование компаний, секторов народного хозяйства или отраслей. Кластеры гораздо лучше, чем отрасли, охватывают важные связи, взаимодополняемость между отраслями, распространение технологий, навыков, информации, маркетинг и осознание требований заказчиков по фирмам и отраслям [1]. Именно такие связи являются основополагающими в достижении конкурентных преимуществ, что, в свою очередь, является залогом благополучия компаний, входящих в кластер.

Считается, что базовое определение кластера принадлежит М. Портеру. «Кластер или промышленная группа – это группа соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере и характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга» [2]. Таким образом, кластер определяется как индустриальный комплекс, сформированный на базе территориальной концентрации сетей специализированных поставщиков, основных производителей и потребителей, связанных технологической цепочкой, и выступающих альтернативой отраслевому подходу.

В ходе нашего исследования было выявлено более тридцати определений понятия «кластер», причем у разных авторов встречаются диаметрально противоположные взгляды на данный феномен. Так, по мнению российского ученого В.М. Кутына, кластеры не обладают географическим детерминизмом [3], что является одним из постулатов теории Портера. Рассматривая в качестве объекта исследования российские предприятия, Кутын объясняет данное положение, во-первых, слабостью подавляющего большинства регионов России, а во-вторых, отмечает, что даже близко находящиеся на географической карте регионы настолько сильно отличаются ресурсным, людским потенциалами, что не позволяет отнести их к одному экономическому кластеру.

Следует отметить, что кластеры могут отличаться друг от друга в зависимости от преследуемых резидентами целей. В этой связи, на наш взгляд, особый интерес вызывает классификация предложенная экономистами Меньшениной и Капустиной. Эти ученые проанализировали и обобщили различные подходы к типологии кластеров; в результате к основным

признакам, определяющим тот или иной вид кластера, по мнению Меньшениной и Капустинской относят:

- уровень развития;
- ориентация на рынок;
- территориальный охват;
- вид интеграции;
- стадия развития;
- влияние государства;
- механизм формирования.

На наш взгляд данную классификацию следует так же дополнить разделением в зависимости от отраслевой специфики.

Таким образом, с учетом отраслевой специфики выделяются типы кластеров [4], перечисленные далее.

*Дискретные* кластеры включают предприятия, производящие продукты (и связанные услуги), состоящие из дискретных компонентов, включая предприятия автомобилестроения, авиационной промышленности, судостроения, двигателестроения, иных отраслей машиностроительного комплекса, а также организации строительной отрасли и производства строительных материалов. Как правило, данные кластеры состоят из малых и средних компаний – поставщиков, развивающихся вокруг сборочных предприятий и строительных организаций.

*Процессные* кластеры образуются предприятиями, относящимися к так называемым процессным отраслям, таким как химическая, целлюлозно-бумажная, металлургическая отрасль, а также сельское хозяйство, пищевая промышленность и др.

*Инновационные* и «творческие» кластеры развиваются в так называемых «новых секторах», таких как информационные технологии, биотехнологии, новые материалы, а также в секторах услуг, связанных с осуществлением творческой деятельности (например, кинематографии). Инновационные кластеры включают большое количество новых компаний, возникающих в процессе коммерциализации технологий и результатов научной деятельности, проводимых в высших учебных заведениях и исследовательских организациях.

*Туристические* кластеры формируются на базе туристических активов в регионе и состоят из предприятий различных секторов, связанных с обслуживанием туристов, например, туристических операторов, гостиниц, сектора общественного питания, производителей сувенирной продукции, транспортных предприятий и др.

*Транспортно-логистические* кластеры включают в себя комплекс инфраструктуры и компаний, специализирующихся на хранении, сопровождении и доставке грузов и пассажиров. Кластер может включать также организации, обслуживающие объекты портовой инфраструктуры, компании, специализирующиеся на морских, речных, наземных, воздушных перевозках, логистические комплексы и другие. Транспортно-логистические кластеры развиваются в регионах, имеющих существенный транзитный потенциал.

В целом данная классификация в зависимости от отраслевой специфики является логичной, однако необходимо добавить, что инновационный продукт может быть произведен не только в рамках инновационного кластера, но и любым другим, исходя из его природы.

По уровню развития выделяют следующие виды экономических кластеров:

- *сильные* – характерна хорошая сбалансированность развития как основных, так и связанных производств и специализированного сервиса, высокая внутренняя конкуренция, научноисследовательский и инновационный потенциал мирового уровня, интенсивное внутрикластерное взаимодействие в рамках совместных проектов и работы межотраслевых организаций;
- *устойчивые* – демонстрируют позитивную динамику всех элементов кластера и внутри кластерного взаимодействия, однако пока еще не достигли необходимого уровня развития для получения уверенных выгод от объединения;
- *потенциальные* – характеризуются неравномерным развитием структуры кластера и

слабостью отдельных элементов, однако при этом существуют выраженные конкурентные преимущества и фундаментальные факторы, способствующие дальнейшему развитию;

- *латентные* – объединяют целый ряд довольно успешно функционирующих организаций и компаний, но в целом весьма далеки от полноценной кластерной структуры, процессы ее формирования происходят достаточно медленно. Эти кластеры являются объектом внимания исследователей и государственных органов, но не рассматриваются как движущие силы экономического роста в стране.

В зависимости от ориентации на рынок выделяют кластеры:

- *ориентированные на внешний рынок* – расположены на определенной территории, представляют собой, прежде всего, источник долгосрочного экономического роста и развития регионов. Данные кластеры способны выходить за рамки местного рынка, поглощая при этом менее конкурентоспособные отрасли;

- *ориентированные на локальный рынок* – включают группы фирм, работающие в сфере недвижимости и строительства, осуществляющие также местные операции по экспорту продукции в соседние кластеры.

Территориальная локализация тесно связана с вопросом территориального охвата кластера. В соответствии с этим признаком принято выделять:

- *макрокластеры* – объединения, функционирующие на уровне страны в целом;
- *региональные кластеры* – объединения, функционирующие на уровне конкретного региона;

- *микрокластеры (коммерческие)* – объединения, функционирующие на уровне организаций.

В зависимости от вида интеграции М. Портер выделяет:

- *вертикально интегрированные кластеры*, составленные из отраслей промышленности, которые связаны через отношения покупателя-продавца;

- *горизонтально интегрированные кластеры*, включающие отрасли промышленности, которые могли бы разделить общий рынок конечного продукта, использовать общую технологию или навыки рабочей силы или нуждаются в одинаковых природных ресурсах.

С точки зрения стадии развития экономического кластера можно выделить:

- *зарождающиеся*. Зарождение экономических кластеров связано с рядом причин. Это, например, наличие и доступность факторов производства, территориальное местоположение, наличие соответствующей инфраструктуры, местного спроса, случайных событий;

- *развивающиеся*. На данном этапе экономический кластер начинает привлекать новых участников;

- *зрелый*. Кластер уже развил связи во внешней среде, с другими кластерами, регионами; характерно достижение критической массы действующих лиц, устойчивые взаимосвязи между ними;

- *пришедшие в упадок*. Причины упадка: внутренние причины связаны с локализацией, результатом которой может быть потеря гибкости. Обычно такая ситуация связана с соответствующими действиями правительства (например, вмешательство в конкурентную борьбу). Внешние причины обусловлены расширением экономических кластеров. Результатом может быть разрыв в технологических цепочках.

В зависимости от политики государства – участника кластера можно выделить кластеры [5]:

- *североамериканский*. Формирование кластеров – местная инициатива. Центральное правительство создает стимулы для региональных органов с помощью грантов. Создаются агентства по развитию кластеров. Примеры: США (компьютерный, автомобильный, кластер индустрии развлечений), Канада (биотехнологический, кластер высоких технологий);

- *западноевропейский*. Ключевую роль играют университеты и исследовательские институты. Форма поддержки – финансирование научных исследований и формирование инно-

вационной инфраструктуры. Примеры: Великобритания (биофармацевтический, образовательный), Франция (парфюмерно-косметический, пищевой), Швейцария (биотехнологический, финансовый);

- *скандинавский*. Кластеры формируются по инициативе правительства. Развита исследовательская и технологическая кооперация. Форма поддержки - адресное инвестирование средств в наиболее перспективные кластеры. Примеры: Финляндия (лесной, кластер информационных и телекоммуникационных технологий, энергетический, металлургический, машиностроительный);

- *индийский*. Финансирование кластеров осуществляется за счет зарубежных инвестиций. Приоритетные кластеры отбираются правительством. Форма поддержки – стимулирование экспорта. Примеры: Индия (по производству тканей и трикотажа, пищевой, станкостроительный, по производству кожи, фармацевтический);

- *китайский*. Кластеры формируются по инициативе правительства и регионов путем создания особых зон развития высокотехнологичных отраслей. Финансирование – гранты правительства и венчурных фондов. Широко используется политика по привлечению зарубежных специалистов. Примеры: Китай (автомобильный, высоких технологий, кластер по производству стали, электротехнический, кластер по производству мобильных телефонов);

- *японский*. Развитием кластеров занимаются правительство и региональные власти. Поддержка – развитие инновационной инфраструктуры (технополисов). Используются программы привлечения иностранных специалистов. Примеры: Япония (электротехнический, автомобильный, кластер информационных технологий, биотехнологий).

В зависимости от механизма формирования кластера:

- *рыночные*. Рыночное формирование кластера характерно для коммерческих и (частично) региональных кластеров. Рыночный кластер формируется спонтанно в границах региона в целях обеспечения конкурентоспособности организаций-участников;

- *централизованные*. Целенаправленное формирование кластеров наиболее характерно для национального и регионального уровней. Цели развития регионального кластера – повышение конкурентоспособности региона, его формирование осуществляется в рамках региональной политики. На уровне государства кластеры формируются в рамках реализации национальной политики, целями которой является решение общенациональных проблем.

Проанализировав наиболее распространенные подходы к пониманию феномена «кластер», мы пришли к выводу, что кластер – это объединение компаний одной или нескольких смежных отраслей на основе вертикальных и / или горизонтальных связей с целью получения синергетического эффекта, достигаемого, в том числе, за счет выпуска компанией – лидером инновационного продукта с высокой степенью локализации производства. При этом ключевым моментом является результат, получаемый на выходе. Нельзя не отметить, что количественные и качественные параметры данного результата в настоящее время определяются самими участниками, что вносит путаницу при определении разницы между «конструктивным» кластером и, например, «деструктивным» монополистическим сговором.

Кластерный бум пришелся на конец прошлого столетия в США и Европе и в основном был связан с распространением теории Портера. Однако интерес к данному феномену не исчез до сих пор. Более того, процессы кластеризации охватили все большее количество предприятий, отраслей, стран в целом. Индия, Вьетнам, Китай, Корея, Казахстан и другие государства заявляют о своих кластерах как «локомотивах» экономического развития, не говоря уже о развитых государствах, таких как Германия (пример – автомобильный кластер в районе земли Северный Рейн-Вестфалия), Финляндия (пример – кластер деревообработки), где кластеры являются не единичными образованиями, а повсеместно распространены, и имеют официальный статус субъектов хозяйствования, закрепленный нормативно-правовыми актами.

На наш взгляд, успех кластерных организаций заключается в следующем:

- в рамках кластера происходит взаимодействие межотраслевых предприятий, что позволяет осуществить переход от узкой специализации к интеграции в управленческой деятельности;

- объединение предприятий и организаций различной направленности (промышленные предприятия, научно-исследовательские институты, учебные заведения, венчурные фирмы и т.д.) приводит к возрастанию роли инноваций и предпринимательства;
- вовлечение в кластер предприятий различных форм собственности способствует формированию эффективных механизмов рыночной конкуренции;
- внедрение инноваций способствует ускорению выхода продукции и ориентации предприятий и организаций на создание добавленной стоимости и повышению качества работ;
- взаимодействие хозяйствующих субъектов приводит к возникновению перекрестных целей, что, в свою очередь, оказывает влияние на баланс спроса и предложения;
- взаимное понимание интересов членов кластера способствует поддержанию благоприятного инвестиционного климата, что, как следствие, обеспечивает рост количественных и качественных показателей инвестиций в расширенное воспроизводство товаров и услуг.

Таким образом, кластер является инструментом аккумуляции ключевых факторов успеха лидеров отрасли и распространения их на остальных участников [6].

В результате экономического эффекта кластера срабатывает принцип «снежного кома» – экономические успехи влекут за собой развитие социальных программ территорий кластера.

В настоящее время руководство Российской Федерации также предпринимает усилия по формированию необходимой нормативной, финансовой, а также инновационной инфраструктуры для создания и развития кластеров. Путь, выбранный государством, предполагает тотальную модернизацию экономики с использованием собственного опыта реформирования в условиях рыночного хозяйствования, а также адаптированного опыта передовых государств.

По словам премьер-министра РФ Владимира Путина: «Ставку мы будем делать на современные производства, основанные на передовых технологиях и высокой производительности труда, будем модернизировать традиционную индустрию и создавать новые инновационные кластеры» [7].

Таким образом, развитие кластеров – один из приоритетов политики модернизации российской экономики, что официально декларируется в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года.

Показательным моментом в создании инновационных кластеров является российский вариант Силиконовой долины – проект «Сколково». По предварительным оценкам соответствия мировому опыту, вероятность успешной реализации проекта иннограда «Сколково» можно определить как «среднюю». Плюсом является наличие политической воли со стороны руководства страны, а также объективная потребность российской экономики в наукоемких проектах. В числе сложностей, которые предстоит преодолеть, – низкая эффективность бюрократической и правовых систем.

Однако задолго до данного проекта в направлении кластеризации предпринимались определенные усилия.

Одним из первых законодательных актов, заложивших основу в «фундамент» формирования благоприятной среды для развития кластеров, был принятый 7 апреля 1999 г. Федеральный закон «О статусе наукограда Российской Федерации» № 70-ФЗ. Данным законом было предусмотрено предоставление различных преференций, в том числе, в виде финансовых ресурсов на строительство инновационной, социальной и инженерной инфраструктуры, осуществляемой из средств федерального бюджета.

В 2004 г. при Правительстве России были созданы Совет по конкурентоспособности и предпринимательству и соответствующие органы по науке, технологиям и образованию. На федеральном уровне были сформированы финансовые механизмы по созданию и продвижению кластеров. Так, в соответствии с Правилами предоставления средств федерального бюджета, предусмотренных на государственную поддержку малого предпринимательства, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 22 апреля 2005 г. № 249, стало осуществляться на конкурсной основе предоставление субсидий субъектам Российской Федерации на финансирование мероприятий, в том числе предполагающих соз-

дание кластерных объединений. Федеральный закон «Об особых экономических зонах» от 22 июля 2005 г. №116-ФЗ по своей сути открыл благоприятные возможности для развития кластерных проектов в особых экономических зонах РФ. Другой пример – создание предпосылок для образования территориально-производственных кластеров в рамках реализации проектов «промышленной сборки» утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 29 марта 2005 г. № 166.

Следующим шагом со стороны государства была разработка и реализация государственной программы «Создание в Российской Федерации технопарков в сфере высоких технологий», одобренной распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 марта 2006 г. № 328-р.

Кроме того, с целью эффективного финансирования проектов развития кластеров был сформирован ряд институтов развития, включая Инвестиционный фонд Российской Федерации, государственную корпорацию «Банк развития и внешнеэкономической деятельности (Внешэкономбанк)», ОАО «Российская венчурная компания», Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Последним документом, способствующим развитию кластерных образований является Федеральный Закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ в целях практического применения (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности» № 217-ФЗ от 2 августа 2009 г. В частности, данным нормативно-правовым актом предусмотрены механизмы интеграции науки и образования в реальный сектор экономики, что является одним из основополагающих моментов в достижении заданного эффекта при создании и развитии кластеров.

Так же положительным вкладом государства является создание программ, баз данных и методических рекомендаций, направленных на развитие кластеров в регионах.

В частности, существует официальный список региональных кластеров (протокластеров) составленный Министерством экономического развития РФ.

В соответствии с представленной базой данных [8] Россия уже имеет кластероориентированную экономику. Например, в Приволжском Федеральном округе насчитывается около пятидесяти восьми кластеров; из них в Нижегородской области – три кластера: автомобилестроения и автокомпонентов, "Российский центр переработки ПВХ", Федеральный технопарк в сфере информационных технологий "Анкудиновка", включающий сеть инкубаторов. Последний вызывает серьезные вопросы относительно правомочности заявления в качестве кластера объединения инкубаторов. По поводу кластера автомобилестроения и автокомпонентов хотелось бы отметить, что в Нижегородской области действительно имеются все предпосылки для создания такового, а именно, существует необходимая критическая масса предприятий автомобилестроения, в том числе, занимающихся выпуском инновационной продукции, имеется кадровый потенциал, правительством области проводится протекционистская политика, закрепленная в стратегии развития Нижегородской области до 2020 г. По данным «Исследования инновационной активности промышленных предприятий и организаций Нижегородской области», проводимого по инициативе Правительства Нижегородской области, в регионе действует двадцать восемь предприятий автомобилестроения различных форм собственности и более восьмидесяти смежных предприятий [9]. По итогам "Рейтинга инновационной активности регионов 2009", проведенного Национальной ассоциацией инноваций и развития информационных технологий (НАИРИТ), Нижегородская область заняла четвертое место.

Обеспечение кадров осуществляется за счет целевой подготовки и переподготовки высококвалифицированных кадров в образовательных учреждениях. В соответствии со Стратегией развития до 2020 г. автомобилестроительная отрасль является одним из ключевых направлений «главного удара». Кроме того, в области имеется развитая бизнес-инфраструктура, включающая в себя сеть бизнес-инкубаторов, технопарк, финансовые институты, консалтинговые и венчурные организации.

Однако на сегодняшний день анализ финансово-экономического состояния потенциальных участников свидетельствует об отсутствии синергии, получаемой в кластере, кроме того, конкурентоспособность региона в области автомобилестроения по рейтинговой оценке занимает не лидирующее положение [10], что в значительной степени связано с трудностями крупнейшего автомобилестроительного предприятия «Автомобильный завод ГАЗ».

Предпосылки к формированию кластера наблюдаются также в ходе реализации проекта "Российский центр переработки ПВХ". Однако следует отметить, что приход в Нижегородский регион иностранного инвестора (компании «Solvay») во многом связан с существующими в Европе запретами на производство поливинилхлорида.

Таким образом, следует констатировать, что существование кластеров как эффективных инструментов повышения конкурентоспособности отдельных предприятий и региона в целом в Нижегородской области носит пока декларативный характер. Подобная ситуация наблюдается и в других регионах России. В связи с этим существенным, на наш взгляд, является совершенствование механизмов создания промышленных кластеров как условие эффективного развития экономики.

#### Библиографический список

1. **Ферова, И. С.** Промышленные кластеры и их роль в формировании региональной промышленной политики : дис. ... док. экон. наук.: 08.00.05 / И. С. Ферова. – М., 2007. – 320 с.
2. **Портер, М.** Конкуренция / М. Портер. – М.: изд. дом «Вильямс», 2002. – 610 с.
3. **Кутын, В.М.** Территориальная экономическая кластеризация (классификация) регионов России: социально-географический аспект / В.М. Кутын // Безопасность Евразии. 2003. № 1. С. 525.
4. **Слука, Н.** Глобальные города / Н. Слука // Эксперт. 2008. № 15. С. 68.
5. **Флорида, Р.** Мегарегионы: значимость места / Р. Флорида // Harvard Business Review Россия. 2008. Апрель. – С. 14.
6. **Пальцев, В.В.** О необходимости создания автомобильного кластера в ПФО // Будущее технической науки: сб. матер. межд. конф. / НГТУ. 2009. С. 357.
7. Новости Нижнего Новгорода // Город и горожане. 2010. – сентябрь. С. 7.
8. Сводная база данных по кластерам России [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о всех кластерах России. – Режим доступа: <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc201001081707>
9. Исследование инновационной активности промышленных предприятий и организаций Нижегородской области. Каталог промышленных предприятий / Н.П. Сатаев [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 2008. – 36 с.
10. **Задорова, Т.В.** Кластерная политика как фактор повышения конкурентоспособности региона (на материалах чувашской республики): автореф. дис...: 08.00.05 / Т.В. Задорова. – М., 2009. – 24 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**V.V. Paltsev**

#### **IMPROVEMENT OF MECHANISMS FOR CREATION OF INDUSTRIAL CLUSTERS AS THE PROBLEM OF MODERN MANAGEMENT**

The article considers the problem of cluster creation in economics aimed at increase of competitiveness of cluster residents as well as the whole region. Legislative preconditions of clustering in Russia are described in the article and experience of Nizhniy Novgorod region is considered.

*Key words:* economics cluster, industrial enterprises, innovations, localization, synergy, business infrastructure.

УДК 336.714

Ф.Ф. Юрлов, А.Ф. Плеханова, Н.А. Плеханов

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПОРТФЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ СТРАТЕГИЧЕСКОМ ПЛАНИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ И ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Имеющиеся методы портфельного анализа при стратегическом планировании основаны на матричном подходе. Используемые при этом матрицы не лишены недостатков и не дают подлинных ориентиров при реализации стратегии. В статье обосновывается необходимость использования многокритериального подхода, базирующегося более чем на двух критериях, которые зачастую являются противоречивыми, для всех видов портфельных матриц.

*Ключевые слова:* портфельный анализ, портфельные матрицы, многокритериальный подход, выбор оптимальных решений, конфликт критериев, принцип доминирования, принцип Парето, область эффективных решений.

При стратегическом планировании и управлении наиболее распространенным методом оценки деятельности компаний является матричный анализ портфеля. Матрица портфеля представляет собой двухмерный график, позволяющий определить стратегические позиции каждого вида деятельности диверсифицированной компании. Указанная матрица строится обычно с использованием той или иной пары показателей стратегического положения фирмы. В качестве наиболее распространенных показателей выступают: темпы роста отрасли, доля предприятия на рынке, долговременная привлекательность отрасли, конкурентные сильные стороны, стадия эволюции продукта рынка.

