

<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>1</b>
Исследование параметров поверхностно окрашенных полимерных линз	<i>Кременская А. А., Пруненко Е. К.</i> 1
Метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток	<i>Варжель С.В., Стригалева В.Е.</i> 5
Получение оптических поверхностей элементов на основе сульфида цинка	<i>Вилкова Е.Ю., Тимофеев О.В.</i> 9
Цифровая обработка дифракционных картин Фраунгофера при контроле геометрических параметров объектов	<i>Иванов А.Н., Михайлов В.М.</i> 14
<b>ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	<b>17</b>
Исследование параметров микроструктуры пленок хрома и их влияния на результаты локального термохимического окисления под действием лазерного излучения	<i>Агафонов А.Н.</i> 17
Исследование структуры тонких металлических пленок после воздействия фемтосекундных лазерных импульсов	<i>Вейко В.П., Баранов А.В., Ярчук М.В., Иванов А.И., Богданов К.В.</i> 21
Исследование воздействия УФ излучения на поверхность тонких пленок	<i>Гавриш Е.О., Чуйко В.А.</i> 26
Исследование процесса формирования светоконтрастного растра посредством лазерного маркирования	<i>Юльметова О.С., Щербак А.Г.</i> 28
<b>АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>34</b>
Управление нетривиальными маятниковыми системами в условиях параметрической и функциональной неопределенностей	<i>Колюбин С.А., Пыркин А.А.</i> 34
Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12	<i>Толмачев В.А., Никитина М.В., Сергеева М.Е.</i> 39
Расчет коэффициентов прохождения и отражения в системе связанных квантовых волноводов	<i>Гаврилов М.И., Попов И.Ю.</i> 43
Программный комплекс для анализа эффективности алгоритмов решения нелинейных задач обработки навигационной информации	<i>Торопов А.Б., Васильев В.А.</i> 48
Компенсация радиальных электромагнитных сил вентильного двигателя, вызванных несимметрией статорной обмотки	<i>Овчинников И.Е., Егоров А.В.</i> 52
Двухчастичная модель проводника с квантовым кольцом	<i>Еремин Д.А.</i> 58
Расчет составных частей спектрометрического позиционно-чувствительного детектора нейтронов	<i>Постоварова Д.В.</i> 62
Об учете источников электромагнитного поля в совместном методе конечных и граничных элементов	<i>Ступаков И.М., Корсун М.М., Рояк М.Э.</i> 67
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>72</b>
Разработка алгоритма формирования пакетов заказов в условиях виртуального предприятия	<i>Саломатина А.А., Субботин И.А., Яблочников Е.И.</i> 72
Имитация гидростатического давления при испытаниях пусковых устройств автономных необитаемых подводных аппаратов в цеховых условиях	<i>Валетов В.А., Красильников А.В.</i> 75
<b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>81</b>
Применение генетического программирования для построения автоматов управления системами со сложным поведением на основе обучающих примеров и спецификации	<i>Егоров К.В., Царев Ф.Н., Шальто А.А.</i> 81
Алгоритм восстановления трехмерной модели лица по фотографии	<i>Шлянников А.В.</i> 86
Применение шаблонов требований к формальной спецификации и верификации автоматных программ	<i>Клебанов А.А., Степанов О.Г., Шальто А.А.</i> 91
Особенности оптимизации вычислений в прикладных программах на языке С на примере оценивания опционов европейского типа	<i>Бастраков С.И., Донченко Р.В., Мееров И.Б., Половинкин А.Н.</i> 95
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>101</b>
Статистический анализ структуры нанопористых стекол по изображениям, полученным методом конфокальной сканирующей лазерной микроскопии	<i>Кухтевич И.В., Евстратов А.А.</i> 101
<b>ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА.....</b>	<b>106</b>
Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей	<i>Кириллов К.В., Пилипенко Н.В.</i> 106
<b>БИОМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>110</b>
Перспективы развития инновационных направлений исследований в области лазерных систем и биомедицинских оптических технологий	<i>Беликов А.В., Храмов В.Ю.</i> 110
Метод оптической диффузионной спектроскопии для <i>in vivo</i> исследования динамики оксигенации опухоли	<i>Голубятников Г.Ю., Масленникова А.В., Орлова А.Г., Пряникова Т.И.</i> 114
<b>НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ .....</b>	<b>118</b>
Предметно-ориентированные языки в описании задач научных соревнований	<i>Богданов М.С., Рукишин С.Е., Степуленок Д.О.</i> 118
Интерактивный тренажерный комплекс для государственных образовательных учреждений	<i>Яговкин В.И., Стафеев С.К.</i> 122
<b>ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ .....</b>	<b>126</b>
Совершенствование управления конкурентоспособностью торгового предприятия в условиях сервисно-ориентированной экономики	<i>Чернышева О.В.</i> 126
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ.....</b>	<b>130</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>134</b>



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР.....**

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ .....**

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,  
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян,  
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин,  
к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова, д.т.н., профессор А.В. Демин,  
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),  
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,  
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,  
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,  
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,  
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.т.н., профессор П.П. Парамонов,  
д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин, д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина,  
д.т.н. О.А. Степанов, д.т.н., профессор В.Л. Ткалич,  
д.т.н., профессор А.А. Шалыто, д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь Г.О. Артемова

Редактор Н.Ф. Гусарова

Перевод Н.Г. Лещикова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО, комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51

<http://books.ifmo.ru/ntv/>

E-mail: [karmanov@mail.ifmo.ru](mailto:karmanov@mail.ifmo.ru)



# ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полужирной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста — Times New Roman, прямой; функции — Times New Roman, прямой; переменной — Times New Roman, наклонный; греческих букв — Symbol, прямой; символов — Symbol, прямой; матрицы-вектора — Times New Roman, прямой, полужирный; чисел — Times New Roman, прямой. Размеры: обычный — 12 pt, крупный индекс — 10 pt, мелкий индекс — 8 pt, крупный символ — 16 pt, мелкий символ — 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей — запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту.

Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций — согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**Более подробную информацию смотрите на сайте <http://books.ifmo.ru/ntv/>**

Подписано к печати 15.08.2010 Тираж 350 экз. Заказ № 17(69)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи  
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.  
Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать  
(Газеты. Журналы)

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

<b>OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES</b> .....	<b>1</b>
Parameters research of superficially colored polymeric lenses	<i>A. Kremenskaya, E. Prunenko</i> 1
Method for eliminating the noise signal influence on the sensitivity of receiving hydroacoustic antenna based on fiber Bragg gratings	<i>S. Varzhel, V. Strigalev</i> 5
Optical surfaces production of elements on the base of zinc sulfide	<i>E. Vilkova, O. Timofeev</i> 9
Digital processing of Fraunhofer diffraction patterns at the objects geometrical parameters control	<i>A. Ivanov, V. Michailov</i> 14
<b>LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES</b> .....	<b>17</b>
Investigation of microstructure parameters of chrome films and their influence on results of local thermochemical oxidation by laser radiation	<i>A. Agafonov</i> 17
Thin metal films structure research after femtosecond laser recording	<i>V. Veiko, A. Baranov, M. Yarchuk, A. Ivanov, K. Bogdanov</i> 21
Investigation of the ultraviolet radiation influence on the thin films surface	<i>E. Gavrish, V. Chuiko</i> 26
The research of the contrast raster creation process by laser marking	<i>O. Yulmetova, A. Scherbak</i> 28
<b>ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS</b> .....	<b>34</b>
Nontrivial pendulum systems control under conditions of parametric and functional uncertainties	<i>S. Kolyubin, A. Pyrkin</i> 34
Control system synthesis of the electric drive of the Altay telescope azimuthal axis	<i>V. Tolmachev, M. Nikitina, M. Sergeeva</i> 39
Transmission and reflection coefficients calculation in coupled quantum waveguide system	<i>M. Gavrilov, I. Popov</i> 43
Software Package for performance analysis of algorithms for nonlinear navigation problems	<i>A. Toropov, V. Vasiliev</i> 48
The balancing of radial electromagnetic forces of gated electronic motor with asymmetrical stator winding	<i>I. Ovchinnikov, A. Egorov</i> 52
Two-body model of quantum wire coupled with quantum ring	<i>D. Eryomin</i> 58
Component calculation of the spectrometric position-sensitive neutron detector	<i>D. Postovarova</i> 62
On electromagnetic field inductors in joint finite and boundary element methods	<i>I. Stupakov, M. Korsun, M. Royak</i> 67
<b>INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION</b> .....	<b>72</b>
Formation algorithm development of order packages in virtual enterprises	<i>A. Salomatina, I. Subbotin, Ye. Yablochnikov</i> 72
Hydrostatic pressure imitation at trigger tests of independent uninhabited underwater vehicles in workshop conditions	<i>V. Valetov, A. Krasilnikov</i> 75
<b>COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES</b> .....	<b>81</b>
Application of genetic programming and model checking for finite-state machine induction on the base of tests and specification	<i>K. Egorov, F. Tsaryov, A. Shalyto</i> 81
Generation algorithm for 3D face model by a photograph	<i>A. Shlyannikov</i> 86
On the formal specification and verification of automata-based programs by specification patterns	<i>A. Klebanov, O. Stepanov, A. Shalyto</i> 91
Calculations optimization in applied software in C language on the example of European option pricing	<i>S. Bastrakov, R. Donchenko, I. Meerov, A. Polovinkin</i> 95
<b>MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES</b> .....	<b>101</b>
The statistical analysis of nanoporous glasses structure by images received with the method of confocal laser scanning microscopy	<i>I. Kukhtevich, A. Evstrapov</i> 101
<b>THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING</b> .....	<b>106</b>
Solution algorithms for direct and backward heat conductivity problems by means of differential-difference models	<i>K. Kirillov, N. Pilipenko</i> 106
<b>BIOMEDICAL TECHNOLOGIES</b> .....	<b>110</b>
Perspective for the development of innovative research areas in the field of laser systems and biomedical optical technologies	<i>A. Belikov, V. Khramov</i> 110
Method of diffuse optical spectroscopy for <i>in vivo</i> estimation of tumor oxygenation dynamics	<i>G. Golubyatnikov, A. Maslennikova, A. Orlova, T. Pryanikova</i> 114
<b>NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION</b> .....	<b>118</b>
Subject-oriented languages for description of scientific competitions problems	<i>M. Bogdanov, S. Rukshin, D. Stepulenok</i> 118
Interactive training complex for the state educational institutions	<i>V. Yagovkin, S. Stafeev</i> 122
<b>ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT</b> .....	<b>126</b>
Competitiveness management perfection of trade enterprise in the conditions of service-oriented economy	<i>O. Tchernysheva</i> 126
<b>BRIEF REPORTS</b> .....	<b>130</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>134</b>

УДК 681.73.066: 617.7-76: 53.082.53

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНО ОКРАШЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЛИНЗ**

А.А. Кременская, Е.К. Пруненко

Окрашивание полимерных очковых линз используется для изготовления солнцезащитных очков. Исследовано влияние времени поверхностного окрашивания полимерного материала CR-39 и концентрации раствора красителя на изменение его спектральных характеристик и показателя преломления. Показано, что с увеличением времени поверхностного окрашивания показатель преломления и коэффициент пропускания уменьшаются.

**Ключевые слова:** поверхностное окрашивание, полимерный материал CR-39, показатель преломления, коэффициент пропускания.