Наибольшее распространение получили следующие матрицы портфеля: матрица рост – доля, (матрица BCG); матрица привлекательность отрасли – сильные стороны компании (матрица, предложенная General Elektrik), матрица жизненного цикла отрасли.

Проведенный анализ матриц портфеля позволил сделать следующие выводы:

1. Портфельный анализ представляет собой методологию выбора эффективных стратегических решений, которая находит широкое применение в зарубежной практике;
2. При применении указанного подхода в России могут встретиться существенные трудности, обусловленные как спецификой портфельного анализа, так и особенностями функционирования отечественных предприятий на данном этапе развития экономики страны;
3. Модели портфельного анализа наряду с преимуществами имеют определенные недостатки, которые существе ограничивают их применение в отечественной практике стратегического планирования и управления.
4. К характерным недостаткам моделей портфельного анализа можно отнести:
  - недостаточно конструктивный характер указанных моделей;
  - двумерный анализ принимаемых стратегических решений, не позволяющий анализировать многомерные социально-экономические процессы;
  - недостаточный учет важных показателей эффективности промышленных предприятий (выручки, прибыли, рентабельности, финансовой устойчивости и др.);
  - отсутствие связи между рыночными показателями и показателями эффективности функционирования предприятий;
  - преимущественное применение детерминированных моделей и недостаточный учет факторов риска и неопределенности;

- отсутствие многокритериального подхода к выбору эффективных стратегических решений.

5. С учетом выявленных недостатков моделей портфельного анализа следует необходимость дальнейшего развития теории и практики оценки эффективности принимаемых решений при стратегическом планировании и управлении.

6. В качестве важного направления исследования рассматриваемой проблемы является проблема многокритериального выбора альтернатив.

7. Применение многокритериального подхода к решению данной проблемы.

Оценка эффективности стратегий будет зависеть от типа решаемых задач. Отметим характерные типы задач, которые могут иметь место при стратегическом планировании и управлении:

1) определение экономической эффективности стратегий;

2) оценка социальной эффективности стратегических решений;

3) определение технической эффективности принимаемых решений;

4) оценка экологической эффективности стратегий;

5) определение инновационной активности предприятий и организаций.

6) комплексная оценка эффективности стратегических решений с учетом экономических, технических, социальных, экологических последствий принимаемых решений.

При решении указанных задач возникают противоречия как между показателями внутри групп, так между показателями, принадлежащими к разным группам. Для разрешения этих противоречий потребуется использование теории многокритериального выбора.

Далее рассматриваются возможности применения основных принципов многокритериального выбора применительно к оценке эффективности решений, принимаемых при стратегическом планировании и управлении.

При решении различных экономических задач находят применение разные принципы выбора эффективных решений. Это относится и к проблеме оценки эффективности принимаемых решений при стратегическом планировании и управлении. В качестве указанных принципов выступают: *принцип доминирования; принцип Парето; принцип формирования комплексных показателей; принцип выделения главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений; принцип удовлетворения потребностей.*

В общем случае применение каждого из принципов приводит к различным результатам (выводам относительно эффективности принимаемых решений). Это существенно затрудняет объективную оценку эффективности анализируемых систем (проектов) и выбор наиболее предпочтительных альтернатив. Возникает необходимость анализа особенностей каждого из рассматриваемых принципов, возможностей их применения и совершенствования.

В настоящей работе приводится краткий анализ указанных принципов, и определяются возможности применения каждого из них для решения задач выбора эффективных стратегических решений.

*Сущность принципа доминирования* состоит в следующем. Производится сравнительная оценка эффективности нескольких стратегий. В качестве указанных стратегий могут выступать: стратегии предприятия, инвестиционные проекты, стратегии производственных комплексов, стратегии территорий, стратегии регионов и т.п. Для выбора наиболее эффективных альтернатив используется набор показателей. Данные показатели могут иметь экономическое, техническое, социальное, экологическое и иное содержание. При решении рассматриваемой задачи осуществляется попарное сравнение указанных альтернатив. При сравнении альтернатив (вариантов) с номерами  $I$  и  $J$  вариант с номером  $I$  доминирует (превосходит) вариант с номером  $J$ , если все показатели  $I$ -го варианта не хуже показателей  $J$ -го варианта и хотя бы один показатель является лучшим.

Принцип доминирования на практике имеет ограниченное применение. Это обусловлено тем, что показатели эффективности принимаемых решений, как правило, являются противоречивыми. Противоречие заключается в том, что улучшение какого-либо из показателей приводит во многих случаях к ухудшению других показателей. Например, улучшение

экономических показателей может привести к негативным социальным последствиям. Увеличение прибыли предприятия может быть связано с ростом безработицы. Повышение технического уровня изделий может явиться причиной ухудшения экологических показателей окружающей среды.

Несмотря на указанные недостатки рассматриваемого принципа, применение его для оценки эффективности стратегических решений в ряде ситуаций может быть оправданным и целесообразным. Характерным примером применения данного принципа является определение эффективности принимаемых решений в централизованной экономике. Это относится, например, к использованию критерия минимума необходимых затрат общественного труда, который был основным критерием до 90-х годов XX века. Данный критерий может найти применение и в рыночных условиях хозяйствования. В данном случае реализуется однокритериальный подход к выбору оптимальных решений.

Таким образом, принцип доминирования имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому имеется необходимость рассмотрения возможностей его применения для оценки эффективности стратегических решений.

Следующим принципом, который находит применение при определении эффективности систем различного назначения, является *принцип Парето*. При использовании данного принципа множество сравниваемых альтернатив разбивается на два подмножества: подмножество эффективных и подмножество неэффективных решений. Подмножество эффективных альтернатив доминирует (превосходит) подмножество неэффективных альтернатив. Поэтому неэффективные решения исключаются из рассмотрения. Альтернативы, принадлежащие к неэффективному подмножеству, являются несравнимыми. Это означает, что они описываются противоречивыми критериями и улучшение какого либо критерия приводит к ухудшению других критериев.

Приведем пример применения рассматриваемого принципа. Предположим, что осуществляется сравнительная оценка эффективности альтернатив по двум критериям: прибыли и рентабельности продаж. В качестве сравниваемых альтернатив выступают несколько стратегий промышленных предприятий. В результате сравнительного анализа оказалось, что две стратегии предприятия доминируют остальные стратегии по показателям прибыли и рентабельности. Поэтому все стратегии предприятия (кроме двух) исключаются из дальнейшего рассмотрения. Две оставшиеся стратегии принадлежат к эффективному множеству альтернатив. Они являются несравнимыми, так как одна из них предпочтительнее другой по одному показателю (например, по показателю прибыли) и уступает другой по показателю рентабельности.

Определим особенности, преимущества и недостатки данного принципа. Положительным свойством принципа Парето является то, что его применение не связано с какими-либо дополнительными условиями, которые накладываются на показатели эффективности принимаемых решений. Указанный принцип относительно прост для применения. К недостатку принципа можно отнести то, что при его использовании не удастся определить единственное оптимальное решение. Поэтому во многих случаях наряду с данным принципом приходится применять другие способы выбора наиболее предпочтительных решений. Как и в случае анализа принципа доминирования требуется рассмотрение возможностей применения принципа Парето для оценки эффективности решений, принимаемых при стратегическом планировании и управлении.

*Принцип формирования комплексных показателей* базируется на агрегировании информации о частных показателях анализируемых систем. При этом происходит «свертывание» набора частных показателей, таким образом, чтобы на основе совокупности исследуемых показателей сформировать один, или несколько комплексных «обобщенных» показателей. Приведем примеры формирования комплексных показателей.

Пример 1. Предположим, что для оценки экономического состояния предприятия используются показатели: валового дохода (выручки) и валовых издержек. В общем случае эти

показатели являются противоречивыми, так как рост валового дохода может быть связан с увеличением валовых издержек. Поэтому при сравнительном анализе нескольких предприятий возникает трудность выбора наиболее предпочтительного решения. Для устранения этой трудности рассматривается возможность формирования того или иного комплексного (обобщенного) показателя. В качестве указанного показателя может быть использован широко применяемый на практике показатель прибыли предприятия, определяемый в виде разности валового дохода и валовых издержек. Таким образом, осуществляется переход от оценки эффективности предприятий по двум показателям к оценке их с помощью одного показателя.

Пример 2. Для определения экономического состояния предприятий используются показатели затрат (например, приведенных годовых) и производительности. Одно из предприятий имеет наименьшие затраты, но при этом обеспечивает меньшую производительность. В данном случае выбрать более эффективное решение оказывается затруднительным. С целью решения данной задачи может быть использован критерий минимума удельных затрат, определяемый в виде отношения затрат к производительности. С помощью такого комплексного критерия удастся решить поставленную задачу по определению наиболее предпочтительного решения.

Принцип формирования комплексных показателей находит широкое применение на практике. Однако, наряду с преимуществом, которое заключается в снижении размерности (количества) используемых показателей, применение данного принципа может быть связано с неопределенностью. Эта неопределенность обусловлена потерей информации о частных показателях анализируемых систем.

*Сущность принципа выделения главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений* заключается в следующем. При его использовании выбирается главный показатель, характеризующий эффективность принимаемых решений. Остальные показатели переводятся в разряд ограничений. Наиболее эффективное решение определяется по главному показателю, при условии, что остальные показатели удовлетворяют введенным ограничениям. В качестве примеров применения рассматриваемого принципа можно указать на следующие.

Пример 3. Стратегический инвестор в качестве главного показателя выбирает показатель доходности вложенного капитала. Для остальных показателей задаются область их возможных значений, например, устанавливаются нижние границы коэффициентов ликвидности и срока окупаемости. Рассматривается совокупность вариантов (альтернатив), имеющих допустимые значения частных показателей ликвидности и окупаемости, и из них выбирается вариант, характеризующийся максимальной величиной доходности.

Пример 4. При оценке эффективности проектов, имеющих общественную значимость, в качестве главного показателя выступает показатель, характеризующий социальные последствия реализации проекта. В качестве указанного показателя может выступать, например, показатель, с помощью которого оценивается влияние проекта на окружающую среду.

Рассматриваемый принцип находит широкое применение в практике оценки эффективности принимаемых решений. К его достоинству можно отнести хорошую экономическую трактовку и простоту. Однако при его применении в ряде ситуаций возникают следующие трудности:

- трудность определения главного показателя;
- трудность определения ограничений, накладываемых на остальные показатели.

И наконец, рассмотрим один из важнейших принципов оценки эффективности принимаемых решений: *принцип удовлетворения потребностей потребителя*. Сущность данного принципа заключается в том, что при определении эффективности систем различного назначения следует исходить из требований, предъявляемых к ним со стороны потребителей. Данный принцип является развитием принципа тождества полезного результата, который находил применение в централизованной экономике. Как уже отмечалось, в качестве основ-

ного критерия выбора эффективных решений при централизованных методах управления выступал критерий минимума общественно необходимых затрат. При применении данного критерия необходимо, чтобы сравниваемые варианты (альтернативы) обеспечивали тождественный полезный того или иного вида. Указанный результат мог иметь экономическое, техническое, социальное и иное содержание. Варианты, не удовлетворяющие данному условию, исключались из рассмотрения.

Пример 5. Производится сравнительная оценка эффективности различных вариантов электроснабжения. В качестве указанных вариантов могут выступать: использование тепловых электростанций, применение гидростанций, нетрадиционные источники электроэнергии (солнечные батареи, ветряные двигатели и т.п.). Сравнимые варианты характеризуются разными значениями капитальных вложений и годовых эксплуатационных расходов. Для определения эффективного решения необходимо обеспечить требование сопоставимости альтернатив. В качестве показателя, по которому необходимо обеспечить сопоставимость вариантов, принимается показатель количества электрической энергии, вырабатываемой системой электроснабжения. Условие сопоставимости вариантов будет выполняться, если они будут обеспечивать потребности потребителя в электроэнергии.

### Выводы

1. Для оценки эффективности принимаемых решений в настоящее время находит применение совокупность принципов. К ним относятся: принцип доминирования, принцип Парето, принцип формирования комплексных показателей, принцип выделения главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений, принцип удовлетворения потребностей.

2. Каждый из указанных принципов характеризуется как положительными свойствами, так и определенными недостатками. Поэтому необходим анализ возможностей применения рассматриваемых принципов для принятия стратегических решений.

3. В общем случае необходимо комплексное применение рассмотренных принципов для выбора стратегических решений.

### Библиографический список

1. Шапкин, Е.И. Эффективная стратегия при планировании и управлении в машиностроении: учеб. пособие / Е.И. Шапкин, Ф.Ф. Юрлов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2007. – 227 с.
2. Юрлов, Ф.Ф. Многокритериальная сравнительная оценка экономического состояния предприятий и отраслей промышленности: учеб. пособие / Ф.Ф. Юрлов, Д.Н. Лапаев, А.Ф. Плеханова; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. – 182 с.

*Дата поступления  
в редакцию 19.10.2010*

**F.F. Yurlov, A.F. Plekhanova, N.A. Plekhanov**

### COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE PORTFOLIO ANALYSIS METHODS IN THE STRATEGICAL PLANNING AND MANAGEMENT AND SUBSTANTIATION OF THE MULTI-OBJECTIVE APPROACH TO THE DECISION MAKING

Usually used portfolio analysis techniques of the strategical planning are based on the matrix approach. All of the matrixes used in these methods are not free of serious defects and don't give real guidelines during the strategy is realized. In this article authors substantiate a necessity of multi-objective approach using more, than two criteria, which are usually contradictory. This multi-objective approach must be used to all the portfolio matrixes.

*Key word:* portfolio analysis, portfolio matrixes, multi-objective approach, decision making, contradictory criteria, dominance principle, Pareto's principle, effective decisions set.

УДК 33.05

Г.А. Морозова

**ИННОВАЦИОННЫЙ МАРКЕТИНГ В РЕГИОНЕ**

Волго-Вятская академия государственной службы

Инновационный маркетинг - это маркетинг новых информационных технологий в предпринимательских, государственных и муниципальных структурах. Основными принципами инновационного маркетинга являются: всестороннее изучение рынка, спроса, вкусов и желаний потребителей-инноваторов; приспособление предложения инновационных продуктов к требованиям инновационного рынка; воздействие на рынок и спрос в интересах компании производителя инновационных товаров и услуг.

*Ключевые слова:* анализ портфеля направлений деятельности, анализ организационной структуры, идеальный товар, инвестиция, инжиниринг, интегральный показатель конкурентоспособности, интеллектуальные инвестиции, исследование товарного рынка.

Тот факт, что знания стали капиталом развитой экономики, а работники интеллектуального труда превратились в группу, определяющую ценность и нормы общества, в конечном итоге оказывает обратное воздействие на то, что мы подразумеваем под знаниями, а также на то, каким образом они приобретаются и передаются (П. Друкер) [1]. В категорию «инновационный маркетинг» вкладываются несколько понятий.

Во-первых, это маркетинг, т.е. маркетинговые усилия, направленные на создание, накопление, обновление, распространение и эффективное использование знаний во всех формах их проявления.

Во-вторых, это маркетинг инноваций как специфического продукта, потребительская ценность которого определяется не только спросом и предложением, но и совокупностью маркетинговых усилий, направленных на продвижение его на рынок. Этому процессу уделено достаточное внимание Г.А. Морозовой в работе «Продвижение продукта в регионе» [2].

В-третьих, это маркетинг новых информационных технологий в предпринимательских, государственных и муниципальных структурах.

Основными принципами инновационного маркетинга являются:

- всестороннее изучение рынка, спроса, вкусов и желаний потребителей;
- приспособление предложения инновационных продуктов и услуг к требованиям инновационного рынка;
- воздействие на рынок и спрос в интересах компании производителя инновационных продуктов и услуг.

Маркетинговые исследования рынка инновационных продуктов и услуг обычно начинаются с анализа продукта, в качестве которого нередко выступают объекты интеллектуальной деятельности ученых, исследователей, других специалистов, обладающие определенной новизной, охраняемые изобретательским и авторским правом. Составной частью интеллектуальной собственности является промышленная собственность, связанная с интеллектуальной деятельностью в сфере материального производства и в смежных с ней областях.

Объекты промышленной собственности включают в себя технические объекты (полезные модели, образцы, ноу-хау и т.п.) Чаще всего они являются результатом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), которые должны быть защищены патентами. Маркетинговые исследования рынка инновационных продуктов включают:

- формирование идей, когда аккумулируется все разнообразие возможных идей, представляющих коммерческую или иную ценность;

- оценку, отбор идей по основным критериям (новизна, конкурентоспособность, практическая ценность, примерная стоимость реализации);
- проверку идей, когда из совокупности оцененных идей отбираются наиболее реалистичные, адекватные требованиям инновационного рынка.

По результатам маркетинговых исследований рынка инновационных продуктов разрабатывается стратегический план реализации той или иной идеи, прошедшей предварительный отбор. Научно-техническая деятельность фирмы включает:

- создание научно-технической продукции;
- проведение прикладных исследований научными организациями;
- использование научно-технической продукции, что предполагает возможность патентования и лицензирования.

На стадии маркетингового испытания новой техники предпринимаются следующие маркетинговые усилия:

- проводится изучение реакции рынка на нововведение;
- при положительной реакции принимается решение о разработке товарного знака;
- изучаются возможности сбыта новой продукции на рынке.

Заключительным этапом организации инновационного маркетинга является маркетинговый анализ результатов реализации нововведений.

Конкурентные преимущества организации в значительной степени обеспечивает быстрая реакция на новые потребности рынка и скорейшее внедрение новинок. Повышается значение скорости разработки, производства и распределения нововведений.

Можно выделить следующие инновационные рынки организации [3]:

- низкие затраты за счет сокращения времени разработки новой модели товара;
- увеличение количества инноваций за счет осуществления новых проектов в рамках утвержденного бюджета;
- быстрый рост организации за счет постоянно обновляющегося товарного предложения;
- высокие прибыли за счет экономии ресурсов при разработке инновационных товаров, так как чем короче жизненный цикл товара, тем выше премия к цене инновационных товаров;
- сильная торговая марка за счет создания новаторского товара у «пионеров рынка», который изначально обладает отличительными конкурентными преимуществами;
- надежность прогноза развития рынка за счет сокращения периода реализации проекта.

Стратегические возможности инновационных компаний связаны с созданием новых и расширением существующих рынков, проникновением на новые рынки, репозиционированием бизнеса.

Развитие региона – это комплексный процесс изменения его экономической, социальной, политической, экологической и духовной сфер, приводящий к их качественным преобразованиям. Основной целью социально-экономического развития региона является улучшение качества жизни населения. Развитие регионов это не только объективный процесс, который происходит под воздействием исторических, географических, ресурсных, демографических и других факторов. Это еще и субъективный процесс, испытывающий на себе воздействие управленческих мер, в первую очередь, со стороны региональной администрации.

Ключевой тенденцией последнего времени является ускорение перемен в условиях функционирования всего государственного сектора. Все это заставляет менять базовую модель регионального менеджмента, так как административная модель управления перестала отвечать новым условиям развития общества. В процессе управления развитием террито-

рий широкое применение находят современные управленческие технологии, отработанные в рамках организаций всех форм собственности. Одной из таких технологий является региональный маркетинг.

Применение традиционных информационно-коммуникационных средств для достижения этих целей не обеспечивает необходимого уровня гибкости управления. Кроме того, это достаточно дорого, что в условиях скудных финансовых возможностей регионов ограничивает их применение.

Успешно преодолеть эти затруднения позволяют бурно развивающиеся в последние годы передовые электронные информационные технологии и, в частности, Интернет. Интернет предоставляет принципиально новые возможности для реализации регионального маркетинга, так как обеспечивает доступ к мировым информационным ресурсам, широкий охват целевой аудитории, надежную и быструю обратную связь, что облегчает оценку эффективности проводимой маркетинговой политики.

В последнее время принципы маркетинга и технологии Интернета получили широкое распространение в системе государственной и муниципальной службы для решения задач территориального управления.

**Региональный Интернет-маркетинг** – это деятельность по формированию электронной информационной среды, усилению и продвижению привлекательных внутренних условий, преимуществ региона для привлечения внешних по отношению к нему ресурсов (финансовых, человеческих, производственных и пр.). Эта деятельность предполагает предоставление структурированной информации об интересующих потребителей аспектах социально-экономического, политического положения региона, его преимуществах и направлениях развития с использованием технологических возможностей Интернета.

Региональный Интернет-маркетинг становится новым инструментом управления развитием территорий. Он обеспечивает открытость и доступность субъектов управления для потребителей ресурсов региона, позволяет проводить мониторинг и своевременный анализ изменений, происходящих в регионе и за его пределами, способствует координации процесса управления, облегчает контроль. Все это позволяет региональным субъектам управления адаптироваться к меняющимся условиям внешней и внутренней среды в максимально короткие сроки, а значит отвечать современным требованиям управления.

**Принципами формирования и использования** регионального Интернет-маркетинга являются:

- его ориентация на перспективы развития территории;
- демократичность информационного взаимодействия всех участников виртуального рынка вследствие того, что Интернет предоставляет, с одной стороны, свободный доступ к информации о территории и ее ресурсах, а с другой, возможность распространять информацию для широкого круга пользователей Интернета;
- целесообразность решения в Интернете только тех задач, связанных с развитием региона, которые лучше решать именно здесь с позиции соотношения затрат и возможного эффекта.

Субъекты регионального Интернет-маркетинга представляют собой все сферы социально-экономической жизни территорий и их развития. К ним относятся:

- представители федеральных органов власти;
- региональные и муниципальные органы власти и управления;
- производители товаров и услуг – промышленные и строительные предприятия, дилеры, дистрибьюторы, оптовики, предприятия гостиничного хозяйства, общественного питания, медицинского и пенсионного обслуживания, транспортной системы, системы связи, туристические агентства и операторы, банки, страховые организа-

ции, учреждения культуры и отдыха, учебные заведения;

- общественные организации – партии, движения, научные учреждения, спортивные комитеты и федерации.