**Введение**

Очковые линзы из полимерных материалов занимают лидирующую позицию на рынках очковой оптики США, многих стран Западной Европы и России. Хорошие оптические свойства, меньшая, по сравнению с линзами из неорганического стекла, плотность, высокопроизводительный способ производства, позволяют получать качественные линзы различного типа и дизайна. Цветные солнцезащитные линзы получают путем окрашивания в объеме или с помощью поверхностного окрашивания.

Поверхностное окрашивание достигается путем равномерного или градиентного окрашивания полимерных линз. Поверхностное окрашивание полимерных линз производят в водных дисперсных растворах красителей при повышенной температуре (70–96°C). В основе окрашивания лежит процесс диффузии красителя в поверхностный слой линзы с адсорбцией полярных групп красителя на активных центрах полимера. В состав красильных композиций входят различные диспергаторы, смачиватели, активаторы для обеспечения однородности и интенсификации процесса окраски. Равномерная адсорбция молекул красителя в поверхностном слое линз обеспечивает одинаковую оптическую плотность по всему диаметру и позволяет получать равномерно окрашенные линзы высоких рефракций [1].

В настоящее время для окрашивания полимерных линз применяют импортные красители различных фирм: BPI (США), Phantom Research Laboratories Inc. (США), Gerber Coburn Optical International Inc. (США), Shades (США), Opticsol Super (Италия), Chemco (Великобритания) и др. Концентрат красителей выпускают как в жидких формах, так и в виде порошка.

Производители красителей для поверхностного окрашивания представляют до 188 оттенков и при этом не указывают спектральные характеристики этих красителей. В результате салоны оптик, окрашивающие линзы, придерживаются рекомендаций производителей по окрашиванию, не зная спектральные характеристики красителей и материалов очковых линз. Изменение спектральных характеристик после поверхностного окрашивания очковых линз очевидно. В большинстве случаев салоны оптик проводят только контроль цвета и оттенка поверхностно окрашенных очковых линз по образцу. Так же не известно изменение показателя преломления после поверхностного окрашивания очковых линз. Данная работа посвящена исследованию параметров (показатель преломления и спектральные характеристики) поверхностно окрашенных полимерных материалов для очковой оптики.

**Результаты исследования**

Для исследования параметров полимерных очковых линз были выбраны линзы из материала CR-39 марки ORMA-15 компании «Эссилор» (Франция) с задней вершинной рефракцией 0,0 дптр. Спектральные характеристики были измерены на спектрофотометре СФ-26, показатель преломления измерялся на рефрактометре ИРФ-454 БМ.

Для поверхностного окрашивания использовались дисперсные растворы органических красителей. Растворы красителей разводились дистиллированной водой в красильных стаканах. Перед окрашиванием проводилась проверка поверхностей линз, после чего их помещали в держатель и промывали в растворе моющего средства. После промывания, целью которого являлось обезжиривание поверхности, линзы помещались в красильные растворы. При проведении процесса окрашивания необходимо регулярно контролировать температуру в красильном стакане – для воспроизводимости результатов окрашивания температура должна быть постоянной [1].

Полимерные очковые линзы, используемые в исследовании, окрашивались при температуре красильных растворов 80°C. Очковые линзы были поверхностно окрашены в следующие цвета: фиолетовый,

голубой, розовый, оранжевый, антифара, желтый, коричневый, серый и зеленый. В каждый цвет окрашивалось по 7 образцов с выдерживанием в красильном растворе от 0,5 до 3,5 мин с шагом 0,5 мин. Это было сделано для определения зависимости изменения спектральных характеристик от времени окрашивания при постоянной температуре. Для исследования влияния концентрации красителя в растворе на изменение спектральных характеристик поверхностно окрашенных очковых линз использовался зеленый краситель с объемными долями в растворе 16,7; 20; 25; 33,3%. Окрашивание проводилось при постоянной температуре 80°C и времени окрашивания образцов от 0,5 до 2,5 мин с шагом 0,5 мин. После поверхностного окрашивания были проведены измерения спектральных характеристик и показателей преломления очковых линз при помощи спектрофотометра СФ-26 и рефрактометра ИРФ-454 БМ.

Спектрофотометр СФ-26 предназначен для измерения пропускательной способности  $T$  и оптической плотности  $D$  исследуемых образцов. Измерение производится по методу электрической автокомпенсации [2].

Принцип действия рефрактометра ИРФ-454 БМ основан на явлении полного внутреннего отражения при прохождении светом границы раздела двух сред с разными показателями преломления.

На рефрактометре модели ИРФ-454 БМ можно исследовать вещества с показателем преломления от 1,2 до 1,7. Точность измерения показателя преломления на рефрактометре составляет  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  [3]. В качестве иммерсионной жидкости использовался анилин с показателем преломления  $n_D=1,586$ .

Результаты измерения показателя преломления поверхностно окрашенных полимерных очковых линз в зависимости от времени окрашивания приведены в таблице.

Время окрашивания, мин	Коричневые	Зеленые	Голубые	Розовые	Оранжевые	Антифара	Желтые	Фиолетовые
0	1,4976	1,4989	1,4986	1,4999	1,5	1,4985	1,499	1,5
0,5	1,4975	1,4988	1,5	1,4995	1,4993	1,5005	1,4996	1,5
1	1,4975	1,4979	1,4983	1,5	1,5005	1,5	1,5002	1,5006
1,5	1,4979	1,4985	1,4989	1,4999	1,4985	1,499	1,4989	1,501
2	1,4975	1,498	1,4986	1,5	1,5	1,499	1,5002	1,501
2,5	1,497	1,4974	1,499	1,5004	1,5	1,4998	1,4988	1,5005
3	1,4974	1,498	1,499	1,5009	1,4992	1,4985	1,5006	1,501
3,5	1,4965	1,4976	1,4978	1,4984	1,5	1,4994	1,4996	1,5

Таблица. Значения показателя преломления поверхностно окрашенных в разные цвета очковых линз

Из таблицы видно, что показатель преломления поверхностно окрашенных очковых линз изменяется в третьем знаке после запятой, в зависимости от цвета и времени окрашивания. Это связано с тем, что показатель преломления поверхностно окрашенной очковой линзы из полимерного материала CR-39 при окрашивании приобретает комплексную составляющую поглощения:

$$n = n_1 \pm ix,$$

где  $ix$  – ослабление амплитуды при прохождении света в поглощающей среде [4].

На рис. 1 приведены спектральные характеристики поверхностно окрашенных полимерных очковых линз фиолетового, оранжевого, коричневого цветов и аппроксимированные зависимости коэффициентов пропускания от времени поверхностного окрашивания для длин волн 350, 550 и 780 нм.

Спектральные характеристики полимерных очковых линз меняются при поверхностном окрашивании линз красителями разных цветов. Появляются полосы поглощения в поверхностно окрашенном материале очковых линз для каждого цвета в спектральном диапазоне поглощения красителя.

Коэффициент пропускания для линз всех цветов в зависимости от времени окрашивания меняется по экспоненциальной зависимости. Показатель степени экспоненциальной функции растет с увеличением длины волны.

Спектральные характеристики коэффициентов пропускания очковых линз, поверхностно окрашенных при объемных долях красителя в растворе 16,7; 20; 25; 33,3% для образцов окрашенных в разное время приведены на рис. 2.

Исследуя графики рис. 2, а–г, можно сделать следующие выводы. Полосой поглощения является диапазон от 550 нм до 650 нм и короче 450 нм. Чем больше концентрация красителя, тем меньше становится максимум коэффициента пропускания. Время окрашивания полимерного материала влияет на изменение спектральных характеристик, чем больше время окрашивания, тем ниже коэффициент пропускания поверхностно окрашенных материалов.

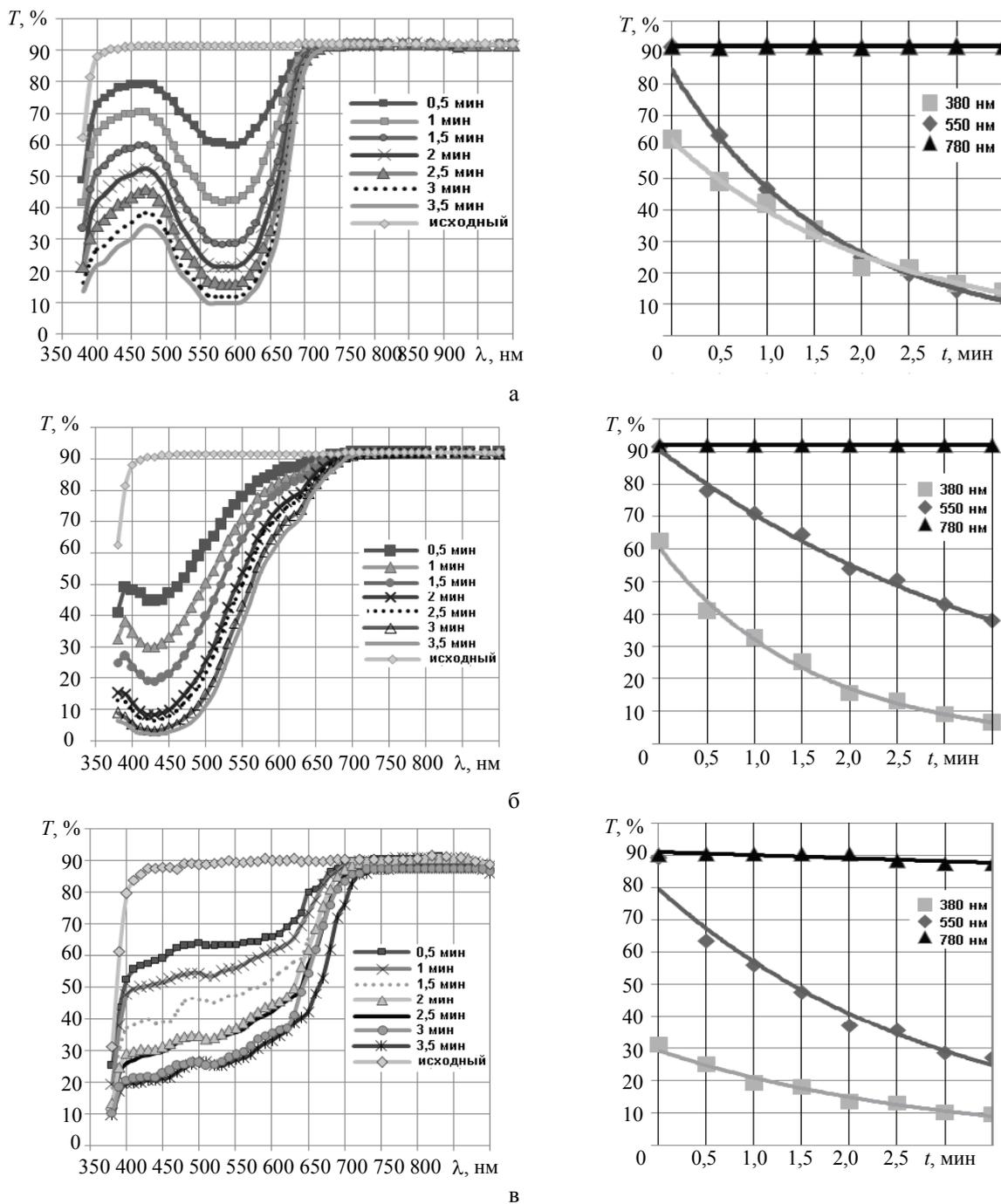


Рис. 1. Спектральная характеристика коэффициента пропускания и зависимость коэффициента пропускания от времени поверхностного окрашивания красителями: а – фиолетового цвета; б – оранжевого цвета; в – коричневого цвета

На рис. 3 приведена зависимость оптической плотности от концентрации красителя в красильном растворе для трех образцов, окрашиваемых 0,5, 1,5 и 2,5 мин. По оси ординат отложена оптическая плотность для длины волны 540 нм.

Функция оптической плотности от концентрации красителя в красильном растворе имеет полиномиальную зависимость. С увеличением концентрации красителя в растворе увеличивается значение оптической плотности поверхностно окрашенного материала очковой линзы. Углы наклона кривых (рис. 3) растут с увеличением времени поверхностного окрашивания, что говорит об увеличении поглощения в поверхностном слое окрашенного материала очковой линзы.

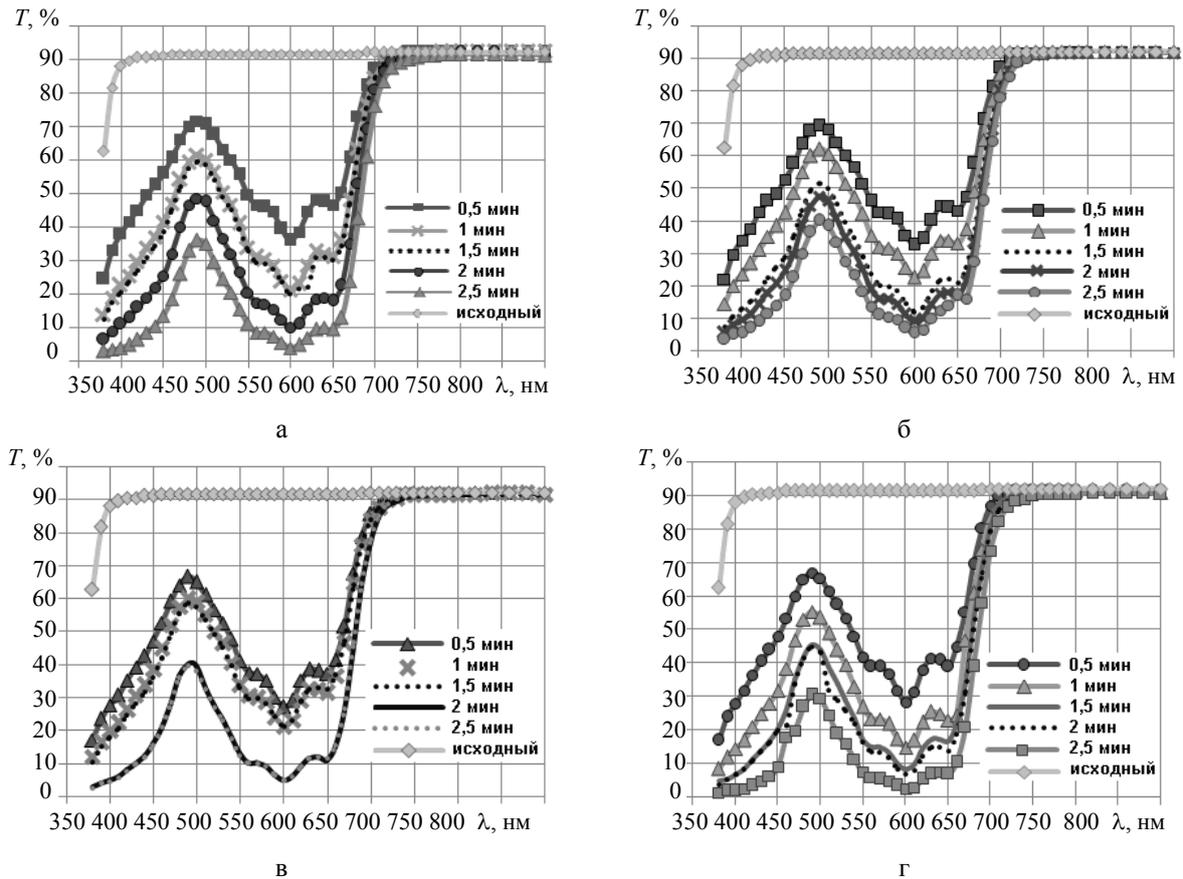


Рис. 2. Спектральная характеристика коэффициента пропускания поверхностно окрашенных полимерных очковых линз при концентрации красителя в растворе: а – 16,7%; б – 20%; в – 25%; г – 33,3%

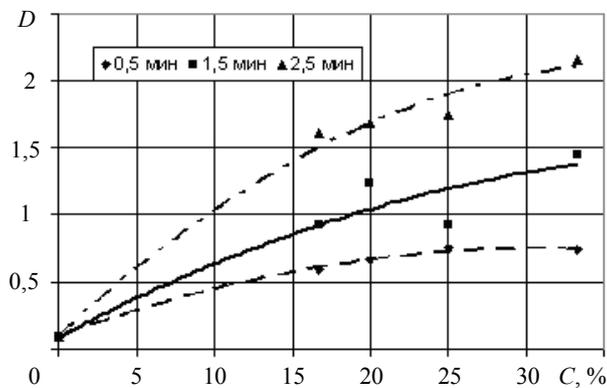


Рис. 3. Зависимость оптической плотности от концентрации красителя в растворе

### Заключение

В ходе проделанной работы была исследована зависимость коэффициента пропускания поверхностно окрашенных очковых линз от времени окрашивания. Эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Исследована зависимость коэффициента пропускания поверхностно окрашенных линз от концентрации красителя при постоянной температуре окрашивания. Рассмотрена зависимость оптической плотности поверхностно окрашенного материала очковой линзы от концентрации красильного раствора, которая является полиномиальной. По этой зависимости можно определить концентрацию раствора красителя, необходимую для получения линзы с заданной оптической плотностью.

### Литература

1. Щербакова О.А. Окрашивание полимерных очковых линз. – М.: Центр поддержки оптического бизнеса, 1998. – 46 с.
2. Путилин Э.С. Оптическая технология: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. –108 с.

3. Рефрактометр ИРФ-454. Техническое описание и инструкция по эксплуатации Г 34.15.051 ТО. – Казань: ПО КОМЗ, 1992. – 35 с.
4. Путилин Э.С. Оптические покрытия: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.

*Кременская Анастасия Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, a\_kremenskaya@mail.ru  
*Пруненко Елена Константиновна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, prunenکو@pochta.ru

УДК 681.787

## **МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СИГНАЛА ПОМЕХИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК**

**С.В. Варжель, В.Е. Стригалеv**

Рассматривается математический метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая гидроакустическая антенна, фазовый интерферометрический датчик, чувствительность фото-детектирования.

### **Введение**

В настоящее время, устранение влияния сигнала помехи на чувствительность приема волоконно-оптической гидроакустической антенны в случае одного фазового интерферометрического датчика (ФИД) можно обеспечить с помощью механической стабилизации положения рабочей точки фотодетектора. Однако, в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД, обеспечить стабилизацию с требуемой точностью и быстродействием вряд ли возможно. Поэтому, задачей данного исследования явилось рассмотрение возможности применения математического метода обработки сигнала, способного устранить влияние сигнала помехи.

### **Принцип действия волоконно-оптической гидроакустической антенны**

Принцип действия гидроакустической антенны на основе ФИД в простейшем случае (в случае одного ФИД) показан на рис. 1 и заключается в следующем.

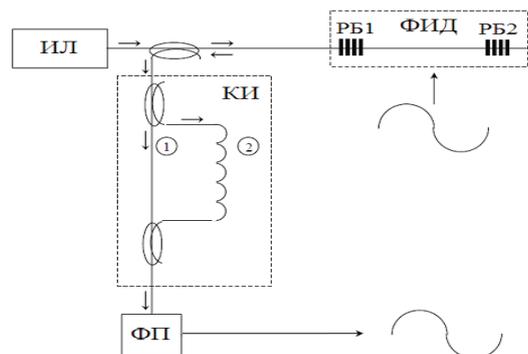


Рис. 1. Принцип действия ФИД

Каждая из решеток Брэгга РБ1 и РБ2 датчика отражает импульс, поступающий на нее от импульсного лазера (ИЛ), на одной и той же длине волны Брэгга. При этом временная задержка между отраженными импульсами равна удвоенному времени распространения света в чувствительном элементе датчика – волокне, заключенном между решетками. Отраженные импульсы поступают в компенсирующий интерферометр (КИ), который, в свою очередь, также раздваивает каждый из них. Задержка, вносимая в распространение импульсов плечом 2 КИ по отношению к плечу 1, обеспечивает перекрытие во времени импульса, отраженного от решетки РБ1, на выходе плеча 2 и импульса, отраженного от решетки РБ2, на выходе плеча 1 и сдвиг их по фазе на  $\varphi_0 = \pi/2$ . Изменения во времени деформации чувствительного элемента датчика в результате внешнего воздействия вызывают изменение разности фаз интерферирующих импульсов. Последнее преобразуется фотоприемником (ФП) в изменение величины тока. Дополни-

ный сдвиг фаз  $\varphi_0 = \pi/2$  между интерферирующими импульсами обеспечивает работу фотодетектора на участке максимальной крутизны, а равенство интенсивностей интерферирующих импульсов позволяет получить максимальную амплитуду сигнала на выходе фотоприемника [1, 2].

**Проблема достижения максимальной чувствительности фото-детектирования**

В случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД, появляется проблема достижения максимальной чувствительности фото-детектирования сигналов для всех датчиков гидроакустической антенны. Источниками этой проблемы являются различные внешние шумовые воздействия (помехи). Поэтому реальная разность фаз  $\varphi(t)$  информационного и опорного световых импульсов, отраженных, соответственно, от второй и первой решеток Брэгга ФИД, содержит, помимо полезного сигнала  $\chi(t) = D \cdot \cos(\omega \cdot t)$ , помеховую составляющую  $\psi(t)$

$$\varphi(t) = D \cdot \cos(\omega \cdot t) + \psi(t) . \tag{1}$$

При этом величина тока на выходе ФП определяется выражением

$$I(t) = A + B \cdot \cos[D \cdot \cos(\omega \cdot t) + \psi(t)] , \tag{2}$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные, пропорциональные интенсивности света на входе ФП.

Так, например, если полезный сигнал имеет вид, представленный на рис. 2 (сигнал с частотой 500 Гц и амплитудой 1 В), а помеховая составляющая задана в соответствии с рис. 3 (сумма помех с частотами 18, 50 и 75 Гц и амплитудами 1,1; 3,5; 0,5 В соответственно), то ток на выходе ФП будет иметь вид, представленный на рис. 4.