**Функции субъектов регионального интернет-маркетинга** включают в себя:

- товарную политику – определение ассортимента, количества и качества ресурсов региона, востребуемых потребителями;
- ценообразование регионального продукта, включая управление затратами, которые несут внутренние и внешние потребители товаров и услуг региона;
- позиционирование и оценку конкурентоспособности регионального продукта – определение позиций региона в сравнении с другими регионами и формирование перспектив его развития;
- продвижение региона – проведение информационных, рекламных и PR-кампаний.

**Задачи регионального Интернет-маркетинга**

Задачи регионального Интернет-маркетинга определяются общими целями и направлениями осуществления региональной информационной политики (табл. 1).

*Таблица 1*

**Задачи регионального Интернет-маркетинга**

Задачи управления регионом	Технологические инструменты Интернет	Целевые группы	Инструментарий интернет-маркетинга
1	2	3	4
1.1. Создание благоприятного имиджа территории; 1.2. Разъяснение проводимой политики властей; 1.3. Освещение происходящих в регионе изменений	1) web-сайт; 2) электронная почта (E-mail); 3) почтовые реестры в электронной почты (Listserv); 4) проведение видеоконференций (Video conferencing)	Потребители ресурсов территории, ее товаров и услуг	1) размещение краткой информации на популярных серверах (Yellow Pages); 2) регистрация сайта в поисковых системах и каталогах (отечественных и зарубежных); 3) обмен ссылками с региональными и дружественными сайтами, а также специализированными серверами ("http://www.Rov.ru/); 4) размещение ссылок на положительные отзывы о регионе в прессе и других источниках информации (или создание специализированного раздела на сайте); 5) списки рассылки; 6) индивидуальные письма; 7) текстовые блоки; 8) сетевые конференции, видеоконференции; 9) рассылки новостей сервера (или информирование на web-сайте о новостях)

Окончание табл. 1

1	2	3	4
2.1. Изучение рынка; 2.2. Анализ ожиданий и предпочтений потребителей ресурсов территории; 2.3. Мониторинг общественного мнения	1) World Wide Web, информационный поиск и его программное обеспечение; 2) электронная почта (E-mail); 3) почтовые реестры в электронной почте (Listserv); 4) электронные доски объявлений (Usenet); 5) собственный сайт; 6) счетчики посещений сайта	1) субъекты регионального управления; 2) потребители регионального продукта	1) комплектование обзоров прессы, статистической информации, аналитических материалов, размещенных на различных серверах WWW; 2) списки рассылки; 3) дискуссионные листы; 4) конференции Usenet (группы новостей); 5) опросы, голосования, анкетирования, интервью в режиме on-line (в том числе с использованием Cgi -баннеров); 6) наблюдение (имплицитный подход) и сотрудничество (эксплицитный подход)
3.1. Завязывание и поддержание деловых контактов с внутренними и внешними по отношению к территории партнерами; 3.2. Создание благоприятных условий для взаимодействия муниципальных, региональных, федеральных субъектов управления	1) web-сайт; 2) электронная почта (E-mail); 3) почтовые реестры в электронной почте (Listserv); 4) голосовая связь (Voice mail); 5) проведение видеоконференций (Video conferencing); 6) многопользовательский диалог (MUDS); 7) ретрансляция беседы в Интернет (IRC - Internet Relay Chat); 8) интернет-пейджеры	1) потребители ресурсов территории, ее товаров и услуг; 2) субъекты регионального и муниципального управления; представители федеральных органов власти	1) списки рассылки; 2) рассылки новостей сервера; 3) базы данных ответов на наиболее часто задаваемые вопросы; 4) консультационная поддержка в режиме on-line; 5) сетевые фокус-группы, профессиональные форумы, конференции, чат-клубы; 6) управленческие игры, тренинги и дистанционное обучение в онлайн-режиме; 7) Интранет-серверы; 8) электронные базы данных
4.1. Поддержка региональных производителей товаров/услуг, продвижение их продукции на внутренние и внешние рынки; 4.2. Стимулирование спроса населения на товары услуги, предоставляемые местными товаропроизводителями/организациями	Такие же, как в п. 2-3	1) производители товаров/услуг; 2) потребители регионального продукта	1) экстранет-серверы; 2) виртуальные выставки; 3) электронные магазины; 4) аукционы в режиме on-line; 5) интернет-банки, брокерские серверы и платежные системы; 6) размещение баннеров на популярных страницах; 7) участие в баннерообменных сетях; 8) тот же ассортимент средств, что и в п. 1-3

**Библиографический список**

1. **Друкер, П.Ф.** Рынок: как выйти в лидеры: пер. с англ. / П.Ф. Друкер. – М.: Бук, 1992. С. 252.
2. **Морозова, Г.А.** Продвижение продукта в регионе / Г.А. Морозова. – Н. Новгород: Издательство Волго-Вятской академии государственной службы, 2004. – 175 с.
3. **Рычкова, Н.В.** Особенности маркетинговых инноваций: учеб. пособие / Н.В. Рычкова. – М.: Кнорус, 2005. С. 10.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**G.A. Morozova**

**COMPETITIVENESS OF THE REGION**

The article in question is devoted to one of the most actual problems- strengthening the competitiveness of the region by using marketing research in order to form the strategic development of the region. The article analyses market instruments. Nowadays the region may involve world resources for its development but in this case it will compete with not only Russian competitors but in many cases with abroad territories. To offer itself to the world it is crucial to define what the region possesses and what it can offer. i.e. to solve a number of problems concerning territorial marketing.

*Key words:* analysis of portfolio of activities, organizational structure analysis, ideal goods, investment, engineering, integral index of competitiveness, intellectual investaent, market research,

## СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 342.9

Н.Н. Федосеева

### ДОСТУП ОБЩЕСТВЕННОСТИ К ИНФОРМАЦИИ О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СУДОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ<sup>1</sup>

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета

В статье описаны основные положения Федерального закона от 22 декабря 2008 года № 262-ФЗ «Об обеспечении доступа к информации о деятельности судов в РФ» такие, как: принципы и требования к информации, вопросы организации доступа, формы и способы предоставления информации и др.; а также указаны достоинства и недостатки данного федерального закона.

*Ключевые слова:* право на доступ к информации, информация о деятельности судов, пользователи информации, судебный акт, организация доступа к информации, формы и способы доступа.

1 июля 2010 года на территории Российской Федерации вступил в действие Федеральный закон от 22 декабря 2008 года № 262-ФЗ «Об обеспечении доступа к информации о деятельности судов в РФ» (далее - ФЗ), принятие которого однозначно можно считать положительным явлением, показывающим серьезное отношение руководства страны к праву граждан на доступ к информации, являющемуся одним из ключевых в цивилизованных государствах. Будучи важной и необходимой новеллой российского законодательства, принятой в обеспечение норм Конституции РФ о праве граждан на доступ к информации, данный закон содержит ряд фундаментальных положений, которые представляется необходимым кратко осветить.

Можно сказать, что данный ФЗ, в совокупности с Федеральным законом от 8 февраля 2009 года «Об обеспечении доступа к информации о деятельности государственных органов и органов местного самоуправления» является частью «антикоррупционных правовых инициатив Президента РФ Д.А. Медведева»<sup>2</sup>. К наиболее известным из них можно отнести:

- Национальный план противодействия коррупции, утвержденный Президентом РФ 31 июля 2008 г. № Пр-1568<sup>3</sup>;
- Федеральный закон от 25 декабря 2008 г. № 273-ФЗ «О противодействии коррупции»<sup>4</sup>;
- Федеральный закон от 25 декабря 2008 г. № 274-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «О противодействии коррупции»<sup>5</sup>;

© Федосеева Н.Н., 2010.

<sup>1</sup> Статья выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

<sup>2</sup> Шевердяев, С.Н. Преимущества и недостатки Федерального закона «Об обеспечении доступа к информации о деятельности государственных органов и органов местного самоуправления» // Конституционное и муниципальное право, 2009, № 14

<sup>3</sup> Российская газета. 5 августа 2008 г. № 164.

<sup>4</sup> Собрание законодательства РФ. 2008. № 52 (ч. 1). Ст. 6228.

<sup>5</sup> Собрание законодательства РФ. 2008. № 52 (ч. 1). Ст. 6229.

- Федеральный конституционный закон от 25 декабря 2008 г. № 5-ФКЗ «О внесении изменения в статью 10 Федерального конституционного закона «О Правительстве Российской Федерации»<sup>6</sup>;
- Федеральный закон от 25 декабря 2008 г. № 280-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с ратификацией Конвенции Организации Объединенных Наций против коррупции от 31 октября 2003 г. и Конвенции об уголовной ответственности за коррупцию от 27 января 1999 г. и принятием Федерального закона «О противодействии коррупции»<sup>7</sup>.

Основной смысл анализируемого ФЗ состоит в том, что суды РФ (федеральные суды, конституционные (уставные) суды субъектов РФ и мировые судьи субъектов РФ, составляющие судебную систему РФ), Судебный департамент, органы Судебного департамента, органы судейского сообщества в пределах своих полномочий обязаны бесплатно обеспечить гражданам (физическим лицам), организациям (юридическим лицам), общественным объединениям, органам государственной власти и органам местного самоуправления (в ФЗ они именуется пользователями) доступ к полной и достоверной информации о деятельности судов, кроме информации, составляющей государственную или иную охраняемую законом тайну.

Статья 1 ФЗ указывает, что информацией о деятельности судов является информация, подготовленная в пределах своих полномочий судами, Судебным департаментом, органами Судебного департамента, органами судейского сообщества либо поступившая в них и относящаяся к деятельности судов. Законодательство РФ, устанавливающее порядок судопроизводства, полномочия и порядок деятельности судов, Судебного департамента и его органов, органов судейского сообщества, судебные акты по конкретным делам и иные акты, регулирующие вопросы деятельности судов, также относятся к информации о деятельности судов. Под судебным актом закон понимает решение, вынесенное в установленной соответствующим законом форме по существу дела, рассмотренного в порядке осуществления конституционного, гражданского, административного или уголовного судопроизводства либо судопроизводства в арбитражном суде. К судебным актам относятся также решения судов апелляционной, кассационной и надзорной инстанций, вынесенные в установленной соответствующим законом форме по результатам рассмотрения апелляционных или кассационных жалоб (представлений) либо пересмотра решений суда в порядке надзора;

Действие анализируемого ФЗ не распространяется на:

- 1) порядок осуществления конституционного, гражданского, административного и уголовного судопроизводства, судопроизводства в арбитражном суде, порядок производства в квалификационных коллегиях судей;
- 2) порядок исполнения судебных актов;
- 3) отношения, связанные с обеспечением доступа к персональным данным, обработка которых осуществляется судами, Судебным департаментом, органами Судебного департамента, органами судейского сообщества;
- 4) порядок информационного взаимодействия, осуществляемого судами, Судебным департаментом, органами Судебного департамента, органами судейского сообщества.

Что касается организации доступа пользователей к информации о деятельности судов, то ФЗ относит ее обеспечение к полномочиям судов, Судебного департамента, органов Судебного департамента, органов судейского сообщества с учетом законодательства РФ о судах. Закреплено, что они в целях организации доступа пользователей к информации, а также для взаимодействия со средствами массовой информации определяют соответствующие структурные подразделения своих аппаратов или уполномоченных должностных лиц. Права и обязанности указанных подразделений и должностных лиц устанавливаются соответствен-

<sup>6</sup> Собрание законодательства РФ. 2008. № 52 (ч. 1). Ст. 6206.

<sup>7</sup> Собрание законодательства РФ. 2008. № 52 (ч. 1). Ст. 6235.

но регламентами судов и (или) иными актами, регулирующими вопросы внутренней деятельности судов, актами Судебного департамента, актами органов судейского сообщества.

Основными принципами обеспечения доступа являются открытость и доступность информации, за исключением случаев, предусмотренных законодательством РФ; достоверность информации и своевременность ее предоставления; свобода поиска, получения, передачи и распространения информации о деятельности судов любым законным способом; соблюдение прав граждан на неприкосновенность частной жизни, личную и семейную тайну, защиту их чести и деловой репутации, права организаций на защиту их деловой репутации; соблюдение прав и законных интересов участников судебного процесса при предоставлении информации о деятельности судов; невмешательство в осуществление правосудия при предоставлении информации о деятельности судов.

Основными требованиями при обеспечении доступа к информации о деятельности судов являются: достоверность предоставляемой информации о деятельности судов; соблюдение сроков и порядка предоставления информации о деятельности судов; изъятие из предоставляемой информации о деятельности судов сведений, доступ к которым ограничен; создание организационно-технических и других условий, необходимых для реализации права на доступ к информации о деятельности судов, а также создание государственных информационных систем; учет расходов, связанных с обеспечением доступа к информации о деятельности судов, при планировании бюджетного финансирования судов, Судебного департамента, органов Судебного департамента.

Примечательно, что пользователи имеют право получать достоверную информацию о деятельности судов, не обосновывая необходимость получения запрашиваемой информации, доступ к которой не ограничен; обжаловать в установленном законом порядке действия (бездействия) должностных лиц, нарушающие право на доступ к информации о деятельности судов и установленный порядок его реализации; требовать в установленном законом порядке возмещения вреда, причиненного нарушением его права на доступ к информации о деятельности судов.

Данные положения закона являются важной гарантией обеспечения права граждан РФ на доступ к информации.

Закон закрепляет различные способы для обеспечения доступа к информации о деятельности судов (перечислены далее).

1. Присутствие граждан (физических лиц), в том числе, представителей организаций (юридических лиц), общественных объединений, органов государственной власти и органов местного самоуправления, в открытом судебном заседании.

2. Обнародование (опубликование) информации о деятельности судов в средствах массовой информации в соответствии с законодательством о средствах массовой информации или с законодательством, устанавливающим порядок осуществления судопроизводства в РФ.

3. Размещение информации о деятельности судов в информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

В сети Интернет размещается:

- общая информация о суде (наименование суда, наименование судебного района, на территорию которого распространяется юрисдикция суда, почтовый адрес, адрес электронной почты (при наличии), номер телефона, по которому можно получить информацию справочного характера; организационная структура суда – пленум суда, президиум суда, палаты суда, судебные коллегии, постоянные судебные присутствия, консультативные и (или) совещательные органы (при наличии), а также структурные подразделения аппарата суда; полномочия суда; перечень законов, регламентирующих деятельность суда; регламент суда, инструкция по делопроизводству в суде и иные акты, регулирующие вопросы внутренней деятельности суда; фамилии, имена и отчества председателя суда, заместителей председателя суда, судей, руководителя аппарата суда, а при согласии указанных лиц – иные сведения о

них; основания наделения полномочиями председателя суда, заместителей председателя суда, судей; перечни информационных систем и банков данных, находящихся в ведении суда (при наличии); наименование учрежденного судом средства массовой информации (при наличии);

- информация, связанная с рассмотрением дел в суде: требования, предъявляемые к форме и содержанию документов, используемых при обращении в суд, и (или) образцы этих документов, порядок представления указанных документов в суд; б) сведения о размере и порядке уплаты государственной пошлины по категориям дел, подлежащих рассмотрению в суде; сведения о находящихся в суде делах: регистрационные номера дел, их наименования или предмет спора, информация о прохождении дел в суде, а также сведения о вынесении судебных актов по результатам рассмотрения дел (назначено к слушанию с указанием даты, времени и места проведения судебного заседания, рассмотрено, отложено, приостановлено, прекращено, заключено мировое соглашение, заявление оставлено без рассмотрения, иное с учетом особенностей соответствующего судопроизводства); тексты судебных актов, сведения об их обжаловании и о результатах такого обжалования, а при опубликовании судебных актов - сведения об источниках их опубликования; порядок обжалования судебных актов; разъяснения, обобщения и обзоры по вопросам судебной практики рассмотрения судами дел; порядок ознакомления с материалами дела лиц, участвующих в деле; номера телефонов, по которым можно получить информацию справочного характера, в том числе о прохождении находящихся в суде дел;

- тексты проектов нормативных правовых актов, внесенных судами в законодательные (представительные) органы государственной власти (для судов, являющихся субъектами права законодательной инициативы);

- данные судебной статистики, предоставляемые в объеме, установленном в пределах своих полномочий Конституционным Судом РФ, Верховным Судом РФ, Высшим Арбитражным Судом РФ, Судебным департаментом;

- информация о кадровом обеспечении суда: порядок наделения судей полномочиями, требования к кандидатам на должность судьи и порядок их отбора; сведения о вакантной должности судьи, вакантных должностях государственной службы в аппарате суда; порядок поступления граждан на государственную службу в аппарат суда, квалификационные требования к кандидатам на замещение вакантных должностей государственной службы в аппарате суда; условия проведения и результаты конкурсов на замещение вакантных должностей государственной службы в аппарате суда; номера телефонов, по которым можно получить информацию по вопросам замещения вакантной должности судьи, вакантных должностей государственной службы в аппарате суда;

- информация о порядке и времени приема граждан (физических лиц), в том числе представителей организаций (юридических лиц), общественных объединений, органов государственной власти и органов местного самоуправления, порядке рассмотрения их обращений по вопросам организации деятельности суда, жалоб на действия (бездействие) судей или работников аппарата суда, не связанные с рассмотрением конкретных дел, обжалованием судебных актов и процессуальных действий судей, а также номер телефона, по которому можно получить информацию справочного характера;

- сведения о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для нужд судов в соответствии с законодательством РФ о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципальных нужд.

Также ФЗ закрепляет особенности размещения в сети Интернет текстов судебных актов. Так, установлено, что тексты судебных актов, за исключением приговоров, размещаются в сети Интернет после их принятия в полном объеме. А тексты приговоров размещаются после их вступления в силу. В целях обеспечения безопасности участников судебного процесса из текста судебных актов исключаются персональные данные, кроме фамилий и инициалов

судей (судьи), рассматривавших (рассматривавшего) дело, а также прокурора и адвоката, если они участвовали в судебном разбирательстве. Вместо исключенных персональных данных используются инициалы, псевдонимы или другие обозначения, не позволяющие идентифицировать участников судебного процесса.

При размещении в сети Интернет текстов судебных актов, предусматривающих положения, которые содержат сведения, составляющие государственную или иную охраняемую законом тайну, эти положения исключаются из текстов судебных актов. Не подлежат размещению в сети Интернет тексты судебных актов, вынесенных по делам: 1) затрагивающим безопасность государства; 2) возникающим из семейно-правовых отношений, в том числе по делам об усыновлении (удочерении) ребенка, другим делам, затрагивающим права и законные интересы несовершеннолетних; 3) о преступлениях против половой неприкосновенности и половой свободы личности; 4) об ограничении дееспособности гражданина или о признании его недееспособным; 5) о принудительной госпитализации гражданина в психиатрический стационар и принудительном психиатрическом освидетельствовании; 6) о внесении исправлений или изменений в запись актов гражданского состояния; 7) об установлении фактов, имеющих юридическое значение, рассматриваемых судами общей юрисдикции.

4. Размещение информации о деятельности судов в занимаемых судами, Судебным департаментом, органами Судебного департамента, органами судейского сообщества помещениях в доступных для посетителей местах на информационных стендах и (или) технических средствах аналогичного назначения для ознакомления пользователей информацией с текущей информацией о деятельности соответствующего суда.

5. Ознакомление пользователей с информацией о деятельности судов, находящейся в архивных фондах в порядке, установленном законодательством РФ об архивном деле и принимаемыми в соответствии с ним иными нормативными правовыми актами, а с информацией о деятельности конституционных (уставных) судов субъектов РФ и мировых судей – также в порядке, установленном законодательством субъектов РФ и принимаемыми в соответствии с ним иными нормативными правовыми актами субъектов РФ.

6. Предоставление пользователям информацией по их запросу информации о деятельности судов.

Кроме того, ФЗ определяет формы предоставления запрашиваемых сведений. Так, информация о деятельности судов может предоставляться в устной форме (во время приема) и в виде документированной информации, в том числе, в виде электронного документа (по сетям общего пользования), а также по телефону на основании устного или письменного запроса пользователей.

Споры, связанные с освещением деятельности судов в средствах массовой информации, разрешаются судом в установленном законом порядке, в том числе, во внесудебном порядке органами или организациями, к компетенции которых относится рассмотрение информационных споров.

Решения и действия (бездействие) должностных лиц, нарушающие право на доступ к информации о деятельности судов, могут быть обжалованы в порядке, установленном законодательством РФ. Контроль за обеспечением доступа к информации о деятельности судов осуществляют в пределах своих полномочий председатели судов, Генеральный директор Судебного департамента при Верховном Суде РФ, руководители органов Судебного департамента, уполномоченные на осуществление указанного контроля члены органов судейского сообщества.

Кроме указанных позитивных положений ФЗ, можно указать и на ряд недостатков. Указанный в ст. 14 широкий состав сведений, размещаемых судами в Интернете, является всего лишь своеобразной коллекцией, из которой суды вправе выбирать, какие сведения о себе обнародовать в сети Интернет. Вместо этого здесь должна быть зафиксирована четкая

обязанность размещать в Интернете все без исключения сведения, которые не относятся к информации ограниченного доступа.

Также в законе не используются «обязывающие» формулировки. Например, статья 10 – «Суды, Судебный департамент, органы Судебного департамента для размещения информации о деятельности судов *используют сеть Интернет*, в которой создают свои официальные сайты с указанием адресов электронной почты, по которым может быть направлен запрос. В случае, если суд общей юрисдикции (районный суд, гарнизонный военный суд, мировой судья) не имеет официального сайта и возможности размещать информацию о своей деятельности в сети Интернет, указанная информация *может размещаться* на официальном сайте органа Судебного департамента в субъекте РФ, на территории которого находится этот суд общей юрисдикции».

Закон сопровождается обилием отсылочных норм на акты, которые должны принять в его развитие исполнители. Например, п.2 ст. 10 «Порядок создания официальных сайтов, размещения на них информации о деятельности судов, сроки обновления указанной информации с учетом требований настоящего ФЗ устанавливаются в пределах своих полномочий Конституционным Судом РФ, Верховным Судом РФ, Высшим Арбитражным Судом РФ, Судебным департаментом, а в отношении конституционных (уставных) судов субъектов РФ – субъектами РФ. Или положения статьи 12 «Граждане (физические лица), в том числе представители организаций (юридических лиц), общественных объединений, органов государственной власти и органов местного самоуправления, имеют право присутствовать в открытом судебном заседании, а также фиксировать ход судебного разбирательства в порядке и формах, которые предусмотрены законодательством РФ. Порядок доступа лиц, указанных в части 1 настоящей статьи, в залы судебных заседаний, занимаемые судами помещения устанавливается регламентами судов и (или) иными актами, регулирующими вопросы внутренней деятельности судов».