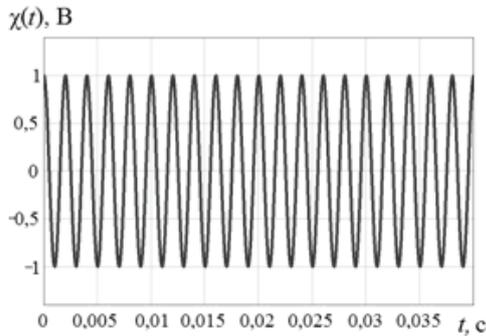


Рис. 2. Полезный сигнал

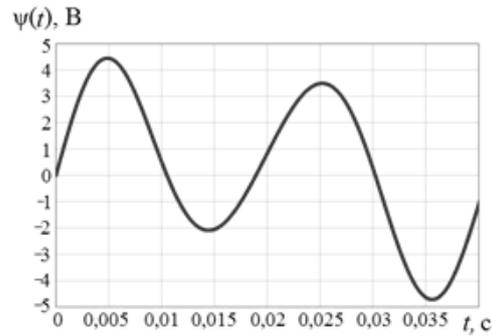


Рис. 3. Помеховая составляющая

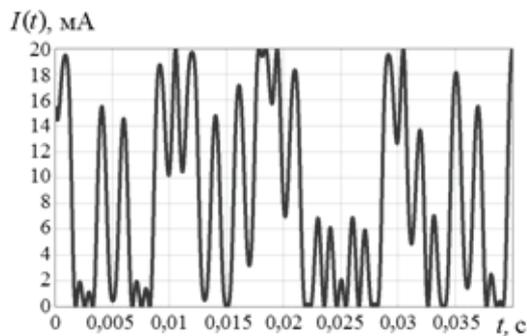


Рис. 4. Ток на выходе ФП

Так как амплитуда сигнала на ФП меняется с течением времени, то для правильной регистрации полезного сигнала необходима дополнительная обработка. В случае одного ФИД можно обеспечить стабилизацию положения рабочей точки фотодетектора путем оперативной подстройки разбаланса плеч КИ. Однако, как уже отмечалось во введении, в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД обеспечить стабилизацию с требуемой точностью и быстродействием вряд ли возможно. Причиной тому не только низкое быстродействие известных элементов регулировки, которые являются пьезоэлектрическими, но и низкая точность, с которой могут быть определены внешние шумовые воздействия на каждый из датчиков. Следовательно, можно отказаться от идеи механической стабилизации рабочей точки фотодетектора и исследовать возможность решения проблемы с помощью математического метода обработки сигнала.

Математический метод обработки сигнала

Существо метода заключается в следующем. Световой сигнал в одном из плеч КИ (рис. 5) модулируется по фазе радиосигналом высокого уровня, поступающим от генератора модулирующего сигнала (ГМС), с частотой  $\omega_0$ , лежащей за пределами диапазона рабочих частот датчика,  $C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$ .

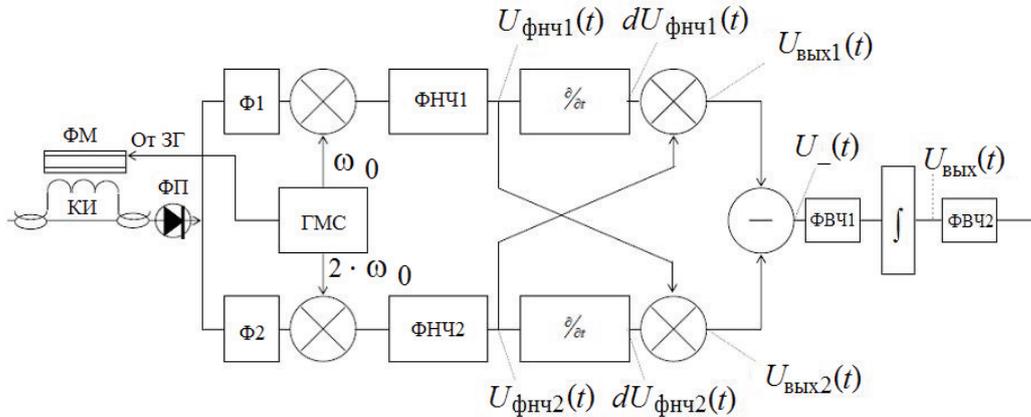


Рис. 5. Схема обработки сигнала ФП

В результате ток (2) на выходе ФП преобразуется к виду

$$I(t) = A + B \cdot \cos[C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \varphi(t)], \tag{3}$$

при котором изменение разности фаз интерферирующих импульсов зависит не только от полезного сигнала и помеховой составляющей, но и от амплитуды и частоты сигнала фазового модулятора (ФМ).

После разложения (3) в ряд по гармоникам частоты модулятора, коэффициентами которого являются функции Бесселя [3], получаем:

$$I(t) = A + B \cdot \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k}(C) \cdot \cos(2 \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t) \right] \cdot \cos[\varphi(t)] - \left[ 2 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k+1}(C) \cdot \cos[(2 \cdot k + 1) \cdot \omega_0 \cdot t] \right] \cdot \sin[\varphi(t)] \right\}. \tag{4}$$

Если умножить сигнал (4) на первую и вторую гармоники модулирующего сигнала, а результаты умножения пропустить через фильтры нижних частот (ФНЧ), то на их выходах получим два квадратурных сигнала, изменение фаз которых уже не зависит от сигнала ФМ

$$\begin{aligned} U_{\text{ФНЧ1}}(t) &= -B \cdot G \cdot J_1(C) \cdot \sin[\varphi(t)] \\ U_{\text{ФНЧ2}}(t) &= -B \cdot H \cdot J_2(C) \cdot \cos[\varphi(t)], \end{aligned} \tag{5}$$

где  $G$  и  $H$  – амплитуды первой и второй гармоник модулирующего сигнала.

Производные этих сигналов по времени имеют вид

$$\begin{aligned} dU_{\text{ФНЧ1}}(t) &= -B \cdot G \cdot J_1(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \cos[\varphi(t)] \\ dU_{\text{ФНЧ2}}(t) &= B \cdot H \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \sin[\varphi(t)]. \end{aligned} \tag{6}$$

Перекрестное перемножение сигналов (5) и их производных (6) дает

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ1}}(t) &= B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \cos^2[\varphi(t)] \\ U_{\text{ВЫХ2}}(t) &= -B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \sin^2[\varphi(t)]. \end{aligned} \tag{7}$$

При этом перекрестное перемножение позволяет достичь полной идентичности амплитуд сигналов, исключив влияние не идентичности каналов обработки. Вычитая из первого сигнала (7) второй, получим

$$U_{-}(t) = B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}. \tag{8}$$

Затем данный сигнал (8) пропустим через фильтр верхних частот (ФВЧ1), который служит для устранения постоянной составляющей перед интегрированием. После интегрирования получаем

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \varphi(t). \quad (9)$$

Как следует из полученного выражения (9) с учетом (1), сигнал на выходе пропорционален сумме полезного сигнала и помеховой составляющей и не зависит от положения рабочей точки фотодетектора. Таким образом, в спектре выходного сигнала помеха присутствует в виде слагаемого и может быть отфильтрована, так как отличается от него по спектру.

На рис. 6 можно видеть выходной сигнал до фильтра (ФВЧ2), в котором, помимо полезного сигнала на частоте 500 Гц, присутствует и помеховая составляющая, показанная на рис. 3, с амплитудой в несколько раз большей, чем амплитуда полезного сигнала. После фильтра (рис. 7) видно, что помеха была отфильтрована.

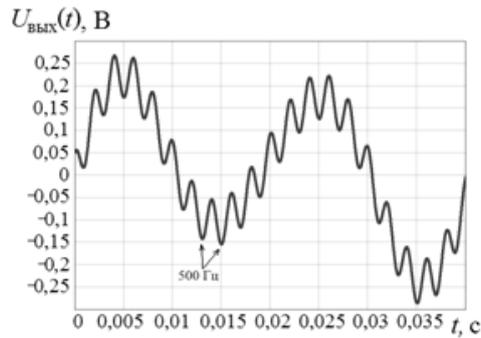


Рис. 6. Выходной сигнал до фильтра

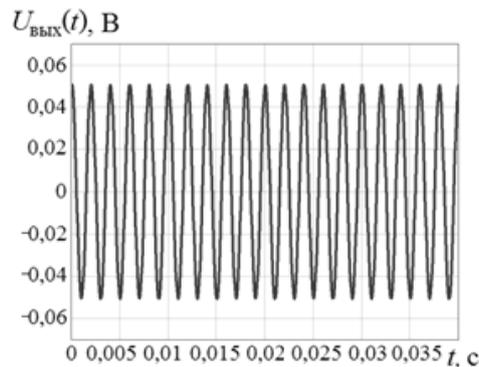


Рис. 7. Выходной сигнал после фильтра

### Заключение

Предложенный метод выделения сигнала от фазового интерферометрического датчика давления обеспечивает решение проблемы влияния сигнала помехи на чувствительность приема, даже в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества (сотни) ФИД. В ходе исследования данный метод показал свою эффективность, и планируется его использование в схеме обработки сигнала разрабатываемой гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток.

### Литература

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера. – 2008. – 520 с.
2. Zhang W., Liu Y., Li Fiber F. Bragg grating hydrophone with high sensitivity // Chinese Optics Letters. – 2008. – V. 6. – Is. 9. – P. 631–633.
3. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. London, Artech House, 1992. – 313 p.

**Варжель Сергей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com  
**Стригалева Владимир Евгеньевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru

УДК 661.847.511:621.923.75

## ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА ЦИНКА

Е.Ю. Вилкова, О.В. Тимофеев

Исследован процесс механического полирования поликристаллического сульфида цинка с использованием полировальных смол на основе канифоли. Рекомендован оптимальный диапазон давлений для проведения механического полирования. Показано, что на параметры процесса обработки и качество поверхности сульфида цинка будет оказывать существенное влияние не только состав полировальных смол, но и их способ приготовления.

**Ключевые слова:** сульфид цинка, механическое полирование, полировочные смолы, классы чистоты, дефекты поверхности.

### Введение

Поликристаллический сульфид цинка применяют в ИК оптике для изготовления выходных окон, фокусирующих линз, делительных пластин, а также призм и полупрозрачных зеркал. Необходимым условием применения таких оптических элементов является минимизация размеров и количества дефектов на их поверхности, образующихся в процессе абразивной обработки [1].

Производство таких элементов – это сложная и многоплановая задача. Одним из основных этапов, наряду с выращиванием материала, является изготовление готовых оптических элементов. Отсутствие публикаций по этой тематике в нашей стране и за рубежом не позволяет создать технологию высококачественной обработки оптических элементов на основе сульфида цинка без проведения целенаправленных исследований.

Целью данной работы явилось исследование влияния параметров процесса механического полирования на качество поверхности сульфида цинка. Для достижения цели решались следующие задачи:

- исследование влияния параметров механического полирования на размеры и концентрацию дефектов полированной поверхности сульфида цинка;
- исследование влияния состава и свойств полировальных смол на образование поверхностных дефектов.

### Методика эксперимента

Обработке подвергался высокочистый поликристаллический сульфид цинка, который был получен методом химического осаждения из газовой фазы. Образцы сульфида цинка представляли собой диски диаметром 20 мм и толщиной 5 мм, предварительная подготовка осуществлялась по методике, описанной в работе [2]. В качестве материала полировальника использовали смолы на основе модифицированной живичной канифоли. В качестве смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовалась дистиллированная вода. В процессе обработки качество поверхностей контролировалось при помощи методики «компьютерного зрения». Как на промежуточных, так и на конечных стадиях обрабатываемые поверхности фотографировались при помощи микроскопа AxioPlan 2. Полученные фотографии обрабатывали с использованием разработанного для этой цели специального программного обеспечения [3]. В результате для каждой поверхности были получены функции распределения дефектов по размерам, приведенные к единице площади поверхности. Полученные таким образом количественные характеристики для точек (их количество и размеры) и царапин (их длина и ширина) были использованы для определения класса чистоты поверхности согласно [4].

### Результаты и обсуждение

Проведены исследования процесса механического полирования сульфида цинка. В ходе полирования поверхности фотографировались через определенные промежутки времени (1, 2 и 5 мин.). Полученные фотографии обрабатывались при помощи методики «компьютерного зрения». Получены зависимости количества точек (рис. 1, а) и суммарной длины царапин (рис. 1, б) на поверхности от времени полирования. Из рисунка видно, что поверхность в начальный момент времени имеет максимальное количество точек, однако уже через 3–5 мин. обработки размеры и количество дефектов снижается на порядок.