К особенностям анализируемого ФЗ относится положения п. 2 ст. 2 «Если законодательством РФ, устанавливающим порядок судопроизводства, полномочия и порядок деятельности судов, Судебного департамента, органов Судебного департамента, органов судебного сообщества, или законодательством субъектов РФ, устанавливающим полномочия и порядок деятельности конституционных (уставных) судов субъектов РФ и мировых судей, предусматриваются иные требования к предоставлению информации о деятельности судов, чем те, которые определены настоящим ФЗ, то положения настоящего ФЗ применяются с учетом требований законодательства РФ, а также законодательством субъектов РФ».

То есть в рассматриваемом случае правило «поздняя юридическая норма имеет большую юридическую силу, чем ранее принятая» – не действует. Хотя, на наш взгляд, в данном случае должно применяться правило о большей юридической силе специальной нормы, то есть нормы рассматриваемого ФЗ, гарантирующей обеспечение права граждан РФ на доступ.

Одним из главных вопросов, связанных с перспективами реализации данного Закона, является проблема недостаточной определенности правового режима информации ограниченного доступа.

Статья 5 данного ФЗ закрепляет, что «Доступ к информации о деятельности судов ограничивается, если указанная информация отнесена в установленном федеральным законом порядке к сведениям, составляющим государственную или иную охраняемую законом тайну. Перечень сведений, относящихся к информации ограниченного доступа, а также порядок отнесения указанных сведений к информации ограниченного доступа устанавливаются федеральным законом». А поскольку единый федеральный закон о различных видах тайн в РФ отсутствует, и некоторые виды тайн регулируются на подзаконном уровне, при реализации приведенных норма ФЗ могут возникнуть сложности.

Таким образом, можно утверждать, что эффективная реализация ФЗ «Об обеспечении доступа к информации о деятельности судов в РФ» позволит не только решить проблемы

доступа общественности к информации о деятельности судов, но и поднять уровень эффективности самой судебной власти, сделать процедуру принятия правоприменительных решений прозрачной для общества, а также повысить социальную ответственность судей и других должностных лиц. Вместе с тем главной задачей для достижения указанных благих целей является неукоснительное исполнение данного закона должностными лицами.

*Дата поступления  
в редакцию 12.10.2010*

**N.N. Fedoseeva**

## **PUBLIC ACCESS TO INFORMATION ABOUT THE ACTIVITIES OF COURTS**

The article describes conditions of the federal law “On Access to information about activities of courts” on December 22, 2008, such as principles and requirements to information, providing access to information, forms and methods of access, advantages and disadvantages of this federal law.

*Kew words:* right to information, information about activities of courts, users of information, judicial acts, providing access to information, forms and methods of access.

УДК 316.42

Ю.В. Саркисян

**КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД КАК ОСНОВА МОДЕРНИЗАЦИИ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИИ**

Волго-Вятская академия государственной службы

Целью статьи является анализ проблем очередного этапа реформирования российской высшей школы. Автор рассматривает его основу – компетентностный подход – не как очередную терминологическую моду, а в качестве коллективного опыта экономически развитых стран. Выделяется ряд концептуальных проблем, не имеющих однозначного решения как в странах Европы и Северной Америки, так и в Российской Федерации.

*Ключевые слова:* высшая школа, квалификация, компетентность, модернизация, технология.

Российское высшее образование переживает очередной этап реформирования. Его сущность определяется необходимостью модернизации всей системы подготовки будущих работников. Как известно, модернизация предполагает полный или частичный отказ от прежнего способа развития и принятие нового. Сегодня мы пытаемся отказаться от традиционного для России «зуновского» подхода – решении задач формирования у учащегося определенной заранее системы знаний, умений и навыков. Вместо этой, принятой еще в XIX столетии задачи, ключевой установкой становится ориентация на формирование компетенций студента. Что это – очередная мода или принятие способа обучения, который десятилетиями отработывался в странах Европы и Северной Америки? Если мода, то она рано или поздно уйдет в прошлое. Можно вспомнить, например, какие надежды возлагались в системе общего образования на концепции личностно-ориентированного или развивающего обучения. Массовая мода на эти подходы прошла, а по-настоящему массовыми сами подходы не стали. Не происходит ли то же самое сегодня и с компетентностной моделью?

Не претендуя на исчерпывающие ответы, попробуем рассмотреть компетентностный подход как коллективно созданный западными экономически развитыми странами способ деятельности высшей школы.

Компетентностный подход к образованию впервые появился в Соединенных Штатах Америки в 70-е гг. прошлого века. В 1999 г. 29 стран Европы в Болонской декларации принимают его в качестве основы формирования единого мирового образовательного пространства. Сегодня Болонское движение объединяет 46 стран, включая Россию. А в Правительственной Концепции модернизации российского образования на период до 2010 года этот подход провозглашен основой реформирования российского общего (среднего) образования. О проблемах реализации компетентностного подхода, в том числе, и в системе непрерывного образования России, написано немало научных исследований и публицистических статей. В рамках перехода к стандартам образования третьего поколения поток публикаций на эту тему возрастает по экспоненте.

В то же время и в научном сообществе, и в педагогической среде до сих пор отсутствует четкое понимание его сущности и технологической основы, его значения для социально-экономического развития страны и успешности человека. Более того, нередко ориентация системы образования на формирование компетентности учащихся, студентов, слушателей системы дополнительного профессионального образования воспринимается как новая терминология, по сути ничего не меняющая в образовательном процессе.

Представляется, что следует согласиться с теми исследователями, которые рассматривают его не в системе «образование плюс компетентностный подход», а как новую образовательную парадигму, полностью меняющую цели, ценности, содержание и технологии, нор-

мы и идеалы всей системы образования (сошлемся на таких исследователей как В.И. Байденко, А.Г. Бермус, И.А. Зимняя, Г.Б. Корнетов, Н.В. Кузьмина, А.К. Маркова, А.Н. Новиков, Л.А. Петровская, Ю.Г. Татур и др.). Это не может затронуть лишь отдельные сегменты образовательной системы, а ведет к трансформации всего социального института образования, затрагивает все его уровни – от общего до послевузовского, от решения задач социализации школьника до формирования готовности работающего специалиста к непрерывному воспроизводству своей ценности на рынке труда.

В условиях возрастающих темпов развития общество, как на уровне государственных требований, так и на уровне рынка труда, предъявляет к работнику требования, связанные не только с понятием «квалификация», но и с понятием «профессиональная компетентность». Не случайно компетентностный подход (competence-based education, CBE) участниками Болонского процесса признан в качестве нормативного для международной системы образования. Международное образовательное сообщество разводит понятие компетентности для уровня общего и профессионального образования. В первом случае, ЮНЕСКО выделяет базовые составляющие компетентности, обеспечивающие для индивида социальную адаптацию – научиться познавать, научиться делать, научиться жить вместе, научиться жить [1, с. 37]. Во втором случае речь идет о готовности работника соответствовать реальной сложности решаемых профессиональных задач в нестабильной социальной, рыночной и профессиональной среде.

Традиционный подход в профессиональном образовании ориентирован на понятие «профессиональная квалификация». Квалификация отражает уровень формального образования или профессиональной подготовки работника, т.е. полученное им в той или иной сфере систематическое образование, подтвержденное сертификатом государственного или соответствующего ему образца. Но квалификация, полученная в процессе обучения, не гарантирует готовность работника к изменению количественных и качественных параметров своей подготовки в соответствии с меняющимися профессиональными задачами.

Проблема преодоления разрыва между формально полученным образованием и готовностью к реальному решению профессиональных задач в условиях рынка по-разному решалась зарубежными и российскими исследователями. Так, Чикагской экономической школой была предложена теория человеческого капитала (Г. Беккер, Э. Денисон, Д. Минцер, Т. Шульц и др.), американскими и европейскими учеными разработаны многочисленные концепции управления человеческими ресурсами (М. Армстронг, К. Легге, С. Перкинс, С. Шортланд и др.) Отечественные исследователи либо разводили понятия формальной и реальной квалификации, отождествляя первое понятие с количественными, а второе с качественными характеристиками подготовки работника [2, с.47–48], либо разрабатывали концепции профессионализма (Е.А. Климов, Н.В. Кузьмина, Е.А. Ирисов, Б.Г. Туренко и др.).

Компетентностный подход объединяет проблему квалификации (формализованных и систематически полученных знаний, умений и навыков) и проблему профессионализма – готовности работника реализовывать знания, умения и навыки в процессе профессиональной деятельности. Он предполагает формирование способности и готовности работника к результативной деятельности на основе постоянного обновления своей профессиональной подготовки.

В российской теории и практике образования понятия «компетенция», «компетентный» и «компетентность» ранее широко не использовались, и на сегодняшний день не существует однозначного понимания этих терминов. Сложность терминологического определения связана как с существованием их различных смыслов в зарубежных концепциях компетентностного подхода, так и с тем, что английский термин «competence» переводится на русский язык двояко – как компетенция и как компетентность.

Рассмотрим основные подходы к пониманию терминов «компетентность» и «компетенция». Ряд исследователей их практически отождествляют, что подчеркивает, например, академик РАО И.А. Зимняя при анализе становления новой парадигмы

образования [3]. Тем не менее, в мировой практике сложилась традиция разводить эти понятия.

Термин «компетенция» происходит от латинского «competentis» и дословно обозначает "принадлежность по праву", то есть круг вопросов, в котором данное лицо обладает знаниями, позволяющими добиваться определенного результата. Историко-правовая интерпретация термина определяет компетенцию как область права, в которой надлежит разбираться лицу или группе лиц, принимающих решения в судебной-правовой деятельности, а компетентность – как уровень способности конкретного лица эффективно действовать в рамках компетенции.

В теорию образования термин «компетенция» вошел в 1965 г. из сферы лингвистики (Н. Хомский). Он позволил разграничить знание языка и способность индивида использовать его для решения проблем в процессе жизнедеятельности. Знание содержит лишь скрытую возможность использования языка – компетенцию. Компетентность в лингвистическом контексте выступает способностью использовать язык, приобретенной на основе личного опыта, соответствующих личных усилий и соответствующей мотивации [4, с. 9–10]. Еще в словаре В. Даля компетентность отождествляется с полноправностью, со способностью человека быть призванным и признанным [5, с. 148]. Словарь иностранных слов приводит следующее определение: «компетентный (лат. competens, competentis – соответствующий, способный) – знающий, сведущий в определенной области; имеющий право по своим знаниям или полномочиям делать или решать что-либо, судить о чем-либо» А компетенцию как «1) круг полномочий какого-либо органа или должностного лица; 2) круг вопросов, в которых данное лицо обладает познаниями, опытом» [6, с. 247]. Толковый словарь русского языка С.И. Ожегова определяет компетенцию как: а) круг вопросов, явлений, в которых данное лицо обладает авторитетностью, познанием, опытом; б) круг полномочий, область подлежащих чьему-нибудь ведению вопросу, явлений (право). А компетентность – как осведомленность или авторитетность в определенных вопросах [7].

В последней трети XX века в зарубежных и отечественных исследованиях по эдьюкологии – науки об образовании взрослых – складывается общепринятое понимание профессиональной компетентности как сложной структуры, состоящей из большого числа элементов, в совокупности обеспечивающих эффективность профессиональной деятельности работника [8]. На становление компетентного подхода в профессиональном образовании наиболее влияние оказала теория компетентности Дж. Равена. Компетентность, пишет он, «состоит из большого числа компонентов, многие из которых относительно независимы друг от друга, ... некоторые компоненты относятся скорее к когнитивной сфере, а другие – к эмоциональной, ... эти компоненты могут заменять друг друга в качестве составляющих эффективного поведения» [9, с. 253]. Равен под составными частями или «видами компетентности» понимает «мотивированные способности», которые в его теории составляют достаточно обширный список. Эти «виды компетентности» как отдельные элементы общей профессиональной компетентности принято обозначать как компетенции.

Однако отечественные исследователи по-разному определяют понятие профессиональной компетентности. Ее сущность сводится:

- к совокупности профессиональных свойств (Л.И. Анциферова);
- к сложной единичной системе внутренних психических состояний и свойств личности специалиста (Ю.В. Варданян);
- к способности реализовать профессионально-должностные требования на определенном уровне (И.Г. Климкович);
- к способности к профессиональному самообразованию (А.К. Маркова);
- к гармоническому сочетанию знаний, умений и навыков, а также способов выполнения профессиональной деятельности (Л.М. Митина);
- к устойчивой способности к деятельности со «знанием дела» (В.И. Огарев);
- к способности к актуальному выполнению деятельности (М.А. Чошанов) и т. д.

Применительно к системе высшего профессионального образования компетентность может рассматриваться как комплекс профессионально-личностных качеств работника, обеспечивающих за счет постоянного обновления результативность в решении профессиональных задач на уровне требования общества, рынка, профессиональной среды. Профессиональная компетентность есть система локальных компетентностей: коммуникативной, лингвистической, правовой, социальной, эмоциональной, аналитической, конфликтологической и др. Отдельная компетенция, как элемент локальной компетентности, предполагает наличие знаний, умений и навыков, позволяющих решать конкретные проблемы в сферах общения, организации деятельности, разработки управленческих решений и т.д.

Следовательно, профессиональная компетентность человека есть система его профессионально-личностных компетенций, обуславливающих его профессиональную, личностную и социальную успешность. Компетентностный подход соединяет формирование соответствующей квалификации с формированием человеческого капитала работника – его способности быть результативным за счет качества образования, производственной подготовки, профессиональной мобильности, здоровья, трудовой мотивации.

На международном уровне наиболее разработанной является проблема компетентности менеджера хозяйственной организации. Требования к профессиональной подготовке таких работников закреплены в ряде международных и национальных стандартов компетентности менеджера (стандарт SHL5 (международные стандарты управления – специалист, менеджер, руководитель группы), стандарт MCI (Management Charter Initiative) – международный стандарт компетентности менеджера, стандарт IPMA (Competence Baseline) – международные требования к компетентности специалистов по управлению проектами, и др.).

Компетентностный подход в сфере российского высшего профессионального образования требует дальнейших теоретических и эмпирических исследований. В том числе, по проблемам структуры компетентности (совокупности взаимосвязанных компетенций), условиям и факторам их формирования, методам диагностики, проблемам нормативного закрепления и методического обеспечения. Особое направление исследований, на наш взгляд, должно составить изучение адаптации работника к потенциальным изменениям профессиональной и социальной среды на основе инновационных форм обучения.

Сделаем выводы. Компетентностный подход не только к общему, но и к профессиональному образованию политически и нормативно утвердился в мировом и российском образовательном сообществах. Его теоретико-методологическая разработка и технологическая реализация являются актуальными, они отражают изменения в хозяйственном базисе общества, в направлении и динамике социальных и политических процессов современного мира. Проблемное поле исследований по проблеме компетентности формирует не только новое состояние наук об образовании и профессиональной деятельности человека, но и отражает становление новой парадигмы образования, ориентирующейся на деятельностное, активное создание человеком самого себя и среды своей жизнедеятельности.

В то же время характерными чертами современного этапа разработки проблем компетентностного подхода к образованию являются следующие:

1. В зарубежных и отечественных исследованиях отсутствует согласованность в понимании сущности компетентностного подхода. Подчеркнем, что согласованность, по нашему мнению, не означает наличие единого, общепризнанного подхода. Ускоряющаяся динамика общества, непредсказуемость возможных векторов развития, сложность задач, стоящих перед современным образованием, вряд ли могут быть отражены в единственной нормативной модели компетентности. Кроме того, полипарадигмальность современной науки делает возможным и необходимым использование разных методологий в разработке проблем образования. Тем не менее, необходима классификация сложившихся подходов, теорий и концепций, отражающих сущность компетентностного подхода. Особенно это значимо для проблем профессиональной компетенции.

2. Не полностью сформирована необходимая и достаточная для теоретического опи-

сания категориальная матрица. Так, в одном логическом ряду сосуществует понятия «компетенция», «компетентность», «квалификация», «профессиональное мастерство», «профессионализм». Они сопоставимы и отражают разные аспекты одного объекта исследования. Нередко их используют, рассматривая содержание понятия как очевидное, не требующее обоснования. В других случаях, эти понятия выступают синонимами. И первый, и второй подход противоречат одному из принципов методологии науки: если новое понятие вводится не для характеристики нового объекта, а для обозначения одной из его характеристик, научная рациональность требует разведения его с однопорядковыми категориями. Поэтому основные понятия компетентностного подхода требуют уточнения и соотнесения друг с другом.

3. В российской науке об образовании традиционно преобладают психолого-педагогические исследования. Речь идет не только о количественном преобладании. Педагогический анализ образовательного процесса и образовательной деятельности решает достаточно узкие задачи. При этом, как правило, связь образования с другими сферами человеческой жизнедеятельности остается на втором плане. Как следствие, из поля анализа часто «выпадают» проблемы взаимодействия образования с социетальной системой в целом, обусловленность процессов, характерных для образования, экономическими (включая рынок труда), политическими, социокультурными и другими факторами. Так, отечественная социология, на наш взгляд, достаточно активно разрабатывает проблемы образования на эмпирическом уровне. Но теоретико-концептуальному уровню социологического анализа компетентностного подхода внимания уделяется крайне мало. В связи с этим, нам представляется необходимым взаимодействия социологии образования с социологией профессий. Отметим, что эта отраслевая социология привлекает внимание лишь небольшого числа отечественных исследователей.

Кроме того, отсутствует теоретическая соотнесенность проблемы компетентностного подхода с «родственными» теориями в экономике и менеджменте. Теория человеческого капитала Чикагской экономической школы и ее последователей (Т. Шульц, Г. Беккер, Э. Денисон, Д. Минцер, М. Блауг, Р. Лэйард и др.), многочисленные концепции школы человеческих ресурсов также ориентированы на формирование таких характеристик работника, которые делают его труд эффективным, а его самого – востребованным на рынке труда. Эти теории анализируют проблему не только с точки зрения инвестиций в работника и создаваемой им стоимости. В описании объекта используются понятия мотивации, социально-личностной мобильности, креативности, готовности к инновациям и др. Представляется, что определенный выход в концептуальное пространство этих наук может быть достаточно эвристическим как для социологии образования, так и для эдьюкологии в целом.

4. При наличии большого числа разноплановых теоретических исследований почти отсутствует выход на технологический уровень. Концептуальные схемы, безусловно, составляют важнейший компонент любого исследования. На это указывал еще предшественник И. Ньютона Галилео Галилей в своем учении о «теоретической нагруженности опыта». И любое эмпирическое исследование начинается с выявления теоретико-методологических оснований. Но полученные в результате данные о социальных фактах «зависают» без технологической операционализации. Какой должна быть реальная система образования на национальном, отраслевом, региональном, вузовском уровнях, чтобы она обеспечивала не просто трансляцию информации и формирование минимально требуемого набора профессиональных умений, но создавала у работника основу компетентности сегодняшнего дня и мотивацию для самостоятельного формирования компетенций будущего? Какие технологии образования адекватны компетентностному подходу? Эти и другие вопросы еще ждут обоснованных ответов.

#### Библиографический список

1. Байденко, В.И. Модернизация профессионального образования: современный этап. Европейский фонд образования / В.И. Байденко, Д. ван Зантворт. – М., 2003.

2. **Добреньков, В.И.** Социология: в 3 т. Социальная структура и стратификация / В.И. Добреньков, А.И. Кравченко. – М.: ИНФРА-М, 2000. Т. 2.
3. **Зимняя, И.А.** Ключевые компетенции - новая парадигма результата образования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aspirant.rggu.ru/article.html?id=50758>, свободный. – Загл. с экрана.
4. **Хомский, Н.** Аспекты теории синтаксиса / Н. Хомский. – М.: Мысль, 1972.
5. **Даль, В.** Толковый словарь живого великорусского языка. Т. 1-4 / В. Даль. – М.: Русский язык. 1998. Т. 2.
6. Словарь иностранных слов. – М.: Русский язык, 1989.
7. **Ожегов, С.И.** Толковый словарь русского языка / С.И. Ожегов, Ю.Н. Шведова. – М.: Издательство «Азъ», 1992.
8. **Онушкин, В. Г.** Образование взрослых: междисциплинарный словарь терминологии / Онушкин В. Г., Огарев Е.И. – СПб.: Изд-во РАО, 1995.
9. **Равен, Дж.** Компетентность в современном обществе: выявление, развитие и реализация: пер. с англ. / Дж. Равен. – М.: «Когито-Центр», 2002.

*Дата поступления  
в редакцию 12.10.2010*

**U.V. Sarkisan**

### **COMPETENCE APPROACH MODERNIZATION BASIS OF HIGHER SCHOOL IN RUSSIA**

Article purpose is the analysis of problems of the next stage of reforming of the Russian higher school. The author considers its basis – competence the approach – not as the next terminological fashion, and as collective experience of economically developed countries. A number of the conceptual problems which do not have the unequivocal decision both in the countries of Europe and the North America, and in the Russian Federation is allocated.

*Key words:* the higher school, qualification, competence, modernization, technology.

УДК 37.02

Т.Р. Бардинская, А.Т. Колденкова

**КОММУНИКАТИВНАЯ КОМПЕТЕНТНОСТЬ  
КАК ОСНОВНОЙ КОМПОНЕНТ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ  
СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ТУРИЗМ»**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

В статье показано, что на современном этапе развития российского общества основной целью профессиональной подготовки специалистов является формирование их профессиональной компетентности.

Программа обучения иностранному языку включает в себя как общеязыковую подготовку студентов, как и формирует их готовность к профессиональной межличностной коммуникации в сфере сервиса и туризма, что и является формированием коммуникативной и профессиональной компетентности студентов специальности «Туризм».