Изучены зависимости количества точек (рис. 2, а) и длины царапин (рис. 2, б) от их размеров при различном прижимном давлении в процессе механического полирования сульфида цинка. Результаты показали, что качество и геометрия поверхности существенно зависят от давления, оказываемого на поверхность в процессе полирования.

Сопоставление экспериментальных данных позволило выделить оптимальный диапазон давлений, в котором получены наилучшие результаты по совокупности трех параметров (чистота, геометрия поверхности и скорость съема). В результате был выделен диапазон давлений, при которых получены поверхности наилучшего качества с минимальными отклонениями по геометрии, а скорость съема при дан-

ных условиях имела значение, близкое к максимальному. Данный диапазон для используемых нами условий эксперимента находился в пределах от 17,1 до 27,5 кПа.

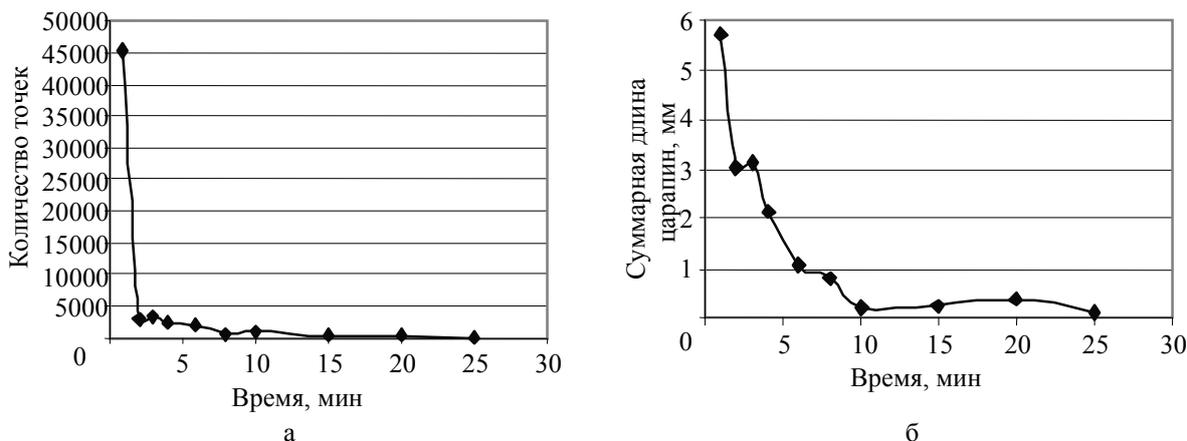


Рис. 1. Изменение количества дефектов на поверхности сульфида цинка в процессе полирования

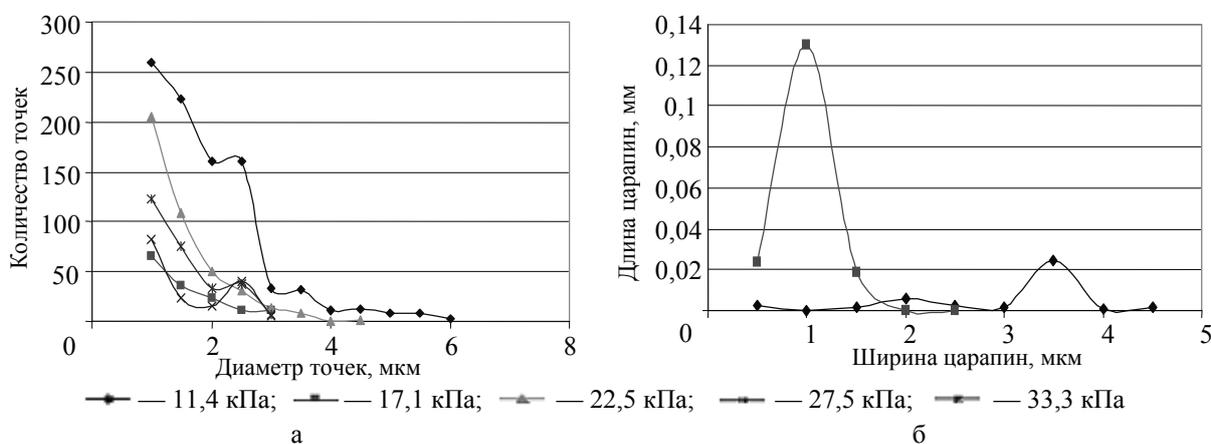


Рис. 2. Зависимости количества точек и длины царапин от их размеров при различном прижимном давлении в процессе механического полирования

Для исследований влияния состава и свойств полировальных смол на образование поверхностных дефектов сульфида цинка была изготовлена серия образцов полировальных смол на основе модифицированной живичной канифоли. Образцы смол имели одинаковую температуру размягчения, но различный состав. Температура размягчения смол, определенная методом кольца и шара, составляла  $64 \pm 1^\circ\text{C}$ . Параметры используемых смол и экспериментальные значения скорости съема приведены в табл. 1. В результате экспериментов было выявлено, что скорости съема существенно различаются, несмотря на постоянство температуры размягчения. В образцах 4«Б11» партий №1, №2 в качестве добавки использовали поверхностно активные вещества (ПАВ), увеличение концентрации ПАВ на 0,5% приводит к существенному изменению скорости съема. Добавление стеарина в состав смолы (образец ПС-С2) не приводит к такому резкому увеличению скорости съема, а при дальнейшем увеличении его концентрации (образец ПС-С1), происходит снижение скорости съема.

Из табл. 1 видно, что скорость съема на образцах полировальных смол, имеющих различную твердость (измеренная методом пенетрации), при постоянной температуре размягчения, существенно различается. Таким образом, даже незначительные изменения данных характеристик при помощи изменения состава приводят к существенному изменению параметров обработки сульфида цинка, и, как следствие, к изменению качества поверхности.

Оценка качества поверхности (рис. 3) показала, что использование добавки ПАВ в образцах 4«Б11» партий №1, №2 и увеличение его концентрации на 0,5% приводит к увеличению количества и размеров точек (рис. 3, а), а также длины и ширины царапин (рис. 3, б) на поверхности образцов, что, как следствие, ухудшает оптическое качество поверхности. Необходимо отметить, что добавление стеарина в состав смолы (образец ПС-С2) и увеличение его концентрации (образец ПС-С1), напротив, приводит к дальнейшему улучшению качества поверхности, по сравнению с образцами 4«Б11» партий №1, №2. Об

этом свидетельствует уменьшение размеров и количества точек. При этом размеры царапин, оставленных на поверхности образцов, находятся за пределами разрешения используемого нами оптического микроскопа и разработанной методики [3]. Полученные результаты показали, что незначительные изменения состава при сохранении температуры размягчения смолы приводят к существенному изменению, как скорости съема, так и чистоты поверхности. Оценка качества показала, что наилучшее качество для сульфида цинка получено на полировальной смоле ПС-С1 с температурой размягчения 63°C и чистотой поверхности, соответствующей 3 классу чистоты по ГОСТ 11141-84.

№ образца	Температура размягчения по КИШ, °С	Твердость, °С (*)	Логарифм вязкости при 25°C	Скорость съема, мкм/мин
4«Б11» парт. №1	64	27,8	8,7	0,776
4«Б11» парт. №2	64	27,6	8,6	0,472
ПС-С1	63	29,6	8,8	0,525
ПС-С2	64,5	29,8	8,9	0,651

\* – твердость измерена методом пенетрации.

Таблица 1. Параметры полировальных смол и экспериментальные величины скорости съема сульфида цинка в процессе полирования

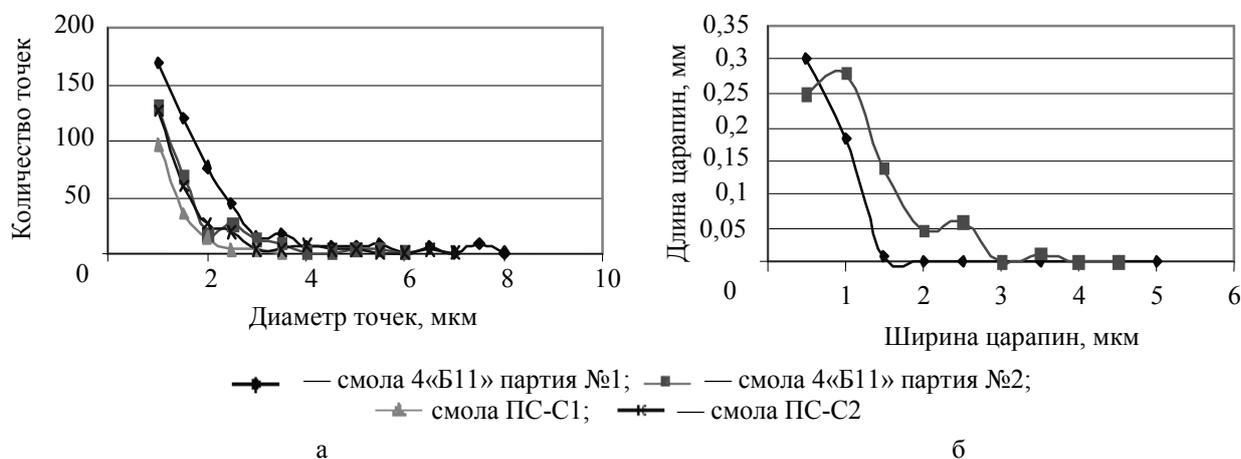


Рис. 3. Зависимости количества точек и длины царапин от их размеров при использовании полировальных смол различного состава

Проведены исследования влияния структуры канифольных смол на качество поверхности и величину съема материала в процессе механической обработки. Для экспериментов использовали образцы смолы, которые имели одинаковый состав и температуру размягчения равную 64°C. Различие состояло в способе заливки полировальников, при этом нагрев смолы проводили в одинаковых условиях, а температуру охлаждения изменяли в интервале от 18°C до минус 12°C. В одном эксперименте проводился дополнительный нагрев до перехода смолы в жидкое состояние. На основании полученных результатов (табл. 2) видно, что при уменьшении температуры охлаждения полировальника увеличивается скорость съема материала. Это можно объяснить изменением структуры материала полировальника, которая влияет на теплофизические свойства смолы и, как следствие, на скорость съема обрабатываемого материала.

№ образца	Температура охлаждения, °С	Скорость съема, мкм/мин
4«Б11» №1	+5	0,315
4«Б11» № 2	-12	0,318
4«Б11» № 3	+18	0,282
4«Б11» № 4	+18 и дополнит. нагрев	0,307

Таблица 2. Значения скоростей съема сульфида цинка при механической обработке на различных полировальных смолах

Взаимосвязь размеров и количества дефектов на поверхности образцов представлена на рис. 4, а, б. Изменение температуры охлаждения смолы приводит к изменению качества обрабатываемой поверхности. Причем наилучшие результаты по качеству поверхности получены при способе заливки, когда поли-

ровальник охлаждали в холодильнике при температуре 5°C. Данная поверхность содержала минимальное количество точек, а размеры царапин были ниже пределов разрешения разработанной нами методики компьютерного зрения [3].