*Ключевые слова:* высшая школа, концепция модернизации, профессиональная компетентность, компетентностный подход, общеязыковая подготовка, профессиональная межличностная коммуникация, социально-культурный сервис и туризм.

Новые социально-экономические условия значительно изменили деятельность разных специалистов, потребовали расширения культурных и деловых связей с другими странами, что способствовало развитию туризма.

Усложнение требований к подготовке специалистов в образовательном пространстве вуза вызвано вхождением России в международное образовательное пространство. Это потребовало модернизации высшего профессионального образования с целью обеспечения соответствия качества подготовки специалистов уровню требований, предъявляемых к ним современным обществом.

Согласно концепции модернизации российского образования, основной целью профессионального образования в высшей школе является подготовка квалифицированного специалиста соответствующего уровня, конкурентоспособного, компетентного, способного к эффективной работе на уровне мировых стандартов.

В связи с бурным развитием индустрии туризма возникает потребность в совершенствовании профессиональной подготовки специалистов данного профиля, потребность в качественном управлении образовательным процессом. Данные специалисты в процессе работы испытывают затруднения, связанные с межличностным общением, взаимоотношениями с потребителями социально-культурных услуг. Это вызывает необходимость в совершенствовании системы подготовки специалистов по сервису и туризму.

Для таких специалистов профессионально значимым становится общение на иностранном языке. Оно выступает основным инструментом в их профессиональной коммуникации. Необходимость в совершенствовании профессиональной подготовки специалистов по сервису и туризму ставит проблему содержания и средств формирования профессиональной коммуникативной компетенции как важнейшего фактора межличностного общения на иностранном языке.

Для решения этой проблемы очень важно проанализировать профессиональную деятельность специалистов по сервису и туризму; определить роль и место иностранного языка в процессе подготовки специалистов.

Профессиональная подготовка специалистов по сервису и туризму становится эффективной, когда иностранный язык как профильная дисциплина выступает средством изучения, усвоения основных понятий индустрии туризма. Профессиональные тексты и методы обучения на занятиях по иностранному языку позволяют моделировать профессиональную деятельность специалистов по сервису и туризму, а именно, ситуации, связанные с обслуживанием туристов.

Наиболее трудным в процессе обучения иностранному языку является овладение нормами и правилами профессиональной коммуникации. В этой связи необходимо совместное изучение культуры и языка двух стран. Отбор содержания обучения, лексико-грамматических явлений, которые характерны для профессиональной деятельности специалистов по сервису и туризму, способствует практическому овладению моделями общения, особенностями национального характера носителей языка.

Программа подготовки специалистов в области сервиса и туризма существует в нашем университете уже восемь лет, и за это время был накоплен опыт обучения студентов иностранному языку.

Целями первого этапа обучения являются: совершенствование умения монологического высказывания и диалогической речи, особый акцент делается на фонетику и интонацию, грамматическую чистоту речи. Также очень важен психологический аспект, т.к. студенты с первого курса должны быть нацелены на общение с клиентами, без этого немыслима работа в сфере гостеприимства. И наша задача научить их этому, помочь осознать, что они – лицо страны и нашего города.

Затем начинается обучение деловому английскому языку. Данный этап включает в себя следующую тематику делового общения:

- цели деятельности компании;
- структура учреждения;
- трудоустройство;
- прием посетителей;
- ведение деловых переговоров;
- деловое общение по телефону и т.д.

Раздел курса, посвященный бизнес-корреспонденции, включает в себя работу с наиболее часто встречаемыми видами документации:

- письмо-запрос;
- письмо-предложение;
- рекламы;
- документы, связанные со страхованием грузоперевозок, форм платежа и т.д.

Но данная тематика характерна и для других направлений, а специфика нашего курса заключается в обучении не только стандартному деловому английскому языку, но и формированию навыков и умений в области продаж, решения конфликтов и бронирования. В этом очень помогают аутентичные учебники по международному туризму.

Кроме того, не стоит забывать и о другой стороне этой профессии, а именно, работе гида, которая является как одной из самых важных в индустрии гостеприимства, так и самой сложной. Данному виду деятельности студенты обучаются на IV–VI курсах в рамках предмета «Экскурсионно-выставочная работа на английском языке». Обучение в рамках указанной дисциплины включает в себя работу с текстами и лексикой краеведческого характера, компьютерными презентациями, практическое применение изученного материала - выход на объекты с экскурсиями, и логическим завершением является курсовой проект на английском языке с мультимедийной презентацией. Темы курсовых проектов разнообразны, но все они предполагают не только описание объектов, но и небольшое маркетинговое исследование, а также разработку тура по данной работе. Необходимость обучения студентов деловому языку и деловой документации продиктована не только требованиями программы, но и самой жизнью. В независимости от того, специалистами в какой области они станут в будущем, знания и навыки деловой коммуникации и корреспонденции – это «тот багаж, который они возьмут с собой в долгое путешествие».

Реалии современного рынка таковы, что знание иностранного делового языка в дополнение к качественному профессиональному образованию – это залог гарантированного

трудоустройства. И если еще несколько лет тому назад такие требования предъявлялись к соискателям на вакантную должность в иностранной компании, то активное расширение экономических связей в последнее время привело к тому, что и большинство российских компаний (и не только крупных) предпочтение отдают тем кандидатам, кто в своем резюме указывает, что они владеют иностранным языком, а в лучшем случае предоставляют международный сертификат, подтверждающий этот уровень.

С целью вхождения в единое образовательное пространство разрабатываются проекты моделей специалистов в условиях многоуровневого высшего профессионального образования – бакалавр по специальности, магистр по специальности. Создаются соответствующие образовательные стандарты третьего поколения. Взамен прежней модели, которая основывалась на знаниях, умениях, навыках, принята новая компетентностная модель специалиста. Авторы этой модели считают, что изменение должно привести к большей мобильности выпускников вуза.

Понятия «компетентность» и «компетенция» становятся актуальными не только для менеджмента как теории организации, из которого они и пришли в современную жизнь, но и для педагогического процесса. По мнению Т.И. Рудневой [1] компетентность как совокупность компетенций представляет собой меру включенности человека в деятельность.

Предлагаем обратиться к трактованию данных терминов толковыми аутентичными словарями [2], так как теория менеджмента зародилась на западе, и они были заимствованы из английского языка. «Competence» означает, как компетентность, так и компетенцию, но при этом в синонимическом ряду слова «компетентность» находятся квалификация, способность, умение, знание, а «компетенция» – правомочность, юрисдикция и даже подготовка.

Из структуры профессиональной компетентности можно выделить в самостоятельную категорию коммуникативную компетентность.

Коммуникативная компетентность формируется в ходе освоения содержания профессиональной подготовки и включает в себя три компонента: лингвистический, социолингвистический и прагматический.

*Лингвистические компетенции* включают знание лексики, фонологии, синтаксиса, а также знания, связанные с другими аспектами языковой системы, независимо от их социолингвистических вариаций и прагматических функций, которые они выполняют.

*Социолингвистические компетенции* связаны с социокультурными условиями использования языка. Сюда относятся понятия, связанные с культурой носителей языка, и их отражение в использовании языка, как-то: нормы вежливости, восприимчивость к правилам поведения в обществе, в том числе, в профессиональной среде и т. д. Социолингвистический компонент оказывает существенное влияние на языковое общение представителей различных культур, даже если они об этом не подозревают.

*Прагматические компетенции* связаны с функциональным использованием языковых средств в речевой деятельности, и для данного компонента, как ни для какого другого, важно влияние ситуации общения и культурной среды, в которых эти компетенции формируются.

Профессиональная компетентность представляет собой сложное образование, которое определяет способность специалиста адекватно анализировать профессиональные ситуации, формулировать проблемы и задачи, возникающие в реальных ситуациях профессиональной деятельности и решать их на основе знаний, профессионального и жизненного опыта. В данной ситуации еще больше возрастает роль владения иностранным языком. К сожалению, в настоящее время планируется сокращение количества часов на обучение иностранным языкам.

Анализ научной литературы и практика преподавания в вузе показывают, что в профессиональном образовании усиливается роль иностранного языка как учебного предмета, так как он определяет, формирует как саму языковую личность, так и личность профессионала, то есть является одновременно и целью и средством процесса обучения.

Данное обстоятельство создает условия для развития как собственно языковых компетенций, так и умений более широкого спектра ключевых компетенций, являющихся профессионально важными качествами современного специалиста, конкурентоспособного на рынке труда.

Согласно новым российским образовательным стандартам и документам Европейского Совета [3, 4], к таким компетенциям относятся:

- умение взаимодействовать в профессиональной сфере;
- владение информационно-коммуникационными технологиями;
- способность находить и анализировать полученную информацию на основе личного опыта;
- творческий подход к решению профессиональных проблем;
- умение работать в команде и проявлять лидерские способности;
- навыки выполнения проектной работы.

Обучение иностранному языку способствует развитию не только коммуникативной компетенции, но и профессиональной. В процессе подготовки студентов специальности «Туризм» важно не только научить их говорить на иностранном языке, но и знать и уважать культуру, традиции, как страны изучаемого языка, так и других стран, что и позволяет им стать квалифицированными/компетентными специалистами в области туризма в будущем.

Межличностное профессиональное общение, представляя инструмент профессиональной деятельности специалистов по сервису и туризму, направляется на выполнение проектировочной, конструктивной, коммуникативной, организаторской и гностической функций. Основным видом деятельности специалистов по сервису и туризму является сервисная деятельность, содержание которой составляют обслуживание клиентов, в том числе, иностранных, удовлетворение их социально-культурных потребностей, что возможно только в непосредственном общении с ними.

В требованиях к реализации знаний и умений в практической профессиональной деятельности в цикле гуманитарных и социально-экономических дисциплин обозначено, что в области филологии специалист должен:

- знать основные особенности полного стиля произношения, характерные для сферы профессиональной коммуникации;
- знать и грамотно использовать в своей деятельности профессиональную лексику, владея лексическим и грамматическим минимумом, включающим грамматические структуры, необходимые для обучения устным и письменным формам общения;
- знать культуру и традиции, правила речевого этикета стран изучаемого языка;
- уметь вести беседу-диалог общего характера, соблюдать правила речевого этикета;
- владеть монологической речью в рамках публичных выступлений (доклад, сообщение, презентация и т.д.)
- составлять аннотации, рефераты, деловые письма на иностранном языке;
- читать литературу по специальности без словаря с целью поиска информации, переводить тексты по специальности со словарем.

Таким образом, общеязыковая подготовка специалистов по сервису и туризму направляется на предоставление учебной информации об основных аспектах языка (фонетика, лексика, грамматика, стилистика) и формирование навыков и умений, связанных с овладением четырьмя видами речевой деятельности (чтение, говорение, аудирование и письмо), обусловленными конкретной ситуацией общения. Основной задачей общеязыковой подготовки становится обучение иностранному языку как средству общения, что предполагает наличие у студентов определенного комплекса лингвистических знаний и коммуникативных умений. В итоге общеязыковая подготовка специалистов по сервису и туризму формирует базовый уровень владения языком, который обеспечивает решение коммуникативных задач, достаточных для ограниченного профессионального общения в стандартных ситуациях.

Если общеязыковая подготовка нацелена на формирование общих умений по основным видам речевой деятельности, то профессионально-ориентированная подготовка подразумевает формирование профессионально значимых умений в результате овладения речевым этикетом устного и письменного общения, активной и терминологической лексикой по профилю специальности; лингвострановедческой лексикой, связанной с историей, культурой и спецификой бытового и делового этикета и невербального общения зарубежных стран-партнеров по туристскому бизнесу; грамматическими закономерностями.

Содержание профессионально-ориентированной языковой подготовки усложняется при овладении туристской профессией «гид, владеющий иностранным языком». В обязанности гида входит обеспечение устного перевода во время мероприятий, предусмотренных программой, например, перевод бесед со служащими во время посещения туристами предприятий, социально-бытовых, культурных и других учреждений. Они должны самостоятельно и квалифицированно проводить на русском и иностранном языках экскурсии по городу и объектам показа, обеспечивать участие всех иностранных туристов в организуемых для них мероприятиях, вечерах, беседах и встречах. В его обязанности входит систематическое повышение своего профессионального и образовательного уровней. В периоды, свободные от работы непосредственно с группами иностранных туристов, гиды составляют методические пособия, разрабатывают и обновляют имеющиеся тексты экскурсий.

Поскольку работа гида является частью общей информационно-разъяснительной работы, которая ведется с туристами, основным условием, определяющим успех, является творческий подход к своей профессиональной деятельности, умение учесть контингент группы и собственное отношение гида к рассказываемому. Если туристы чувствуют, что гид старается довести до них реалии нашей жизни и делает это с высоким профессиональным мастерством, то возникающее уважение к гиду и к городу, в котором он живет, заставляет их пересмотреть свое отношение к нации и стране в целом, если оно было негативным. Профессиональная деятельность гида требует не только знания большого фактического материала, но и умения включить его в текст экскурсии, учитывая контингент группы. Несмотря на то, что таких языковых профессий немного, проблема разработки содержания профессионально-ориентированной языковой подготовки не утратила своей актуальности, поскольку средства иностранного языка способствуют формированию готовности к профессиональному межличностному общению.

Готовность к профессиональному межличностному общению специалистов по сервису и туризму предполагает владение как вербальными, так и невербальными средствами коммуникации, что способствует преодолению этноцентризма – склонности негативно оценивать представителей своей и других культур, возникновению различных предрассудков. В связи с несовпадением значимости тех или иных фрагментов поведенческих норм у представителей разных национальностей, их знание в значительной степени влияет на эффективность межкультурного взаимодействия. При сравнении культур обнаруживается тесная взаимосвязь процессов самопознания через саморефлексию, сравнение себя с другими, способность к эмпатии и саморегуляции, что обеспечивает развитие рефлексивного компонента готовности к профессиональному межличностному общению.

Компетентностный подход в обучении занимает ведущую позицию, что подтверждается исследованиями многих ученых. Наше исследование и практика обучения будущих специалистов в сфере туризма позволяют утверждать, что основной целью профессиональной подготовки специалистов является формирование их профессиональной компетентности.

В заключение можно сделать общий вывод о том, что программа обучения иностранному языку включает в себя как общеязыковую подготовку студентов, так и формирует их готовность к профессиональной межличностной коммуникации в сфере сервиса и туризма, что и является формированием коммуникативной и профессиональной компетентности студентов специальности «Туризм». За пределами данного исследования остаются разработка структуры коммуникативной компетентности и методика формирования базовых компетенций специалистов средствами иностранного языка.

### Библиографический список

1. **Руднева Т.И.** Коммуникативная компетентность – категория профессиональной педагогики / Инновационные образовательные технологии в практике вузовского образования: сб. докл. VI Международная научно-практическая конференция. С. 9.
2. [www.lingvo.ru](http://www.lingvo.ru)
3. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. – М., 2000. Режим доступа: /[http:// www.edu.ru/db/portal/spe/index.htm](http://www.edu.ru/db/portal/spe/index.htm)
4. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования. Специальность 230500 «Социально-культурный сервис и туризм». – М.: Высшее образование. 2000. – 28 с.
5. **Борозенец, Г.К.** Формирование иноязычной коммуникативной компетентности будущих специалистов: интегративный подход / Г.К. Борозенец. – Воронеж: Изд-во Воронежского университета. 2003. – 247 с.
6. **Муратова, Л.В.** Дидактические условия и средства развития рефлексивной и творческой активности студентов (на материале изучения иностранных языков): дисс. ... канд. пед. наук: 13.00.01/ Л.В. Муратова. – Казань, 2003. – 240 с.
7. Обучение иностранным языкам в школе и вузе: метод. пособие для преподавателей, аспирантов и студентов. – СПб.: КАРО, 2001. – 240 с.
8. **Плужник, И.Л.** Формирование межкультурной коммуникативной компетенции студентов в процессе профессиональной подготовки / И.Л. Плужник. – М.: ИНИОН РАН. 2003. – 216 с.
9. Сафонова, В.В. Изучение языков международного общения в контексте диалога культур и цивилизаций / В.В. Сафонова. – Воронеж: ИСТОКИ, 1996. – 237 с.
10. **Юхненко, Л.В.** Иностранный язык — реальный инструмент трудовой познавательной деятельности специалиста с высшим образованием // Теория и методика непрерывного образования: сб. трудов V Всерос. н.м.к. – Тольятти: Изд-во ВГУ. 2003. Т. 1. С. 97–99.

*Дата поступления  
в редакцию 12.10.2010*

**T.R. Bardinskaya, A.T. Koldenkova**

### COMMUNICATIVE COMPETENCE AS A BASIS FOR TRAINING STUDENTS OF THE SPECIALIZATION "TOURISM"

It is shown in the article that at the present stage of development of the Russian society a main objective of vocational training of experts is formation of their professional competence.

The program of training to a foreign language includes as nontechnical preparation of students, as well as forms their readiness for professional interpersonal communications in service and tourism sphere, as is formation of communicative and professional competence of students of a specialty "Tourism".

*Key words:* The higher school, the modernization concept, professional competence, competence approach, nontechnical preparation, professional interpersonal communications, welfare service and tourism.

---

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 621.3.085.42

А.А. Ожиганов<sup>1</sup>, П.А. Прибыткин<sup>2</sup>

### КОДОВЫЕ ШКАЛЫ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕКУРРЕНТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики<sup>1</sup>,  
Открытое акционерное общество «Авангард» (Санкт-Петербург)<sup>2</sup>

Предложены кодовые шкалы для фотоэлектрических цифровых преобразователей угла, строящиеся на основе нелинейных рекуррентных последовательностей. Сформулирован принцип композиции рекурсивных кодовых шкал. Приведён пример построения кодовой шкалы.

*Ключевые слова:* кодовая шкала, считывающие элементы, цифровой преобразователь угла, преобразователь угол-код, рекурсивная кодовая шкала, рекуррентная последовательность, псевдослучайная последовательность.

#### Введение

Фотоэлектрические цифровые преобразователи угла абсолютного типа основаны на методе считывания с пространственным кодированием [1]. ФЦПУ содержат кодовый (модулирующий) диск и систему считывания, состоящую из излучающей (передающей) и приёмной частей. Излучающая система содержит источник излучения, а приёмная — индексную диафрагму и приёмники излучения. Кодовый диск и диафрагма представляют собой диски из оптически прозрачного материала, расположенные соосно и параллельно, на обращенных друг к другу поверхностях, на которых методом фотолитографии нанесены маски с соответствующим рисунком. Код сформирован в виде системы прозрачных и непрозрачных участков на кодовом диске. Рис. 1 иллюстрирует один из вариантов построения оптической системы преобразователей. Источник излучения освещает одну сторону кодового диска. Приёмники подсвечиваются через узкие щели в неподвижной диафрагме. При вращении кодового диска меняется площадь перекрытия прозрачных участков дорожки диска и окна диафрагмы, т.е. модулируется величина светового потока от излучателей к фотоприёмникам.

Основными требованиями к цифровым преобразователям угла (ЦПУ) в общем и к ФЦПУ в частности являются точность преобразования, быстродействие, надёжность, стойкость к внешним воздействующим факторам и др. Достаточно хорошо изучены основные методы получения высокой точности и разрешающей способности, если нет ограничений в габаритах преобразователей. Но в ряде применений ЦПУ актуальна задача увеличения точности и разрешающей способности при одновременном уменьшении габаритов [2].

Достижение этих технических требований во многом зависит от применяемой в ФЦПУ кодовой шкалы (КШ), которая определяет число кодовых дорожек (КД), а также число и размещение считывающих элементов (СЭ). Среди разных типов построения кодовых шкал для ФЦПУ [1] наибольшее распространение получили КШ, выполненные в обыкновенном двоичном коде – регулярные КШ, в циклическом коде – в коде Грея и в специальном

коде. Наиболее перспективными являются кодовые шкалы с применением теории рекуррентных последовательностей – рекурсивные кодовые шкалы (РКШ) [3], позволяющие строить одностроковые ФЦПУ [4], двухдорожечные неререверсивные ФЦПУ с двумя СЭ и реверсивные ФЦПУ с подготовительными квантами [5], встречающиеся в литературе как «квазиабсолютные», а также КШ с возможностью формирования корректирующих кодов [6].

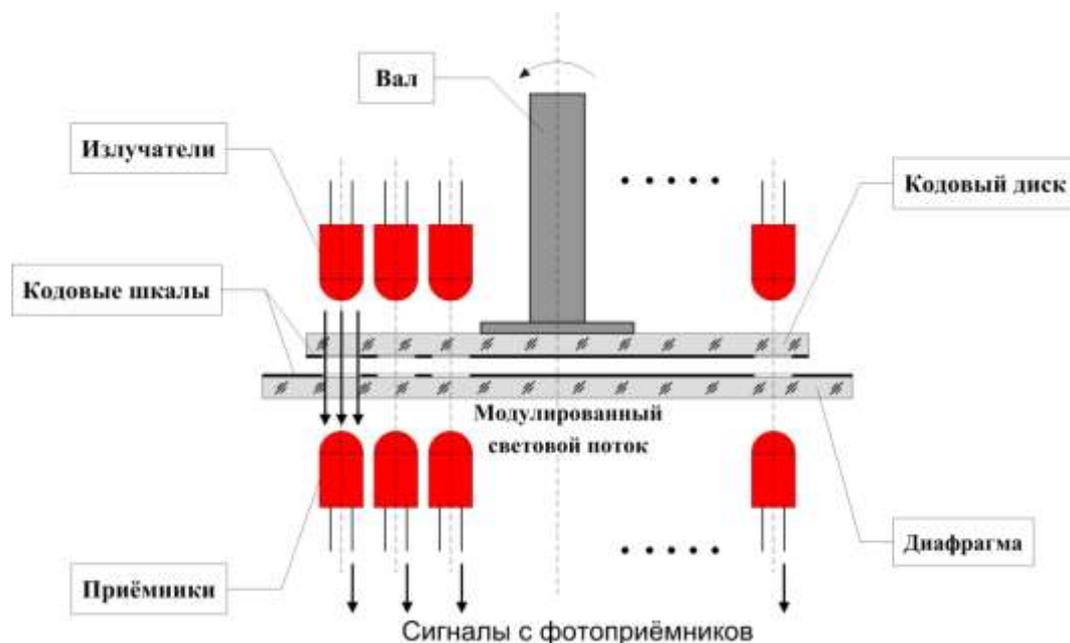


Рис. 1. Функциональная схема оптической части ФЦПУ

До настоящего времени рассматривалось построение ФЦПУ на основе РКШ с одной или двумя дорожками. С практической точки зрения применение РКШ для построения высокоразрядных малогабаритных ФЦПУ связано с рядом ограничений конструктивного и особенно технологического характера, накладываемых минимальным размером градации кодовой шкалы, чувствительностью и размерами СЭ.