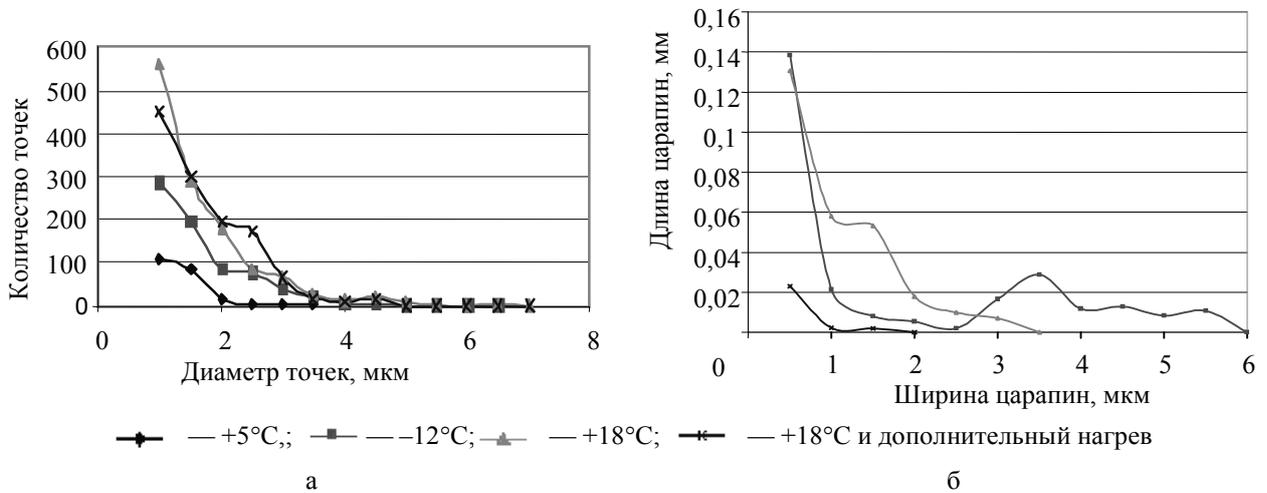


Рис. 4. Зависимости количества точек и длины царапин от их размеров при различных температурах охлаждения полировальника

Проведены исследования по оценке качества поверхности образцов сульфида цинка, обработанных различными способами. Класс чистоты поверхностей определен по методике, описанной в [4]. Их качество соответствовало 7, 5 и 3 классам чистоты. Полученные поверхности были сфотографированы и фотографии обработаны при помощи методики «компьютерного зрения». На рис. 5, а, б, представлены зависимости количества точек и длины царапин от их размеров на поверхности образцов сульфида цинка при различных классах чистоты. Сопоставление результатов компьютерной и визуальной оценки показало, что полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии.

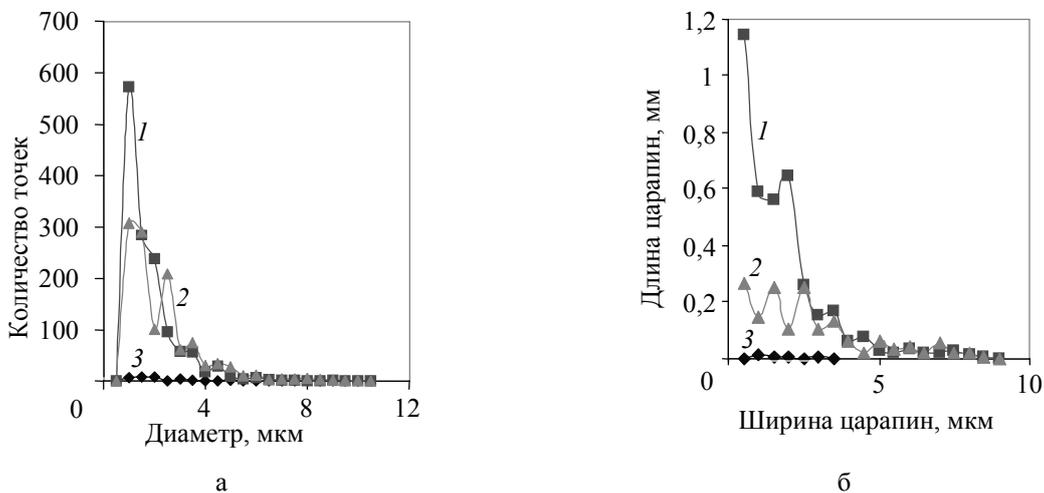


Рис. 5. Зависимости количества точек и длины царапин от их размеров на поверхности образцов сульфида цинка при различных классах чистоты поверхности: 1 – поверхность 7 класса чистоты; 2 – поверхность 5 класса чистоты; 3 – поверхность 3 класса чистоты

Для поверхности, соответствующей 3 классу чистоты, проведена оценка величины шероховатости на атомно-силовом микроскопе НТ-206. Фотографии поверхностей приведены на рис. 6. Величина среднеарифметической шероховатости поверхности  $Ra$  составила 2,6 нм, а среднеквадратичной  $Rq$  – 3,8 нм. Дальнейшее улучшение качества обрабатываемой поверхности возможно при использовании магнито-реологического полирования.

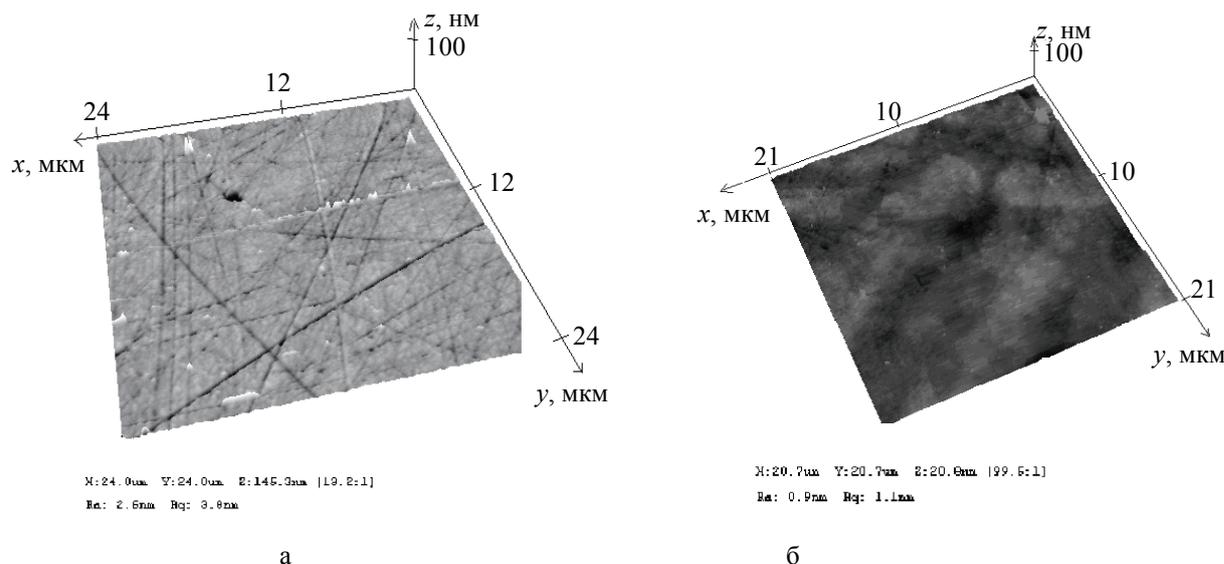


Рис. 6. Фотографии поверхностей, выполненные на атомно-силовом микроскопе:  
а – после химико-механического полирования; б – после магнитореологического полирования

### Заключение

На основании полученных результатов определены режимы механической обработки сульфида цинка. Исследованы зависимости скорости съема от удельного давления в процессе механического полирования. Оптимальный диапазон давлений для проведения процесса полирования сульфида цинка находится в пределах от 17,1 до 27,5 кПа. Показано, что на качество оптических поверхностей на основе сульфида цинка существенное влияние оказывают как состав полировальной смолы, так и способ ее приготовления.

Применение рекомендованных условий полирования позволило изготовить опытную партию оптических элементов на основе сульфида цинка с качеством поверхности, отвечающим 3 классу чистоты, согласно ГОСТ 11141-84, с отклонением по геометрии не более одного интерференционного кольца. Для сульфида цинка величина среднеарифметической шероховатости поверхности  $Ra$  составила 2,6 нм, а среднеквадратичной  $Rq$  – 3,8 нм.

### Литература

1. Формообразование оптических поверхностей // Труды международной академии «Контенант». – М.: Контенант, 2005. – Т. 1. – 284 с.
2. Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Тимофеев О.В., Радбиль Б.А., Кушнир С.Р. Исследование процесса полирования поликристаллического селенида цинка с использованием полировальных смол на основе канифоли // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 9. – С. 83–89.
3. Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Колесников А.Н., Тимофеев О.В. Исследование полированных поверхностей халькогенидов цинка путем компьютерного распознавания дефектов на микрофотографиях // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 87–94.
4. ГОСТ 11141-84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. Введ. 01.01.85. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 15 с.

**Вилкова Елена Юрьевна**

– Институт химии высококачественных веществ РАН, г. Нижний Новгород, младший научный сотрудник, timofeev@ihps.nnov.ru

**Тимофеев Олег Владимирович**

– Институт химии высококачественных веществ РАН, г. Нижний Новгород, кандидат химических наук, доцент, timofeev@ihps.nnov.ru

УДК 531.7/004.932

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН ФРАУНГОФЕРА ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

А.Н. Иванов, В.М. Михайлов

Разработан новый метод цифровой обработки дифракционных картин, который позволит увеличить точность методов дифракционного контроля. Предложено регистрировать координаты точек перегиба главного максимума дифракционной картины, обладающих высокой чувствительностью к изменению размера контролируемого объекта.

**Ключевые слова:** дифракция Фраунгофера, обработка изображения.

### Введение

Определение размера объекта по дифракционной картине Фраунгофера заключается в том, что по функции пространственного распределения интенсивности  $I(x)$  определяются координаты ее характерных точек – минимумов, максимумов, точек перегиба. Затем определяется коэффициент, связывающий эти координаты с размером объекта. Обычно в качестве характерных точек используют минимумы дифракционной картины, но такой метод сильно ограничен тем, что точно определить координаты этих точек очень трудно – чувствительность сигнала  $dI(x)/dx$  в их окрестности близка к нулю [1]. Именно эта ошибка в определении координат является доминирующей в методах дифракционного контроля и сильно ограничивает их точность. Особенно сильно она сказывается при малых (менее 50 мкм) размерах объекта, когда происходят падение освещенности в дифракционной картине и «размазывание» ее минимумов.

Устранить указанный недостаток можно двумя способами. Первый из них основан на регистрации точек инверсии фазы частотного спектра объекта, координаты которых совпадают с координатами минимумов дифракционной картины. В работе [1] для этого предлагается метод измерения, основанный на последовательном преобразовании Фурье функции амплитудного пропускания объекта и преобразовании Френеля его частотного спектра. Это позволяет уменьшить погрешность измерения на порядок (с 1% до 0,1%). Недостатком данного метода является сложность схем его практической реализации.

Другой способ основан на регистрации характерных точек изображения дифракционной картины после ее преобразования по какому-либо закону [2, 3]. Особый интерес представляет работа [3], в которой предлагается преобразовать главный максимум исходной дифракционной картины в соответствии с выражением  $I(x)_n = 2I(x)_{n-1}^2 - 1$ , где  $I(x)$  – распределение интенсивности в дифракционной картине,  $n$  – количество преобразований дифракционной картины,  $x$  – линейная координата в плоскости регистрации. Определив координаты нулей функции  $I(x)_n$ , можно вычислить размер контролируемого объекта. Эти нули определяются с высокой точностью, кроме того, использование только центрального максимума позволяет расширить диапазон контролируемых размеров. К сожалению, практическое применение данного метода затруднено тем, что он весьма чувствителен к шуму. Наличие мультипликативного шума приводит к сильному смещению нулей преобразованной функции (ошибка измерения составила 20% при наличии фона в 3% от величины сигнала).