Различают КШ на основе линейных рекуррентных последовательностей (РП) и КШ на основе нелинейных РП в зависимости от свойства линейности или нелинейности (по отношению к оператору суммирования по модулю 2) рекуррентного соотношения, используемого для построения РП. Особенностью КШ на основе линейных РП является то, что они имеют информационную ёмкость  $2^n - 1$ ,  $n=1,2,3,\dots$  значений кода – несовместимую со многими техническими системами, в которые встраивается ЦПУ. К недостаткам КШ на основе нелинейных РП относится единственность размещения СЭ вдоль шкалы — с шагом в один квант. При конечных размерах СЭ (фотоприёмников в ФЦПУ) этот недостаток существенно ограничивает разрядность КШ.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка кодовых шкал с учётом обозначенных ограничений, которые позволят создавать высокоразрядные малогабаритные ЦПУ. Такие кодовые шкалы в сравнении с классическими КШ должны иметь высокую информационную ёмкость при малом числе кодовых дорожек.

Далее условимся понимать под подвижным растром кодовый диск, а под неподвижным — диафрагму, являющиеся конструктивными элементами ФЦПУ; под кодовой шкалой будем понимать совокупность кодовых дорожек (КД) подвижного растра, под считывающим элементом — прозрачную щель или группу щелей неподвижного растра и фотоприёмник, под градацией — элементарный участок кодовой шкалы (дорожки), содержащий признаки одного символа двоичного кода из  $\{0,1\}$ .

### Теория построения кодовых шкал на основе рекуррентных последовательностей

Известны сдвигающие регистры, или регистры сдвига с обратной связью, – электронные переключательные схемы специального вида, перерабатывающие информацию, заданную в форме соответствующим образом представленных элементов поля Галуа  $GF(2)$  [7]. В общем виде  $n$ -позиционный регистр сдвига состоит из  $n$  последовательно соединённых триггерных ячеек. В результате действия  $k+1$  тактовых импульсов, где  $k$  — целое неотрицательное число, состояние каждой ячейки  $(a_k, a_{k+1}, \dots, a_{k+n-1}) \in \{0,1\}$  сдвигается в соседнюю ячейку. При введении обратной связи

$$f(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + \dots + c_{n-1} x_{n-1}, \quad c_i \in GF(2) \quad (1)$$

сдвигающий регистр оказывается в режиме непрерывной смены состояний.

С помощью булевой функции обратной связи (1) можно определить  $n$ -е состояние регистра (после  $n$  тактов работы):  $a_n = f(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$ .

Таким образом, символы двоичной последовательности на выходе регистра сдвига удовлетворяют рекуррентному соотношению [3]

$$a_{n+j} = h_{n-1} a_{n-1+j} + h_{n-2} a_{n-2+j} + \dots + h_1 a_{j+1} + a_j, \quad (2)$$

где  $h_i \in GF(2)$ ,  $j = 0, 1, \dots$

Для работы регистра необходимо задать начальное состояние триггерных ячеек  $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$ , причем нулевая комбинация является запрещённой, так как порождает последовательность с одними нулями.

Функцию обратной связи (1) можно представить также в форме полинома порядка  $n$  с коэффициентами из поля Галуа  $GF(2)$ , называемого характеристическим полиномом,

$$h(x) = h_n x^n + h_{n-1} x^{n-1} + \dots + h_1 x + h_0, \quad (3)$$

где  $h_0 = h_n = 1$ ,  $h_i \in GF(2)$ .

Любая однородная рекуррентная последовательность с линейной функцией вида (1) может иметь максимальный период  $2^n - 1$ , т. е.  $2^n$  возможных состояний регистра за исключением нулевой комбинации. Такую последовательность называют псевдослучайной последовательностью максимальной длины над полем  $GF(2)$  (ПСПМД), или  $M$ -последовательностью. Для её построения необходимо и достаточно, чтобы характеристический полином являлся примитивным полиномом [7] над полем  $GF(2)$ , а начальное состояние — отличным от нулевого. Кодовые шкалы на основе ПСПМД имеют информационную ёмкость  $2^n - 1$  и носят название псевдослучайные кодовые шкалы (ПСКШ).

$M$ -последовательности относятся к классу циклических кодов и могут задаваться с помощью порождающего полинома [7]

$$g(x) = \frac{x^{2^n-1} + 1}{h(x)},$$

где  $h(x)$  — характеристический полином, задаваемый (3).

Для каждой ПСПМД длиной  $M = 2^n - 1$  существует ровно  $2^n - 1$  различных циклических сдвигов, которые могут быть получены путём умножения порождающего полинома  $g(x)$  на  $x^I$ , где  $I = 0, 1, \dots, M - 1$ . Порядок размещения на ПСКШ  $n$  считывающих элементов определяется путём циклических сдвигов, т. е. СЭ с номером  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) ставится в соответствие  $I_m$  циклический сдвиг  $x^{I_m} g(x)$   $M$ -последовательности. Тогда полином, определяющий порядок размещения на шкале  $n$  СЭ, имеет вид [3]

$$r(x) = x^{I_1} + x^{I_2} + \dots + x^{I_n}, \quad I_m \in 0, 1, \dots, M - 1. \quad (4)$$

Между тем, псевдослучайные последовательности с нулевой комбинацией получают с помощью регистра сдвига с нелинейной функцией обратной связи, т. е. в регистре, где символы последовательности нелинейным образом зависят от предыдущих символов:

$$\tilde{f}(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + \dots + c_{n-1} x_{n-1} + \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots \bar{x}_{n-1}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  является дополнением  $x$ ;  $c_i \in GF(2)$ .

Такие последовательности имеют период  $2^n$  и являются частным случаем последовательностей де Брейна.

Символы последовательности удовлетворяют рекуррентному соотношению

$$b_{n+j} = h_{n-1} b_{n-1+j} + h_{n-2} b_{n-2+j} + \dots + h_1 b_{j+1} + b_j + \bar{b}_{n-1+j} \bar{b}_{n-2+j} \dots \bar{b}_{j+1}, \quad (6)$$

где  $j = 0, 1, \dots$

Начальные символы последовательности  $b_0 b_1 \dots b_{n-1}$  выбираются произвольно. Рекуррентное соотношение (6) отличается от соотношения для линейных псевдослучайных последовательностей (2) только наличием последнего слагаемого — произведения значений  $n-1$  символов.

Кодовые шкалы на основе нелинейных рекуррентных последовательностей имеют разрешающую способность  $2^n$  и носят название нелинейные кодовые шкалы (НКШ). Для их построения характеристический полином вида (3) так же, как и в случае ПСКШ, должен являться примитивным над полем  $GF(2)$ .

Размещение СЭ на НКШ, в отличие от ПСКШ, в силу нелинейных свойств применяемых последовательностей может происходить только единственным образом: с шагом, равным одному кванту, т. е. в соответствии с полиномом размещения

$$\tilde{r}(x) = 1 + x + x^2 + \dots + x^{n-1}. \quad (7)$$

Единственность такого размещения отражает существенный недостаток НКШ, ограничивающий их применение для построения малогабаритных высокоразрядных преобразователей.

### Композиция кодовых шкал на основе рекуррентных последовательностей

Преобразователи считывания представляют собой систему из  $l$  параллельно работающих  $N_l$ -разрядных преобразователей угла. Такой подход позволяет комбинировать кодовые дорожки, основанные на разных базовых методах пространственного кодирования, на каждой из которых происходит преобразование перемещения в соответствующую группу разрядов выходного кода [2].

Пусть ФЦПУ имеет  $p$  кодовых дорожек в порядке от старшей, с которой считывается старший по весу разряд, до младшей, с которой считывается младший по весу разряд. Период функции преобразования каждой кодовой дорожки —  $\Psi_l$ , где  $l = \overline{1, p}$ . В случае кругового ФЦПУ с диапазоном изменения угла от 0 до  $360^\circ$  для первой кодовой дорожки  $\Psi_1 = 360^\circ$ , а для каждой последующей  $\Psi_{l+1} = \frac{1}{N_l} \Psi_l$ , где  $N_l$  — число уровней квантования  $l$ -й кодовой дорожки.

Информационная ёмкость преобразователя  $N$  пропорциональна числу уровней квантования каждой дорожки:  $N = \prod_{l=1}^p N_l$ . Период функции преобразования каждой дорожки:

$$\Psi_{l+1} = 360^\circ / \prod_{i=1}^l N_i.$$

Пусть старшая КД строится в соответствии с символами рекуррентной последова-

тельности (линейной или нелинейной) длиной  $D_1$ . Пусть следующая кодовая дорожка также строится в соответствии с символами линейной или нелинейной РП длиной  $D_2$ , причём в угловом секторе, соответствующем одному символу последовательности старшей КД, укладывается один период последовательности младшей дорожки, т. е. последовательность длиной  $D_2$  на младшей дорожке имеет  $D_1$  периодов:  $\Psi_2 = \Psi_1/N_1 = 360^\circ/D_1$ . Такое построение аналогично структуре регулярных двоичных КШ, в которых одному символу из  $\{0,1\}$  старшей дорожки соответствует последовательность 01 младшей дорожки.

К достоинствам такой кодовой шкалы, представляющей собой композицию РКШ и регулярных КШ, в которой одному символу старшей КД ставится в соответствие один период РП на следующей КД, относится возможность рационального размещения СЭ с возможностью существенного уменьшения числа КД по сравнению с классическими КШ.

### Пример построения кодовой шкалы на основе композиции нелинейных рекуррентных последовательностей

Рассмотрим принцип построения кодовой шкалы на основе композиции нелинейных рекуррентных последовательностей на примере пятиразрядной КШ, содержащей двух- и трёхразрядную НКШ.

Возьмём нелинейную РП длиной  $D_1 = 2^2$  ( $n_1 = 2$ ), для построения которой будем использовать примитивный полином  $h(x) = x^2 + x + 1$ , начальные значения  $b_0 b_1$  зададим как 00. Рекуррентное соотношение последовательности согласно (6) примет вид

$$b_{2+j} = b_j + b_{1+j} + \bar{b}_{1+j}.$$

Сгенерированную таким образом последовательность 0011 используем для построения кодовой дорожки ФЦПУ. При размещении двух считывающих элементов вдоль этой дорожки получим  $2^2 = 4$  значения кода. Эту двухразрядную дорожку возьмём в качестве старшей дорожки  $T_1$  ФЦПУ, тогда период второй дорожки будет  $\Psi_2 = 360^\circ/4 = 90^\circ$ . Это же значение  $\Psi_2$  является дискретностью преобразования (квантом) первой дорожки.

Следующую дорожку  $T_2$  большего диаметра выполним в соответствии с символами последовательности длиной  $D_2 = 2^3$  ( $n_2 = 3$ ), полученными с помощью рекуррентного соотношения

$$b_{3+j} = b_j + b_{1+j} + \bar{b}_{1+j} \bar{b}_{2+j}.$$

Для его построения используется примитивный полином  $h(x) = x^3 + x + 1$ . При начальных значениях  $b_0 b_1 b_2 = 000$  последовательность будет иметь вид 00010111.

Дорожка  $T_2$  будет содержать 4 периода последовательности:

$$00010111000101110001011100010111.$$

При рассматриваемом подходе каждый период последовательности будет заполнять дугу окружности диаметра второй дорожки с центральным углом  $\Psi_2$ , соответствующим одному символу старшей дорожки  $T_1$ . Тогда шаг размещения СЭ вдоль второй дорожки, благодаря тому, что она содержит четыре периода последовательности, составит  $\alpha 360^\circ/4 + 360^\circ/32$ ,  $\alpha \in \{0,1,\dots,2^2-1\}$ . Коэффициент  $\alpha$  выбирается при проектировании ФЦПУ из конструктивных соображений и позволяет наиболее рационально и технологично осуществить компоновку СЭ вдоль кодовой шкалы преобразователя.

Линейная развёртка рассматриваемой в примере КШ приведена на рис. 2. ФЦПУ с такой кодовой шкалой, состоящей из двух дорожек, обладает разрешающей способностью  $2^5$ ,

т.е. имеет 32 значения кода угла. На рис. 3 показана круговая КШ с одним из вариантов размещения считывающих элементов.

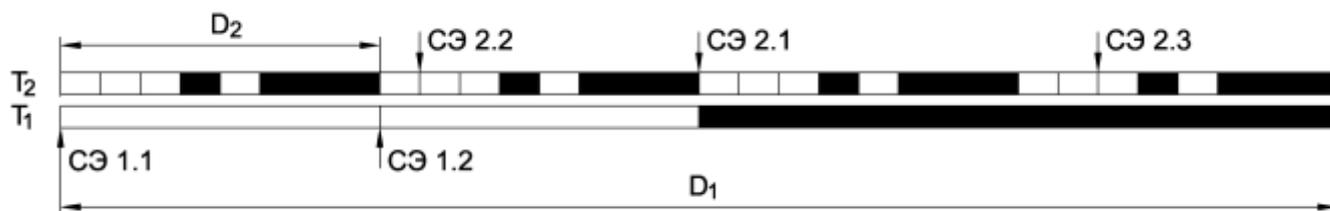


Рис. 2. Линейная развёртка пятиразрядной кодовой шкалы

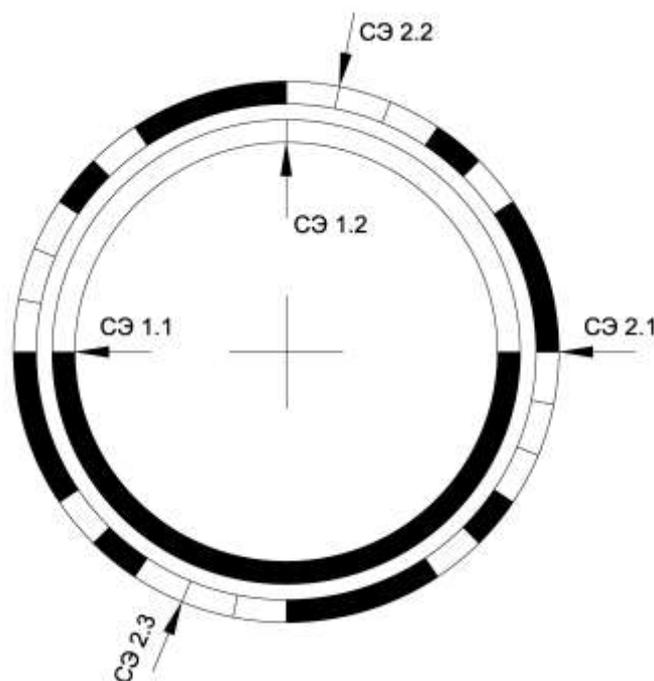


Рис. 3. Круговая пятиразрядная кодовая шкала

В табл. 1 приведены двоичные значения кодов, снимаемые считывающими элементами с дорожек  $T_1$  и  $T_2$ , в положениях кодовой шкалы  $\varphi$  и соответствующие этим значениям десятичные эквиваленты  $\varphi'$ .

Таблица 1

Последовательность кодовых комбинаций пятиразрядной кодовой шкалы

$\varphi$	$T_1$	$T_2$	$\varphi'$												
0	00	000	0	8	01	000	8	16	11	000	24	24	10	000	16
1	00	001	1	9	01	001	9	17	11	001	25	25	10	001	17
2	00	010	2	10	01	010	10	18	11	010	26	26	10	010	18
3	00	101	5	11	01	101	13	19	11	101	29	27	10	101	21
4	00	011	3	12	01	011	11	20	11	011	27	28	10	011	19
5	00	111	7	13	01	111	15	21	11	111	31	29	10	111	23
6	00	110	6	14	01	110	14	22	11	110	30	30	10	110	22
7	00	100	4	15	01	100	12	23	11	100	28	31	10	100	20

### Выводы

Предложенный в данной работе принцип построения кодовых шкал позволяет строить на своей основе высокоразрядные цифровые преобразователи угла в уменьшенных габаритах с учётом технологических и конструктивных ограничений, таких как минимальная ширина градации и шаг размещения считывающих элементов. Кодовые шкалы, основанные на композиции рекурсивных кодовых шкал, широко используются в ОАО «Авангард» для создания фотоэлектрических преобразователей угла. Такие КШ позволили создать 18- и 20-разрядные ФЦПУ повышенной надёжности и стойкости к внешним воздействующим факторам с диаметрами всего 80 мм и 120 мм соответственно.

### Библиографический список

1. **Домрачев, В.Г.** Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля / В. Г. Домрачев, Б. С. Мейко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
2. **Асиновский, Э. Н.** Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э. Н. Асиновский [и др.]; под ред. А. А. Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
3. **Азов, А. К.** Рекурсивные кодовые шкалы / А. К. Азов, А. А. Ожиганов, М. В. Тарасюк // Информационные технологии. 1998. № 6. С. 39–43.
4. **Ожиганов, А. А.** Кодовые шкалы на основе нелинейных последовательностей для преобразователей угловых перемещений / А. А. Ожиганов, П. А. Прибыткин // Научно-технический вестник СПбГУ. ИТМО. 2010. Вып. 4. С. 81–84.
5. **Ожиганов, А. А.** Использование нелинейных последовательностей при построении двухдорожечных кодовых шкал для преобразователей угловых перемещений / А. А. Ожиганов, П. А. Прибыткин // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 7. С. 39–44.
6. **Ожиганов, А. А.** Анализ возможностей применения корректирующих кодов в рекурсивных кодовых шкалах / А. А. Ожиганов, П. А. Прибыткин // Сб. научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО "Авангард". 2010. Вып. 2. С. 70–77.
7. **Лидл, Р.** Конечные поля. В 2-х т.: пер. с англ. / Р. Лидл, Г. Нидеррайтер. – М.: Мир, 1988. Т. 2. – 822 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**A.A. Ozhiganov, P.A. Pribytkin**

### CODE SCALES BASED ON THE COMPOSITION OF NON-LINEAR RECURRENT SEQUENCES

A type of code scales for absolute-type optical encoders based on the composition of non-linear recurrent sequences is suggested. A principle of composition of recursive code scales is defined. An example of constructing code scale is given.

*Key words:* rotary encoder, shaft encoder, code scale, recursive code scale, reading elements, pseudo-random sequence, recurrence sequence, de Bruijn cycle, nonlinear sequence.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.В. Медунецкий

**ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ СВОЙСТВ МИКРОГЕОМЕТРИИ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ**Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,  
механики и оптики

В настоящее время активно развивается как в механике, так и в электронике микросистемная техника. В статье рассмотрена физическая суть явления магнитной проницаемости, а также поставлены задачи дальнейшей работы в области поиска и исследования влияния микрогеометрии, к примеру, на магнитную проницаемость деталей приборов.

*Ключевые слова:* электромагнитная защита, микроминиатюризация, экранирование, глубина проникновения.

В настоящее время активно развивается производство высокочастотной радиоэлектронной аппаратуры. Данное развитие заключается в миниатюризации с применением новых принципиальных конструктивных решений, материалов, покрытий, технологий изготовления, сборки и т.п. С этим развитием существенно возрастают различные требования к изготавливаемой аппаратуре. Одним из таких требований является минимальная магнитная проницаемость прибора. Известно, что магнитное поле активно влияет не только на человека, но и на работу высокочастотных микросхем, что отражается на работе прибора в целом. Например, во многих приборах модуль питания создает значительное электромагнитное поле, которое оказывает пагубное влияние на работу остальных частей прибора. Поэтому возникает вопрос о защите аппаратной части, а также самого пользователя от данного воздействия. А в некоторых случаях необходимо обеспечить защиту от электромагнитного излучения окружающей прибор среды.

В настоящее время данный вопрос решается при помощи применения специальных материалов, покрытий, а также обеспечивается экранированием аппаратуры. Следует отметить, что данные решения накладывают определенные ограничения на конструкцию прибора и технологию его изготовления. Например, чтобы обеспечить экранировку микропроцессора, нужно соблюсти необходимую толщину стенки отсека, в которой он располагается, причем особо важен материал данной стенки. Следует отметить, что сопрягаемые детали данного отсека должны обеспечивать замкнутый электрический контакт, что приводит к повышенным требованиям к поверхностям деталей, к применению специальных прокладочных материалов, а следовательно, к удорожанию изделия. Данное решение приводит к утяжелению прибора и уменьшению его эксплуатационных свойств.

В статье рассмотрена физическая суть явления магнитной проницаемости, а также поставлены задачи дальнейшей работы в области поиска и исследования влияния микрогеометрии, к примеру, на магнитную проницаемость деталей приборов.

Известно, что выбор материала экрана проводится исходя из обеспечения требуемой эффективности экранирования в заданном диапазоне частот при определенных ограничениях. Эти ограничения связаны с массогабаритными характеристиками экрана, его влиянием на экранируемый объект, с механической прочностью и устойчивостью экрана против коррозии, с технологичностью его конструкции и т.д.

Сейчас достаточно широко применяются для экранирования металлические элементы. Они изготавливаются в виде листов, сеток и фольги (сталь, медь, алюминий, цинк, латунь). Эти материалы должны удовлетворять требованию устойчивости против коррозии при использовании соответствующих защитных покрытий.

Наиболее технологичными являются конструкции экранов из стали, так как при их изготовлении и монтаже можно широко использовать сварку. Толщина стали выбирается исходя из назначения конструкции экрана и условий его сборки, а также из возможности обеспечения сплошных сварных швов при изготовлении.

Рассмотрим процесс экранирования электромагнитного поля при падении плоской волны на бесконечно протяженную металлическую пластину толщиной  $d$ , находящуюся в воздухе. В этом случае на границе раздела двух сред с различными электрофизическими характеристиками (воздух—металл и металл—воздух) волна претерпевает отражение и преломление, а в толще экрана, ввиду его проводящих свойств, происходит частичное поглощение энергии электромагнитного поля. Таким образом, электромагнитная волна при взаимодействии с экраном отражается от его поверхности, частично проникает в стенку экрана, претерпевает поглощение в материале экрана, многократно отражается от стенок экрана и, в конечном счете, частично проникает в экранируемую область (далее рассмотрим математические соотношения процесса экранирования на основе работ [1] и [3]). В результате общая эффективность экранирования (величина потерь энергии электромагнитной волны) металлической пластиной определяется суммой потерь за счет поглощения (затухания) энергии в толще материала  $A_{\text{погл}}$ , отражения энергии от границ раздела внешняя среда—металл и металл—экранируемая область  $A_{\text{отр}}$  и многократных внутренних отражений в стенках экрана  $A_{\text{мн.отр}}$ :

$$A_{[\text{дБ}]} = A_{\text{погл}} + A_{\text{отр}} + A_{\text{мн.отр}}. \quad (1)$$

Потери на поглощение связаны с поверхностным эффектом в проводниках, приводящим к экспоненциальному уменьшению амплитуды проникающих в металлический экран электрических и магнитных полей.

Это обусловлено тем, что токи, индуцируемые в металле, вызывают омические потери и, следовательно, нагрев экрана.

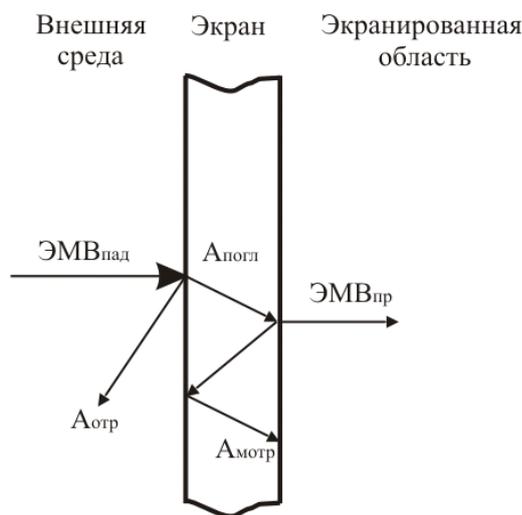


Рис. 1. Экранирование электромагнитного поля металлическим экраном

Глубина проникновения определяется как величина, обратная коэффициенту затухания и зависит от частоты: чем больше частота, тем меньше глубина проникновения. В СВЧ-диапазоне глубина проникновения в металлах имеет малую величину и тем меньше, чем больше проводимость металла и его магнитная проницаемость:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}}. \quad (2)$$

где  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость материала экрана;  $f$  – частота электромагнитного поля;  $\sigma$  – удельная проводимость материала экрана.

Выражение для определения потерь на поглощение экраном толщиной  $d$  может быть представлено в следующем виде:

$$A_{\text{погл}} = 8,68d \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = 8,68 \frac{d}{\delta}. \quad (3)$$

Таким образом, потери на поглощение растут пропорционально толщине экрана, магнитной проницаемости и удельной проводимости его материала, а также частоте электромагнитного поля.

Потери на отражение на границе раздела двух сред связаны с различными значениями полных характеристических сопротивлений этих сред. При прохождении волны через экран она встречает на своем пути две границы раздела — воздух—металл и металл—воздух.

Хотя электрическое и магнитное поля отражаются от каждой границы по-разному, суммарный эффект после прохождения обеих границ одинаков для обеих составляющих поля. При этом наибольшее отражение при входе волны в экран (на первой границе раздела) испытывает электрическая составляющая поля, а при выходе из экрана (на второй границе раздела) наибольшее отражение испытывает магнитная составляющая поля. Для металлических экранов потери на отражение определяются выражением:

$$A_{\text{отр}} = 20 \lg \left( 94,25 \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что потери на отражение велики у экрана, изготовленного из материала с высокой проводимостью и малой магнитной проницаемостью.

Потери на многократные отражения в стенках экрана связаны с волновыми процессами в толще экрана и в основном определяются отражением от его границ. Для электрических полей почти вся энергия падающей волны отражается от первой границы (воздух—металл) и только небольшая ее часть проникает в экран. Поэтому многократными отражениями внутри экрана для электрических полей можно пренебречь.

Для магнитных полей большая часть падающей волны проходит в экран, в основном отражаясь только на второй границе (металл—воздух), тем самым, создавая предпосылки к многократным отражениям между стенками экрана. Корректирующий коэффициент  $A_{\text{мн.отр}}$  многократного отражения для магнитных полей в экране с толщиной стенки  $d$  при глубине проникновения равен:

$$A_{\text{мн.отр}} = 20 \lg \left( 1 - \exp \left( -\frac{2d}{\delta} \right) \right). \quad (5)$$

Величина  $A_{\text{мн.отр}}$  имеет отрицательное значение, т.е. многократные отражения в толще экрана ухудшают эффективность экранирования.

В настоящее время следует уделить особое внимание влиянию микрогеометрии поверхности. Эта проблема особенно актуальна в приборостроении.

Общепризнанно, что работу любого изделия определяет, в основном, точность размеров, формы и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей деталей, а также состояние их поверхностного слоя. Наименее исследованными остаются проблемы, связанные с оптимизацией микрогеометрии поверхностей и обеспечением простого, надежного и дешевого ее контроля. Актуальность данной проблемы объясняется еще и тем, что в мировой практике возможности повышения качества изделий за счет увеличения точности размеров и формы поверхностей почти исчерпаны и связаны со значительным увеличением затрат. Поэтому создание оптимального микрорельефа функциональных поверхностей деталей, наряду с улучшением других характеристик поверхностного слоя, является одним из основных и наиболее эффективных резервов значительного повышения качества изделий. Отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии поверхностей направлены на решение проблем с помощью параметрического описания профиля или поверхности. Большая часть ис-

следований базируется на стандартных критериях, которые определяют лишь отдельные, в основном усредненные, характеристики отклонений реальных поверхностей от идеальных. В настоящее время установлено около 20 различных функциональных свойств поверхности, на которые существенно влияет ее микрогеометрия (адгезия, электрическая проводимость, трение-скольжение и качение и т.д.), поэтому необходима оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей для этих конкретных функциональных свойств. Такую задачу невозможно решить без полного и точного описания оптимальной микрогеометрии на этапе ее нормирования [2].

В большинстве стран мира стандарты на микрогеометрию поверхности деталей построены на использовании для ее оценки и контроля профилей поверхностей, т.е. сечений поверхности плоскостью. Для этих целей созданы и производятся в массовом количестве приборы так называемого ошупывающего типа, оснащенные, в основном, индукционными датчиками. Многочисленные семейства этих приборов отличаются друг от друга габаритами, количеством вычисляемых параметров, стоимостью и т.п., но все они работают по принципу "ошупывания" контролируемой поверхности алмазной иглой индукционного датчика, повторяющей при ее протаскивании по поверхности выступы и впадины последней. Полученный таким образом профиль обрабатывается по соответствующей программе, в результате чего определяют значения различных параметров профиля и некоторые результаты его статистической обработки в графическом изображении. Практика применения таких приборов показывает, что большинство специалистов используют для оценки микрогеометрии поверхности один профиль, не задумываясь особо ни о его направлении, ни даже о его длине. В связи с этим целесообразно рассмотреть понятия стационарности микрогеометрии и статистически представительной длины профиля.

Говорить об оптимизации микрогеометрии для конкретного функционального свойства поверхности можно только с теоретической точки зрения. Практически речь может идти только о выборе наилучшей микрогеометрии из возможных, которые можно получить в конкретных производственных условиях. Поэтому в дальнейшем понятие оптимизации будет означать выбор наилучшего из практически возможных вариантов микрогеометрии поверхности для ее конкретного функционального свойства.

Решение такой задачи возможно при выполнении следующих условий:

- необходимо определять оптимальную микрогеометрию для конкретного функционального свойства поверхности изделия;
- известную оптимальную микрогеометрию при нормировании на чертежах необходимо описать с достаточной точностью;
- технолог должен владеть информацией о возможных вариантах обеспечения заданной оптимальной микрогеометрии (знать виды и режимы обработки, гарантирующие получение оптимальной микрогеометрии);
- необходимо наличие методов и средств надежного измерения и контроля соответствия реально полученной микрогеометрии относительно заданной (оптимальной) [1].

### Выводы

Необходимы исследования влияния микрогеометрии на магнитную проницаемость деталей приборов. Результаты данных исследований могут значительно расширить область конструирования и область применения различных современных технологий при проектировании и изготовлении радиоэлектронной аппаратуры.

Определяющей задачей данного исследования является доказательство влияния микрогеометрии поверхности на магнитную проницаемость деталей. В случае подтверждения данной гипотезы будет проведен ряд экспериментов для определения изменения магнитной проницаемости в зависимости от исходной шероховатости поверхности. Следует отметить, что исходная шероховатость будет определяться при помощи непараметрического подхода,

а именно, при помощи плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона для конкретного функционального свойства поверхности (в том числе, и для магнитной проницаемости).

#### **Библиографический список**

1. **Борботько, Т.В.** Основы защиты информации / Т.В. Борботько. – Минск: изд-во БГУИР, 2006. – 321 с.
2. **Мусалимов, В.М.** Динамика фрикционного взаимодействия / В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.
3. **Рогинский, В. Ю.** Экранирование в радиоустройствах / В.Ю. Рогинский. – Л.: Энергия, 1979. – 112 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**V.V. Meduneciy**

#### **SEARCHING FOR AND STUDY NEW CHARACTERISTIC MIKROGEOMETRII SURFACES OF THE DETAILS**

At present actively develops both in mechanical engineer, and in electronics microsystem technology In given article is considered physical essence of the phenomena to magnetic permeability, as well as is put(deliver)ed problems of the further work in the field of searching for and studies influences microgeometry, to example, on magnetic permeability of the details under-boron.

*Key words:* electromagnetic protection, microminiaturization, screening, penetration distance.

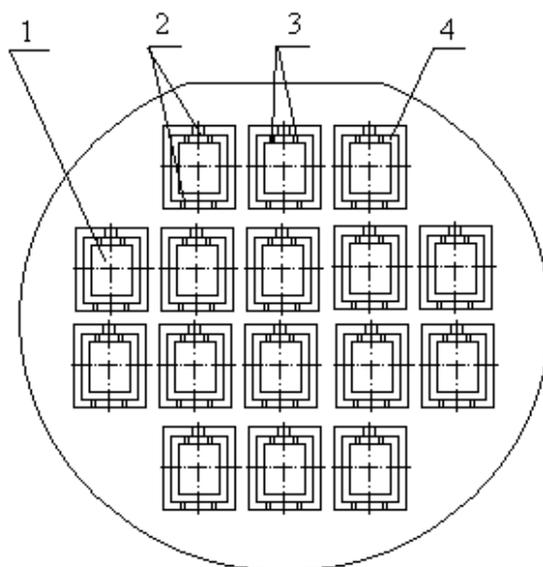
УДК 539.67

И.В. Китаев<sup>1</sup>, В.И. Обухов<sup>2</sup>**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СОЕДИНЕНИЯ СИСТЕМЫ «Si – Si – Si» С МИНИМАЛЬНЫМИ ОСТАТОЧНЫМИ ВНУТРЕННИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа»<sup>1</sup>,  
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Предложен способ группового соединения системы «Si – Si – Si» и приспособление для сварки такой системы. Рассмотрены теоретические аспекты обеспечения оптимального режима соединения системы «Si – Si – Si» с целью минимизации в ней остаточных внутренних напряжений.

*Ключевые слова:* структурные деформации, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, трехслойная система, упругий подвес, мембрана.

Работы, проводимые авторами в рамках НИОКР, позволили освоить групповой метод соединения микромеханических деталей выполненных из монокристаллического кремния, и создать устройство для сварки, позволяющее существенно повысить качество соединяемых микромеханических деталей и процент выхода годных [4]. Для обеспечения групповой технологии сварки нами предложен способ соединения отдельных деталей чувствительных элементов (ЧЭ), которые остаются закрепленными в монокристаллическом кремнии после травления за счет технологических перемычек (рис. 1). Только после выполнения сварки ЧЭ «выламываются» из пластины.



**Рис. 1. Монокристаллическая кремниевая пластина с вытравленными микромеханическими деталями (например, акселерометра):**

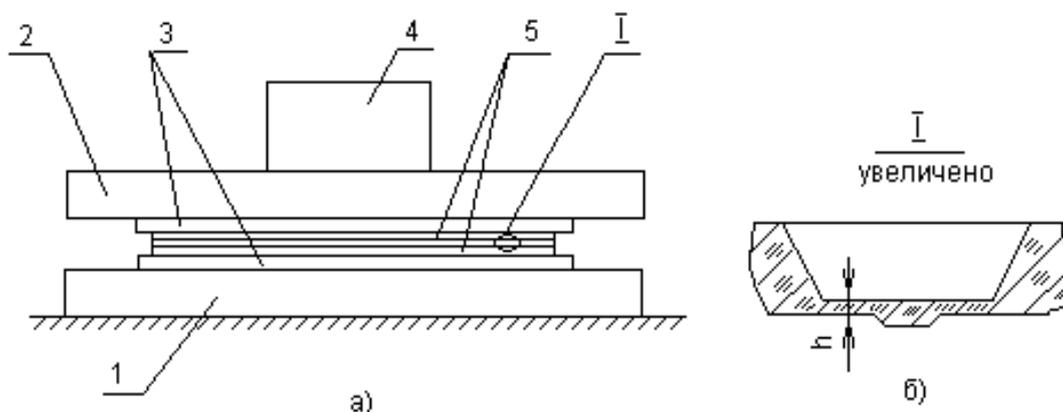
1 – чувствительная масса акселерометра; 2 – технологические перемычки;  
3 – упругие подвесы чувствительной массы; 4 – рамка

Известные приспособления для соединения микромеханических деталей не всегда полностью отвечают тем требованиям, которые к ним предъявляются. Например, приспособ-

ление, использующее метод анодной сварки предназначено для соединения одного или нескольких элементов, чаще всего это структура «стекло – кремний – стекло». Это приспособление не предназначено для групповой сборки. При сварке соединяемых микромеханических деталей их необходимо точно позиционировать относительно друг друга и создать необходимое усилие прижатия на каждую соединяемую структуру.

Существует также устройство для группового соединения деталей в составе нескольких пластин, описанное в [3]. Соединение в таком устройстве происходит за счет задаваемой температуры в зоне соединяемых деталей и усилия их сжатия. Совмещение двух или более пластин с микромеханическими деталями в нем обеспечивается штырями, которые вставляются в имеющиеся в пластинах отверстия.

Получение качественной сварки нами было достигнуто за счет того, что в приспособление для группового соединения микромеханических деталей (рис. 2, а), дополнительно введены две прижимные пластины, одна из которых расположена между основанием и пластинами с соединяемыми микромеханическими деталями, а другая между крышкой и пластинами с соединяемыми деталями. Каждая из прижимных пластин содержит подпружиненные упругими мембранами прижимы (рис 2, б).



**Рис. 2. Приспособление для группового соединения микромеханических деталей:**

а – приспособление: 1 – основание; 2 – крышка; 3 – прижимные пластины; 4 – груз; 5 – свариваемые пластины; б – прижимная мембрана

Прижим на пластине расположен таким образом, что его центр находится на пересечении биссектрис, выходящих из трех углов треугольника, образованного тремя точками сварки. Отличие разработанного приспособления для сварки по сравнению с используемыми нами ранее, заключается в наличии новых по конструкции прижимов. Новые прижимы (прижимные мембраны) обеспечивают равномерный прижим каждой из свариваемой системы, несмотря на возможную погрешность геометрии формы пластин, например, неравномерность толщины пластины. Сварка пластин с микромеханическими деталями осуществляется в вакууме при давлении  $P = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. и при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ , через слой эвтектики.

Микромеханические детали при сжатии должны иметь плоскопараллельное смещение, так как соединение должно происходить по всей плоскости (в нашем случае по трем точкам). Соединяемые детали получены в процессе травления в рамке 4 (см. рис. 1) на пластине. Следовательно, прогиб рамки будет определять качество соединения, при этом необходимо учитывать и жесткость прижимов, так как соединяемые детали имеют жесткость намного выше, чем жесткость рамки, в которой они сформированы. Чтобы обеспечить плотное соединение микромеханических деталей, необходимо выполнить условие:

$$G_m \geq G_p, \quad (1)$$

где  $G_m$  - жесткость прижимной мембраны;  $G_p$  - жесткость рамки в пластине.

Для определения требуемых упругих характеристик мембраны: ее прогиба и жёсткости, примем ее расчетную модель (рис. 3).

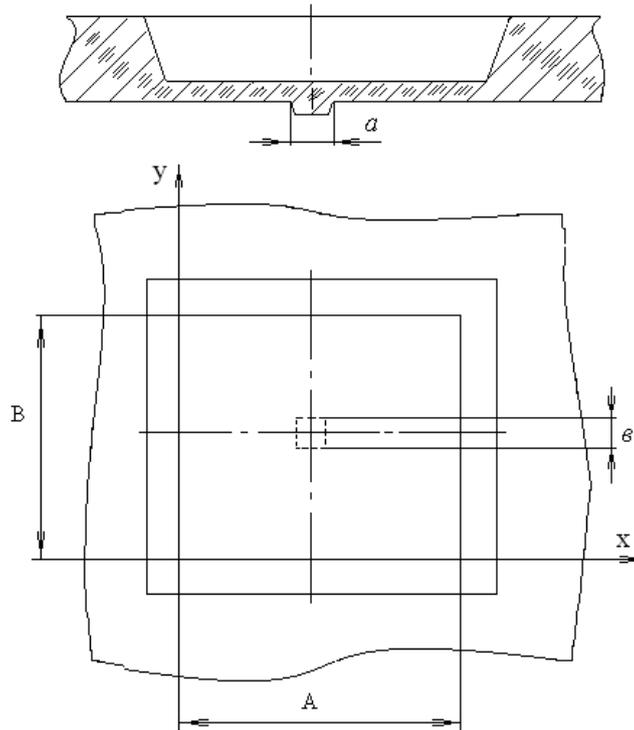


Рис. 3. Расчетная модель прижимной мембраны

В качестве граничных условий примем жёсткую область мембраны (размеры более A и B) по внешнему контуру, так как мембрана выполнена монолитно с корпусной пластиной. Вдоль рёбер, параллельных оси x и y, граничные условия запишутся [1]:

$$w = 0; \quad \partial w \partial w / \partial x = 0, \quad w = 0; \quad \partial w \partial w / \partial y = 0, \quad (2)$$

где  $w$  - прогиб прижимной мембраны. Дополнительным граничным условием в данной задаче является условие жёсткого центра мембраны, которое выражается значением максимального прогиба вдоль оси  $z$  недеформируемого центра, т.е. при  $x = (A - a)/2$  и  $y = (B - e)/2$ :

$$w = w_{\max}. \quad (3)$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся интегральным соотношением Бубнова-Галеркина, выражающее равенство нулю работы всех внешних и внутренних сил, приложенных к изогнутой срединной поверхности мембраны при возможных ее перемещениях.

$$\int_{x=0}^{x=A-e} \int_{y=0}^{y=B-e} [D \nabla^4 w(x, y) - \Delta p] \varphi(x, y) dx dy = 0, \quad (4)$$

где  $D$  - цилиндрическая жёсткость мембраны;  $\nabla^4$  - бигармонический дифференциальный оператор;  $\Delta p = p_1 - p_2$  - разность давлений равномерно распределённых между верхней и

нижней поверхностям мембраны;  $p_1$  – давление с нижней стороны прижимной мембраны  $p_1 = 0$ ,  $p_2$  – давление создаваемое грузом 4 (см. рис. 2).

$$p_2 = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S}, \quad S = \sum s_k \cdot n, \quad (5)$$

где  $S$  – суммарная площадь соединяемых пластин;  $s_k$  – площадь соединяемого микроэлемента;  $n$  – количество мультиплицированных и вытравленных элементов на пластине;  $m$  – масса груза;  $g$  – ускорение свободного падения.

Функция  $[D\nabla^4 w(x, y) - \Delta p]$ , называемая функцией Софи-Жермен, представляет собой проекцию на ось  $z$  всех внешних и внутренних сил, приложенных к элементарной площадке  $dxdy$ ; функция  $\varphi(x, y)$  возможных перемещений по оси  $z$ . Функция прогиба в общем виде может быть записана в виде [1]

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \alpha_{kl} \varphi(x, y), \quad (6)$$

где функция  $\varphi(x, y) = [1 - \cos(2k\pi x / (A - a))] [1 - \cos(2l\pi y / (B - b))]$ , которая удовлетворяет всем граничным условиям;  $\alpha_{kl}$  – константы, зависящие от геометрических размеров мембраны, механических свойств материала мембраны и действующего давления;  $A, B, a, b$  – размеры прижимной мембраны и жёсткого центра.