### Анализ главного максимума дифракционной картины от объекта в форме щели

Для решения указанной проблемы предлагается использовать другие характерные точки дифракционной картины – точки перегиба. Исследование дифракционной картины от щели, которая описывается функцией  $I(U) = \sin(U)^2 / U^2$ , где  $U = ka x / 2f$ ,  $a$  – ширина щели,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $f$  – фокусное расстояние объектива, показало, что ее главный максимум имеет две такие точки. Чтобы определить их положение, необходимо взять вторую производную от исходной функции  $I(U)$ :

$$I''(U) = d^2 I(U) / dU^2. \quad (1)$$

Приравняв выражение (1) к нулю, найдем значения  $U$ , соответствующие положениям точек перегиба в области главного максимума:  $U_2 = 1,303$  и  $U_1 = -1,303$  (рис. 1). Чувствительность функции  $I(U)$  к изменению аргумента  $U$  в этих точках имеет максимальное значение  $dI(U)/dU \approx 0,54$ .

Если зарегистрировать главный максимум дифракционной картины и определить через его вторую производную  $d^2 I(x)/dx^2$  разность линейных координат точек перегиба  $\Delta x = x_2 - x_1$ , то она будет связана с разностью  $\Delta U = U_2 - U_1 = 2,606$  простой зависимостью  $\Delta U = ka \Delta x / 2f$ , воспользовавшись которой, можно определить размер объекта  $a$ :

$$a = 2 \Delta U f / k \Delta x = 5,212 f / k \Delta x. \quad (2)$$

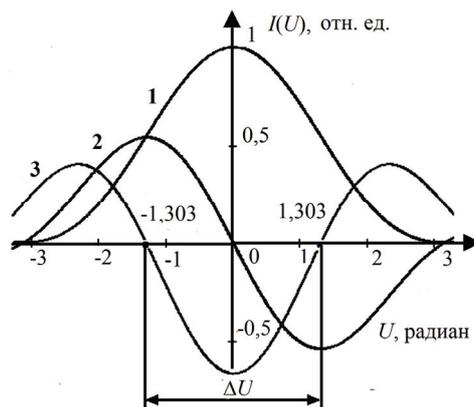


Рис.1. Результат дифференцирования численной модели главного максимума дифракционной картины: 1 – исходное распределение интенсивности, 2 – первая производная, 3 – вторая производная

### Экспериментальное исследование

Для проверки предложенного алгоритма была собрана экспериментальная установка (рис. 2), состоящая из лазера ЛГ-105, спектральной щели с шагом раскрытия 1 мкм, объектива, выполняющего преобразование Фурье, с фокусным расстоянием  $f = 25$  мм и ПЗС-камеры, имеющей диагональ  $\frac{1}{2}$ " и разрешение  $792 \times 576$  пикселей.

В ходе эксперимента регистрировались дифракционные картины от щели, ширина которой изменялась в диапазоне от 30 до 55 мкм с шагом 5 мкм. Зарегистрированные максимумы дифракционных картин подвергались предварительной обработке с целью подавления мультипликативного и высокочастотного аддитивного шумов в соответствии с методами, описанными в работе [4].

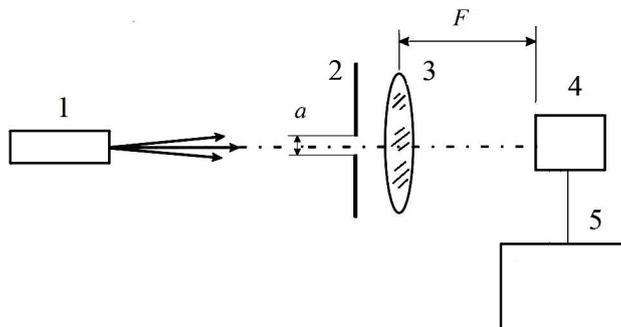


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения ширины щели дифракционным методом: 1 – лазер, 2 – щелевая диафрагма, 3 – Фурье-объектив, 4 – ПЗС-камера, 5 – компьютер с платой видеозахвата

Затем изображения численно дифференцировались два раза, что позволяло надежно определить координаты их точек перегиба  $x$ . Для численного дифференцирования использовалась интерполяционная формула Ньютона [5]

$$I'_i \approx \left( (I_{i+1} - I_i) - (I_{i+1} - I_i)^2 / 2 + (I_{i+1} - I_i)^3 / 3 \right) / h,$$

где  $i$  – номер элемента ПЗС-приемника,  $I_i$  – интенсивность сигнала в  $i$ -м элементе,  $h$  – шаг изменения значений ( $h = 1$  пиксель). Результаты численного дифференцирования дифракционной картины приведены на рис. 3, а результаты измерений ширины щели – в таблице. Чтобы показать преимущества предложенного метода, ширина щели была также определена через разность координат минимумов дифракционной картины.

Относительная погрешность измерения предложенным методом оказалась в пределах 0,5–5%. С уменьшением размера объекта погрешность увеличивалась, что обусловлено уменьшением высоты главного максимума и, как следствие, уменьшением отношения сигнал–шум. Искажение формы сигнала приводило к трудности при определении координат точек перегиба. Также источниками погрешности служили ошибка установки щели на нуль, ошибка установки отсчета шкалы щели, разворот дифракционной картины в плоскости приемника.

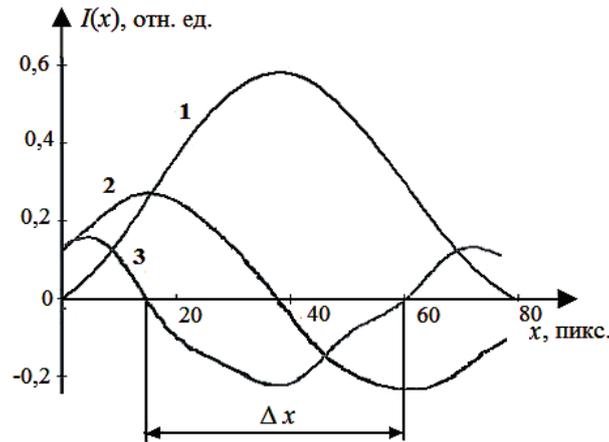


Рис. 3. Результат дифференцирования дифракционной картины от щели шириной 50 мкм: 1 – распределение интенсивности в главном максимуме; 2 – первая производная; 3 – вторая производная

Задаваемое значение ширины щели, мкм	Ширина щели, определенная из разности координат точек перегиба, мкм	Ширина щели, определенная из разности координат минимумов, мкм
55	55,7	57,8
50	51,4	53,7
45	46,1	46,7
40	41,8	36,6
35	38,7	28,2
30	35,2	20,5

Таблица. Результаты измерения ширины щели

### Заключение

Предложен метод цифровой обработки дифракционных картин. Его преимуществом по сравнению с существующими методами является использование точек перегиба главного максимума дифракционной картины, обладающих высокой чувствительностью к изменению размера объекта. Несложные преобразования исходного измерительного сигнала позволяют надежно и с хорошей точностью определить их координаты. Кроме того, центральный максимум менее подвержен влиянию высокочастотного шума, возникающего при рассеянии излучения на микродефектах оптических элементов измерительной схемы. Данный метод удобен для контроля объектов малого размера, когда на площадку ПЗС- приемника укладывается только главный максимум дифракционной картины.

### Литература

1. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 2. – С. 76–81.
2. Фефилов Г.Д. Оценка погрешности определения моментов экстремума в дифракционной картине Эйри при воздействии аддитивной помехи // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – 2006. – № 31. – С. 55–58.
3. Власов Н.Г., Кулиш С.М. Нелинейная цифровая обработка дифракционных картин // Мир техники кино. – 2008. – № 8. – С. 41–42.
4. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Земцев А.Ю., Степанов С.А. Разработка методов и программных средств подавления шумов в интерферограммах на этапе их предварительной обработки // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28. – С. 140–144.
5. Исаков В.Н. Элементы численных методов. – М.: АСАДЕМА, 2003. – 192 с.

**Иванов Александр Николаевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, i\_off@mail.ru

**Михайлов Виталий Михайлович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mynameisvitalik@gmail.ru

УДК 536:621.37

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЛЕНОК ХРОМА  
И ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО  
ОКИСЛЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А.Н. Агафонов

Рассмотрены вопросы влияния параметров микроstructures пленок хрома на результаты локального термохимического окисления под действием лазерного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований микроstructures и элементного состава пленок толщиной от 50 до 140 нм. Приведены результаты исследования лазерной записи по пленкам хрома с различным размером кристаллита. Проведено сравнение результатов численного моделирования и натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** термохимическое окисление, пленки хрома, кристаллит.

**Введение**

В настоящее время существует возрастающая потребность в изготовлении микро- и наноструктур различного функционального назначения. Одним из базовых технологических процессов их изготовления является фотолитография [1].

Существует ряд приложений, специфика которых не позволяет считать традиционные технологии получения фотосаблонов экономически целесообразными. Такая ситуация складывается в случае, когда требуется изготовить широкую номенклатуру элементов при штучном или мелкосерийном производстве, например, при изготовлении уникальных дифракционных оптических элементов (ДОО). Известен ряд методов формирования топологического изображения непосредственно в слое рабочего материала, без использования фоторезистов [2]. Они основаны на локальной обработке материала лазерным излучением, что позволяет снизить себестоимость изготовления микроstructures произвольной конфигурации. Одним из наиболее перспективных методов прямой записи является локальное термохимическое окисление пленок хрома под действием лазерного излучения [3]. Этот метод формирования микроstructures основан на локальном окислении тонких пленок хрома под действием лазерного излучения. Последующее жидкостное травление образца приводит к формированию микрорельефа за счет существенного различия скоростей травления хрома и его окисных форм.

Известные теоретические подходы [4, 5] к анализу кинетики термохимического окисления, стимулированного лазерным излучением, хорошо описывают процессы в относительно толстых (более 150 нм) пленках и базируются на следующих общих основных предположениях:

1. материал пленки хрома и оксидной пленки считается однородным;
2. основным фактором, лимитирующим окисление, является диффузия атмосферного кислорода в пленку хрома.

Использование перспективных, с точки зрения повышения разрешающей способности, тонких пленок хрома (менее 50 нм), вызывает необходимость более подробного исследования процессов окисления, в частности, учета влияния структуры пленки хрома и роли растворенного в ней кислорода.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния параметров микроstructures пленок хрома и растворенного в них кислорода на разрешающую способность технологии термохимического окисления.

**Экспериментальное исследование микроstructures пленок хрома**

Для исследования микроstructures пленок хрома были использованы методы рентгеновской дифрактометрии [6], измерения проводились на дифрактометре Bruker D8 методами скользящего падающего луча и на отражение (рис. 1), а также методы просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР), на электронном микроскопе JEM-2010 (рис. 2, 3).

На рис. 3 выделены области с регулярной кристаллической решеткой (кристаллиты). Видна дифракция электронов на кристаллической решетке.

Полученные результаты позволили определить характерный размер кристаллита в пленках, используемых для записи, с точностью до единиц нанометров.

Локальный анализ элементного состава образцов проводили с использованием энергодисперсионного EDAX спектрометра «Phoenix» с Si(Li) детектором и разрешением по энергии не более

130 эВ. Результаты исследования пленки толщиной 140 нм с характерным размером кристаллитов  $\approx 15$  нм до лазерной обработки приведены на рис. 4.