В двойном интеграле (4) цилиндрическая жесткость мембраны может быть определена

$$D = \frac{E_{[100]} h_m^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (7)$$

где  $E_{[100]}$  – модуль упругости в направлении [100];  $h_m$  – толщина мембраны;  $w_{\max}$  – необходимый прогиб прижимной мембраны;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Из соотношений (6) и (7) можно определить величину прогиба квадратной мембраны с жёстким центром:

$$w = \frac{\Delta p (A - a)^4}{8\pi^4 D}. \quad (8)$$

Если в равенство (8) подставить значение  $D$ , можно определить необходимую толщину мембраны для заданной массы груза 4 приспособления для групповой сварки чувствительных элементов:

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{12\Delta p (A - a)^4 (1 - \nu^2)}{8\pi^4 E_{[100]} w}}. \quad (9)$$

К примеру, для прижимной мембраны с размерами  $A = B = 4.6$  мм,  $a = b = 0.8$  мм.;  $E_{[100]} = 1.46 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $\nu = 0.358$ ;  $p_2 = 3.6 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>, нами была определена ее толщина, при условии, что количество мультиплицированных элементов на пластине  $n = 77$  (соответственно, столько же прижимных мембран на пластине):

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{12 \times 360 \times 10^3 \times (4.6 \times 10^{-3} - 0.8 \times 10^{-3})^4 \times (1 - 0.358^2)}{8 \times 3.14^4 \times 1.46 \times 10^{11} \times 6 \times 10^{-6}}} = 10.49 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Найдем жесткость прижимной мембраны. Жесткость любой мембраны определяется как отношение максимальной силы, действующей на мембрану к величине ее максимального прогиба т.о. максимальный прогиб имеет место при  $x = y = a/2$ :

$$G_m = \frac{8\pi^4 A^2 D}{(A-a)^4} \cdot \quad (10)$$

Для конкретных условий, которые были в нашем случае:

$$D = \frac{1.46 \cdot 10^{11} \times (104.9 \cdot 10^{-6})^3}{12 \times (1 - 0.358^2)} = 16.05 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м},$$

$$G_m = \frac{8 \times 3.14^4 \times (4.6 \cdot 10^{-3})^2 \times 16.05 \cdot 10^{-3}}{(4.6 \cdot 10^{-3} - 0.8 \cdot 10^{-3})^4} = 12.55.9 \text{ кН/м}^2.$$

Найдем жесткость рамки (рис. 1, поз. 4). Для нашего случая (рис. 4) жесткость рамки определяется выражением:

$$G_p = E_{[100]} J_x, \quad (11)$$

где  $J_x$  – момент инерции сечения рамки (см. рис. 4). Момент инерции  $J_x$  состоит из суммы моментов инерции двух тел, прямоугольника и ромба.

$$J_x = J_{x.пр} + J_{x.р}. \quad (12)$$

Вычислив значение  $J_x$  и подставив в равенство (11), определим жесткость одной рамки. Суммарная жесткость будет определяться произведением жесткости одной рамки на количество таких рамок на пластине.

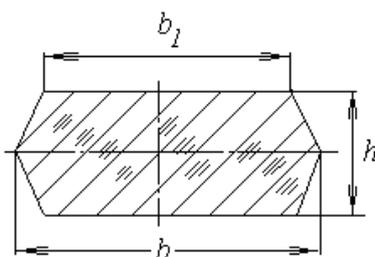


Рис. 4. Сечение рамки

Выполнение условия (1) позволяет реализовать такие усилия сжатия в процессе сварки системы «кремний – кремний – кремний», которые обеспечивают соединение микромеханических деталей с минимальными остаточными внутренними напряжениями. Выполненные расчеты по приведенным равенствам, и сварка с учетом рекомендаций, подтвердили ожидаемые результаты. В настоящее время на предприятии ОАО АНПП «Темп-Авиа» при-способление, которое используется для групповой сварки микромеханических деталей чувствительных элементов интегральных датчиков, претерпевает дальнейшие изменения. Предложенный способ групповой сварки микромеханических деталей обеспечивает идентичность режимов сварки по каждому отдельному чувствительному элементу, с минимальными остаточными внутренними напряжениями в их структуре.

### Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003.
2. **Добронравов, В.В.** Курс теоретической механики / В.В. Добронравов. – М.: Высш. школа, 1990.
3. **Пичугин, И.Г.** Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.М. Таиров. – М.: Высш. школа, 1984.
4. Пат. РФ на изобретение № 2262154. Приспособление для группового соединения микромеханических деталей / Китаев, И.В., Былинкин, С.Ф. приоритет от 09.04. 2004.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**I.V. Kitaev, V.I. Obuchov**

### **3-LAYER STRUCTURE (Si-Si-Si) BATCH BONDING METHOD OPTIMIZATION TO MINIMIZE RESIDUAL INTERNAL STRESSES.**

3-layer structure (Si-Si-Si) batch bonding method and apparatus are proposed. Theoretical aspects of 3-layer structure (Si-Si-Si) batch bonding method optimization to minimize residual internal stresses therein are disclosed.

*Key words:* structural deformation, semiconductor silicon, sensing element, 3-layer structure (Si-Si-Si), elastic suspension, membrane.

УДК 621.398.694

А.В. Корнилов

**СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ**

ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа»

В статье приводится принцип действия системы ориентации летательного аппарата на примере бесплатформенной системы ориентации на интегральных датчиках. Рассмотрен вопрос начальной ориентации летательного аппарата путем определения направляющих косинусов.

*Ключевые слова:* бесплатформенная система ориентации, интегральные датчики, ориентация в пространстве, фильтрация сигнала.

Анализ современных систем ориентации летательных аппаратов разной степени точности показывает, что производители стремятся уменьшить их габариты и снизить стоимость за счет применения интегральных датчиков. И если при применении гиросtabilизированных платформ (например, для баллистических ракет) это сделать очень сложно, то для бескарданных систем ориентации (применяемых на высокоманевренных ЛА) тенденция к уменьшению габаритов прослеживается довольно четко. Ярким примером может служить развитие гироскопов. Длительное время используемые классические гироскопы с вращающимся ротором уступают место лазерным и волоконно-оптическим гироскопам. Казалось, что эти типы гироскопов надолго займут господствующее место, однако производители новейших МЭМС датчиков доказывают обратное.

Поэтому большинство производителей систем ориентации ведут разработки именно в сфере бесплатформенных систем ориентации.

Уже сейчас рядом зарубежных фирм Rockwell Collins [3], Honeywell [4], Systron Donner на базе интегральных гироскопов и акселерометров разрабатываются малогабаритные гироскопы и курсовертикали для всевозможных летательных аппаратов гражданского и военного применения, бесплатформенные инерциальные системы со спутниковой коррекцией и т.д.

Такая активность использования интегральных датчиков объясняется их многочисленными преимуществами: малыми размерами, малым энергопотреблением, высокой надежностью, низкой стоимостью. Между тем эти датчики имеют существенный недостаток – пока еще невысокую точность. Именно эта причина является препятствием на пути масштабного использования интегральных датчиков как основных средств получения информации в системах ориентации летательных аппаратов.

Задача повышения точности интегральных датчиков заставляет как иностранных, так и отечественных разработчиков искать новые решения на основе применения новых схемотехнических конструкций и программно-математических методов. А так как внедрение новых схемотехнических конструкций – довольно трудоемкий процесс, то создание программно-математических фильтров является основным направлением для повышения точности интегральных датчиков, применяемых в системах ориентации летательных аппаратов. Известно, что самые большие погрешности измерения имеют МЭМС-датчики. Для повышения точности их необходимо постоянно корректировать, либо делать интервалы их автономной работы предельно малыми. В результате чего для обеспечения точного позиционирования в пространстве летательного аппарата, помимо коррекции извне (например, от спутника), применяют программные алгоритмы и специальные методы калибровки. Это дает основания утверждать, что именно калибровка и специальное программное обеспечение МЭМС-датчиков позволит получить требуемые точность и надежность.

Для того, чтобы понять принцип коррекции и пересчета значений, получаемых от датчиков первичной информации, необходимо рассмотреть принцип действия системы ориентации летательного аппарата. Структурная схема одного из возможных вариантов реализации приведена на рис. 1 [2].

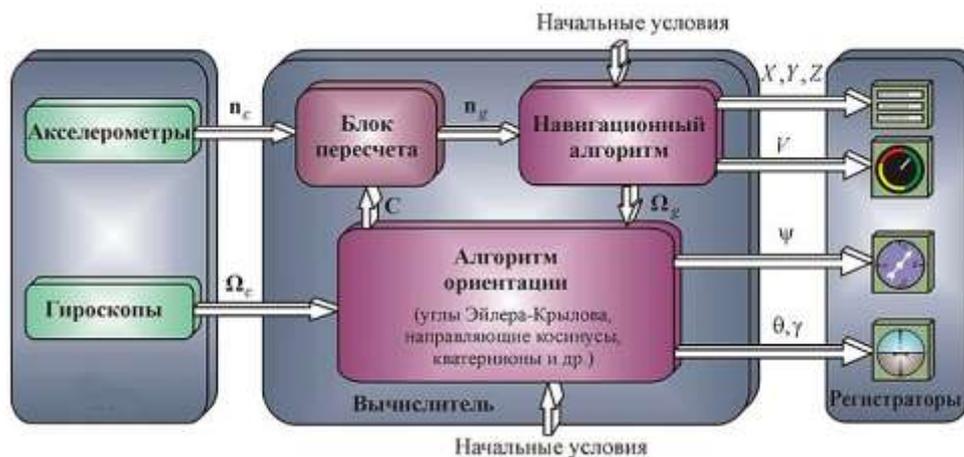


Рис. 1. Структурная схема системы ориентации

Как видно из приведенного рисунка, сигналы, поступающие с гироскопов и акселерометров, обрабатываются и преобразуются с помощью программно-математических фильтров в вычислителе и выдаются на внешние индикаторы в аналоговом или цифровом виде. Помимо крена и тангажа, получаемых и корректируемых в результате пересчета значений гироскопов и акселерометров, система ориентации выдает множество параметров, получаемых от внешних датчиков.

Чрезвычайно важной задачей является правильная начальная выставка систем ориентации летательных аппаратов. Рассмотрим принцип начальной ориентации на примере бесплатформенной системы [2]. При бесплатформенной схеме построения системы ориентации гироскопы и акселерометры размещаются непосредственно на корпусе ЛА или монтируются в блоки, которые затем жестко укрепляются на нем. Поэтому под начальной выставкой БСО понимают геометрический способ согласования приборной системы координат  $Oxuz$ , а, следовательно, и системы координат  $OXYZ$ , связанной с корпусом ЛА, с осями стартовой системы  $O\xi\eta\gamma$ , определенным образом ориентированной в азимуте относительно осей географической системы  $OENH$ , либо аналитический метод определения параметров ориентации, характеризующих начальное положение осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  относительно  $OENH$  (рис. 2).

Техническая реализация по первому способу при высоких требованиях к точности и времени процесса выставки очень сложна. Поэтому наиболее перспективным методом выставки как бесплатформенных, так и платформенных гироскопических систем ориентации, находящихся в фиксированном положении относительно корпуса ЛА, в настоящее время является аналитический способ.

Рассмотрим вариант, когда в системе используются углы последовательных поворотов  $\psi_0, \nu_0, \gamma_0$ . За исходное примем положение, когда ЛА ориентирован в восточном направлении, а оси  $Ox$  и  $Oz$  горизонтальны.

При переходе от неподвижной относительно земли системы координат  $OENH$  к приборной  $Oxuz$  в соответствии с рис. 2 используется матрица  $M^0$ , которая может быть получена перемножением (в последовательности, обратной поворотам) матриц отдельных преобразований координат

$$M^0 = M_{\gamma_0} \times M_{\nu_0} \times M_{\psi_0}, \quad (1)$$

где

$$M_{\psi_0} = \begin{pmatrix} \cos \psi_0 & \sin \psi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin \psi_0 & -\cos \psi_0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$M_{\nu_0} = \begin{pmatrix} \cos \nu_0 & \sin \nu_0 & 0 \\ -\sin \nu_0 & \cos \nu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$M_{\gamma_0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_0 & \sin \gamma_0 \\ 0 & -\sin \gamma_0 & \cos \gamma_0 \end{pmatrix}.$$

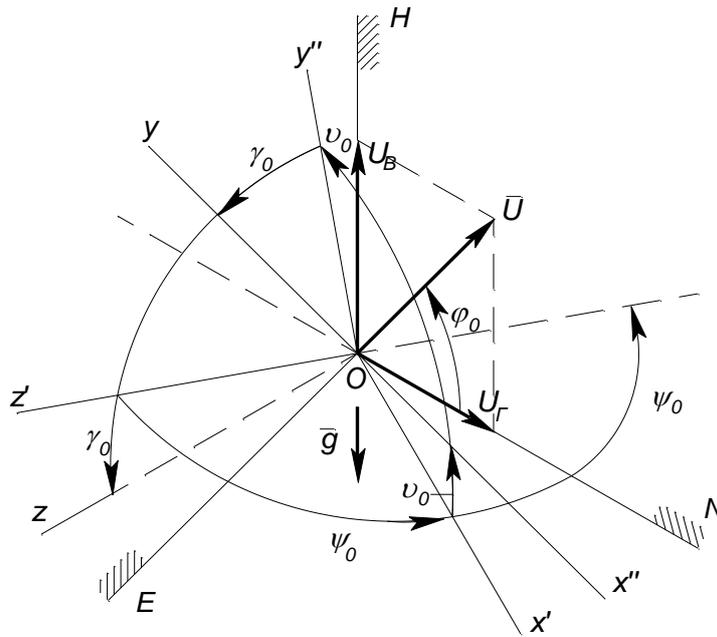


Рис. 2. Определение начальной ориентации бесплатформенной системы ориентации

После перемножения этих матриц получаем матрицу:

$$M^0 = \begin{pmatrix} \cos \nu_0 \cos \psi_0 & \cos \nu_0 \sin \psi_0 & \sin \nu_0 \\ \sin \gamma_0 \sin \psi_0 - \cos \gamma_0 \sin \nu_0 \cos \psi_0 & -\cos \gamma_0 \sin \gamma_0 \sin \psi_0 - \sin \gamma_0 \cos \psi_0 & \cos \gamma_0 \cos \nu_0 \\ \sin \gamma_0 \sin \nu_0 \cos \psi_0 + \cos \gamma_0 \sin \psi_0 & \sin \gamma_0 \sin \gamma_0 \sin \psi_0 - \cos \gamma_0 \cos \psi_0 & -\sin \gamma_0 \cos \nu_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

На основании (2) и рис. 2 определяем проекции векторов  $g$  и  $U$  на оси приборной системы координат  $Ox''y''z''$  в виде

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -g \times \sin \nu_0 \\ g_y &= -g \times \cos \gamma_0 \times \cos \nu_0 \\ g_z &= g \times \sin \gamma_0 \times \cos \nu_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_\Gamma \times \cos \nu_0 \times \sin \psi_0 + U_B \times \sin \nu_0; \\ U_y &= -U_\Gamma \times (\cos \gamma_0 \times \sin \nu_0 \times \sin \psi_0 + \sin \gamma_0 \times \cos \psi_0) + U_B \times \cos \gamma_0 \sin \nu_0; \\ U_z &= U_\Gamma \times (\sin \gamma_0 \times \sin \nu_0 \times \sin \psi_0 - \cos \gamma_0 \times \cos \psi_0) - U_B \times \sin \gamma_0 \times \cos \nu_0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $U$  – угловая скорость вращения земли.

$$U_\Gamma = U \times \cos \varphi_0; U_B = U \times \sin \varphi_0$$

Согласно (3) и (4) определяем

$$\nu_0 = \arcsin\left(-\frac{g_x}{g}\right), \quad (5)$$

$$\gamma_0 = \arcsin\left(\frac{g_z}{\sqrt{g^2 - g_x^2}}\right) = \arctan\left(-\frac{g_z}{g_y}\right), \quad (6)$$

$$\psi_0 = \arcsin \frac{U_x - U_B \times \sin \nu_0}{U_\Gamma \times \cos \nu_0}. \quad (7)$$

Определив начальные значения углов ориентации  $\nu_0, \gamma_0, \psi_0$ , можно рассчитать направляющие косинусы  $m_{ij}$ , образующие матрицу  $M^0$  начальной ориентации.

Для формирования матрицы  $M^0$  начальной ориентации системы координат  $OENH$  (см. рисунок 2) определяются проекции вектора  $\bar{g}$  на оси  $Oxyz$  в виде

$$\left. \begin{aligned} g_x &= -g \times \cos \varphi_{13} = -g \times m_{13}, \\ g_y &= -g \times \cos \varphi_{23} = -g \times m_{23}, \\ g_z &= g \times \cos \varphi_{33} = g \times m_{33} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из этих выражений можно определить направляющие косинусы  $m_{13}, m_{23}, m_{33}$ , образующие третий столбец матрицы  $M^0$ :

$$m_{13} = -\frac{g_x}{g}; m_{23} = -\frac{g_y}{g}; m_{33} = \frac{g_z}{g}. \quad (9)$$

Для вычисления направляющих косинусов  $m_{12}, m_{22}, m_{32}$ , образующих второй столбец матрицы  $M^0$ , необходимо составить выражения для проекций вектора угловой скорости вращения Земли  $\bar{U}$  на оси системы координат  $Oxyz$  (рис. 3):

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_B \times \cos \varphi_{13} + U_\Gamma \times \cos \varphi_{12} = U_B \times m_{13} + U_\Gamma \times m_{12}, \\ U_y &= U_B \times \cos \varphi_{23} - U_\Gamma \times \cos \varphi_{22} = U_B \times m_{23} - U_\Gamma \times m_{22}, \\ U_z &= U_B \times \cos \varphi_{33} - U_\Gamma \times \cos \varphi_{32} = U_B \times m_{33} - U_\Gamma \times m_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из (10) получено:

$$m_{12} = \frac{(U_x - U_B \times m_{13})}{U_\Gamma}; m_{22} = \frac{(U_y - U_B \times m_{23})}{U_\Gamma}; m_{32} = \frac{(U_z - U_B \times m_{33})}{U_\Gamma}. \quad (11)$$

По рассчитанным шести элементам матрицы  $M^0$  вычисляют ее первый столбец, т.е. направляющие косинусы  $m_{11}, m_{21}, m_{31}$ , используя функциональную связь между соответствующими элементами матриц в виде

$$\left. \begin{aligned} m_{11} &= m_{23} \times m_{32} - m_{22} \times m_{33}, \\ m_{21} &= m_{12} \times m_{33} - m_{13} \times m_{32}, \\ m_{31} &= m_{13} \times m_{22} - m_{12} \times m_{23}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

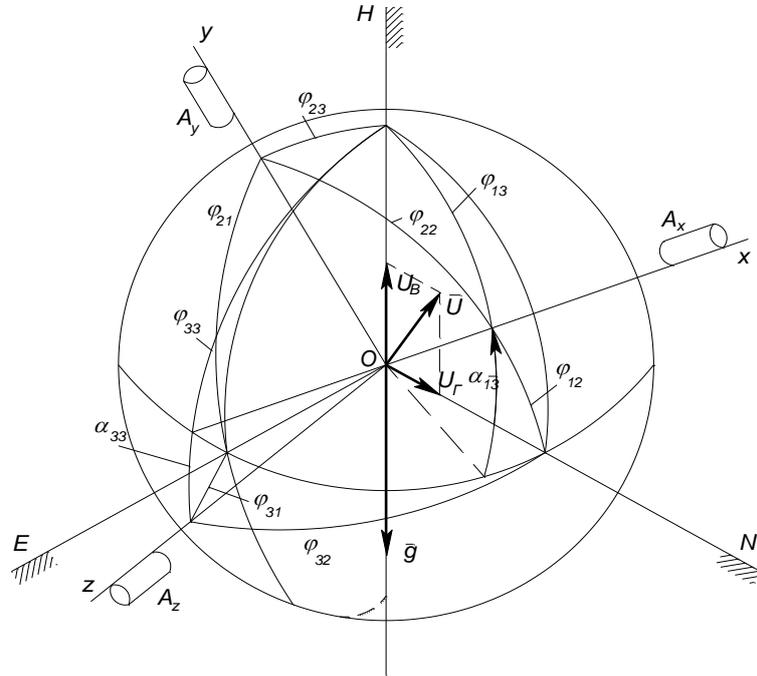


Рис. 3. Определение направляющих косинусов, характеризующих начальную ориентацию БСО

В процессе подготовки ЛА к старту его корпус, как правило, занимает положение, близкое к плоскости горизонта или вертикали места. В случае малых угловых отклонений, когда с достаточной точностью можно заменить функции синусов углов самими углами, на основании рис. 3 можем получить направляющие косинусы  $m_{ij}$  :

$$\left. \begin{aligned} m_{13} &= \cos \varphi_{13} = \sin \alpha_{13} \approx \alpha_{13}, \\ m_{23} &= \cos \varphi_{23} \approx 1, \\ m_{33} &= \cos \varphi_{33} = \sin \alpha_{33} \approx \alpha_{33}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{12} &= \frac{(U_x - U_B \times m_{13})}{U_G}, \\ m_{22} &= \frac{(U_y - U_B \times m_{23})}{U_G}, \\ m_{23} &= \frac{(U_z - U_B \times m_{33})}{U_G}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} m_{11} &= m_{23} \times m_{32} - m_{22} \times m_{33}, \\ m_{21} &= m_{12} \times m_{33} - m_{13} \times m_{32}, \\ m_{31} &= m_{13} \times m_{22} - m_{12} \times m_{23}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Система ориентации является важнейшим узлом любого летательного аппарата, поэтому повышение надежности систем, снижение погрешностей интегральных датчиков, применяемых в этих системах – задачи, которые приходится решать разработчикам. Пути решения этих задач могут быть самыми разнообразными, начиная от изменения конструктива и дополнительного резервирования, и заканчивая усовершенствованием применяемых алгоритмов и программных фильтров. Однозначно можно утверждать, что применение интегральных датчиков для построения систем ориентации является перспективным направлением развития авиации.

#### Библиографический список

1. **Лавойе, Ф.** Разработка инерциальной навигационной системы на МЭМС датчиках / Ф. Лавойе, Ли Ди, Р. Ландри // Гироскопия и навигация. 2009. №1 (64). С. 75–85.
2. **Матвеев, В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
3. [www.rockwellcollins.com](http://www.rockwellcollins.com)
4. [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com)

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**A.V. Kornilov**

#### **THE NAVIGATION SYSTEM OF THE AIRCRAFT BASED ON INTEGRATED SENSORS**

In this article the principle of operation of navigation system of the aircraft on an example of the strapdown system is resulted. The question of initial orientation of aircraft by the directional cosines definition is considered.

*Key words:* strapdown system, integrated sensors, spatial orientation, signal filtering.

**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 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, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, аннотации и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

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

**№ 4 (83)**

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**

*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 08.12.2010. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 41,75. Уч.-изд. л. 38. Тираж 300 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

**Индекс 10312**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**