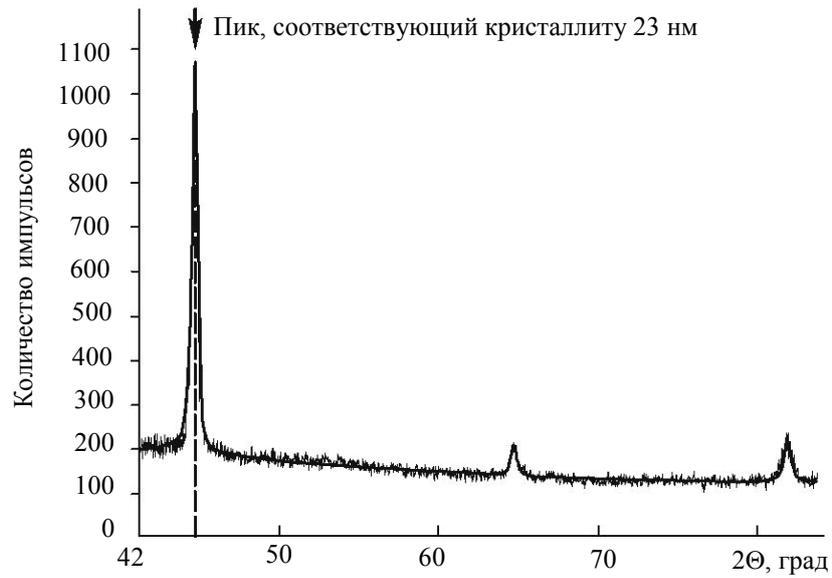


Рис. 1. Дифрактограмма образца с использованием техники скользящего падающего луча, величина угла скольжения –  $5,1^\circ$ . Дифракционные максимумы от подложки ( $2\Theta = 40-90^\circ$ ) отсутствуют

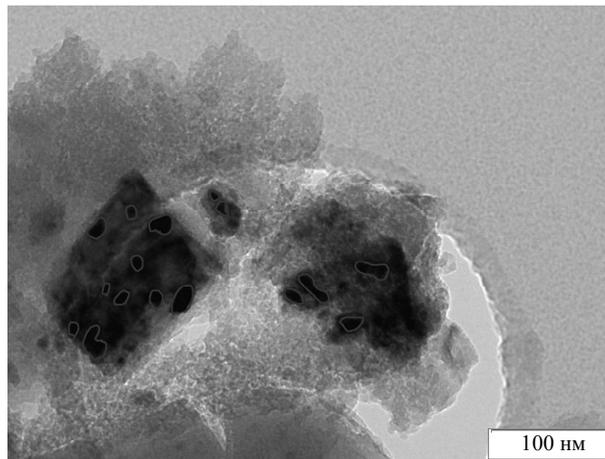


Рис. 2. Результаты ПЭМВР. Образец пленки с характерным размером кристаллитов около 15 нм. Выделены отдельные кристаллиты (обведенные темные области)

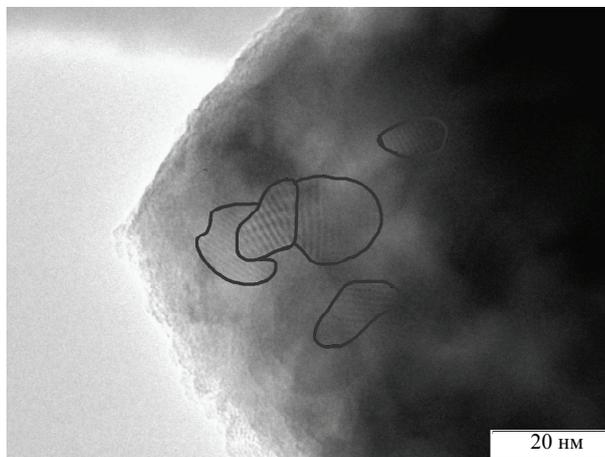


Рис. 3. Результаты ПЭМВР. Образец пленки с характерным размером кристаллитов около 15 нм

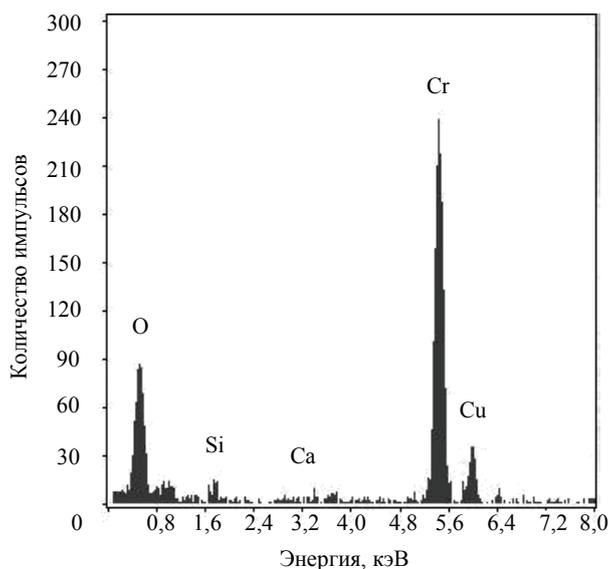


Рис. 4. Результаты анализа элементного состава (энерго-дисперсионный EDAX спектрометр «Phoenix»)

Для различных образцов количество кислорода составило величину от 6% до 20%. Однако данный эксперимент не позволил получить сведения о том, какая доля кислорода находится в связанном состоянии (в оксидах хрома).

#### Экспериментальное исследование результатов лазерной записи

Тестовые структуры были записаны на пленках хрома толщиной приблизительно 120 нм с различным характерным размером кристаллита (менее 2 нм (квазиаморфная пленка), приблизительно 25 нм). Нанесение пленок хрома производилось термовакуумным методом при различной температуре подложек.

Для исследования влияния структуры пленки хрома на кинетику термохимического окисления на каждую подложку на станции лазерной записи CLWS 200 была записана тестовая структура, состоящая из 200 кольцевых треков максимальным диаметром 4 мм. Мощность при записи изменялась от максимальной (700 мВт) на внешнем треке до 0 на внутреннем с шагом в 0,5%, диаметр записываемого пятна  $d=0,8$  мкм, период структуры 3 мкм.

Были проведены сканирующие зондо-микроскопические исследования (СЗМ) образцов как после лазерной записи скрытого изображения в пленке хрома, так и после химического травления (СЗМ Solver Pro, режим атомно-силовой микроскопии (АСМ)). Некоторые результаты АСМ представлены на рис. 5, 6. Результаты АСМ хорошо согласуются с результатами, полученными автором ранее для пленок толщиной приблизительно 50 нм [7], и позволяют сделать следующие выводы.

- Окисление идет по границам кристаллитов, а не по всему объему пленки.
- Пленки с малым размером кристаллитов демонстрируют более высокую чувствительность и разрешающую способность, в сравнении с пленками с большим размером кристаллитов за счет окисления большего количества хрома.

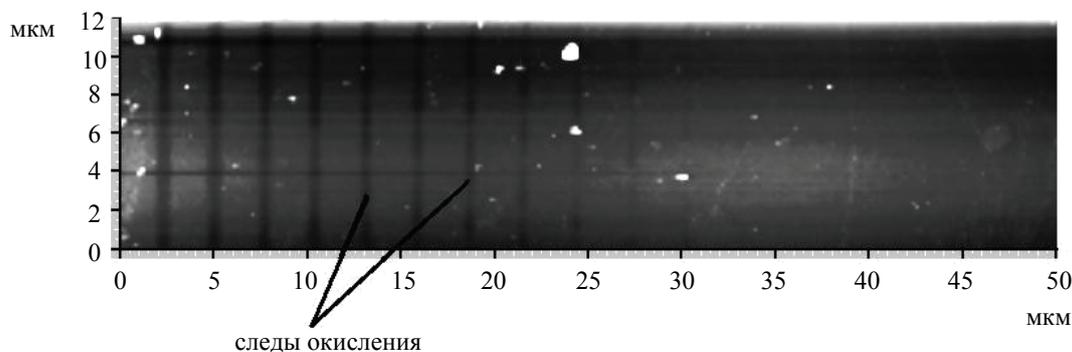


Рис. 5. Результаты атомно-силовой микроскопии

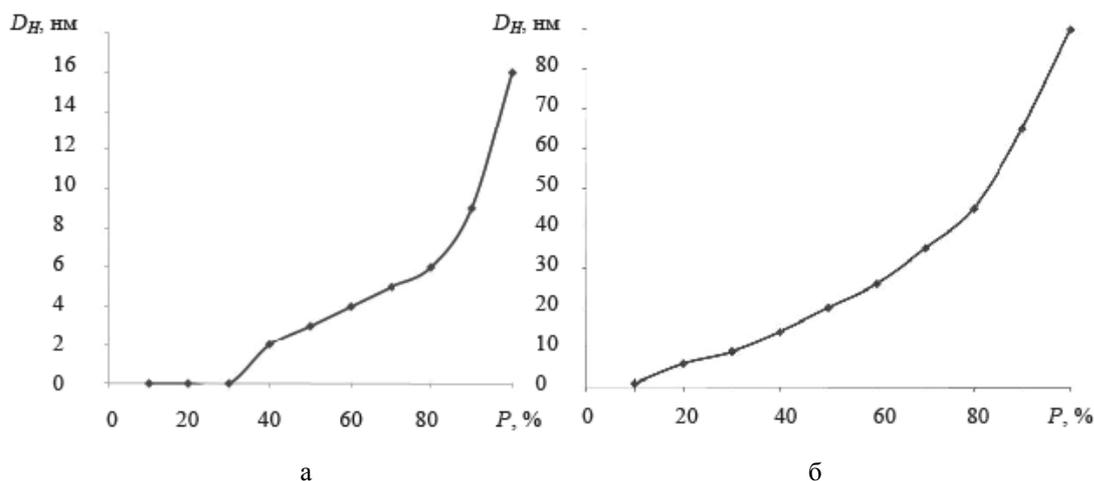


Рис. 6. Экспериментальная зависимость высоты следов окисления, определенных АСМ, от мощности лазерного излучения: а – для пленки с характерным размером кристаллитов приблизительно 25 нм; б – для квазиаморфной пленки

### Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Для теоретического описания процессов окисления различных по структуре пленок хрома была использована ранее разработанная автором физико-математическая модель [8, 9]. Новизна предложенной модели заключается в следующем.

- Пленка считается неоднородной, выделяются отдельные кристаллиты.
- Считается, что окисление идет как атмосферным кислородом, так и кислородом, растворенным в пленке хрома.
- Для описания физико-химических процессов, проходящих в системе, использован метод вероятностного клеточного автомата (ВКА).

Применение метода ВКА для моделирования физико-химических процессов в пленке хрома позволило учесть влияние структуры пленки хрома на процессы окисления под действием лазерного излучения.

Выполнен ряд численных экспериментов, направленных на выяснение влияния структуры пленки хрома на процессы ее окисления, стимулированного лазерным излучением. Для этого было проведено три серии вычислений, в которых моделировалось окисление пленок с различным характерным размером кристаллитов – 2 нм, 15 нм и 25 нм.

Для проверки адекватности предложенной физико-математической модели были использованы результаты АСМ исследования тестовых структур, описанные в предыдущем разделе. Результаты сравнения теоретических и экспериментально полученных высот следов окисления приведены на рис. 7.

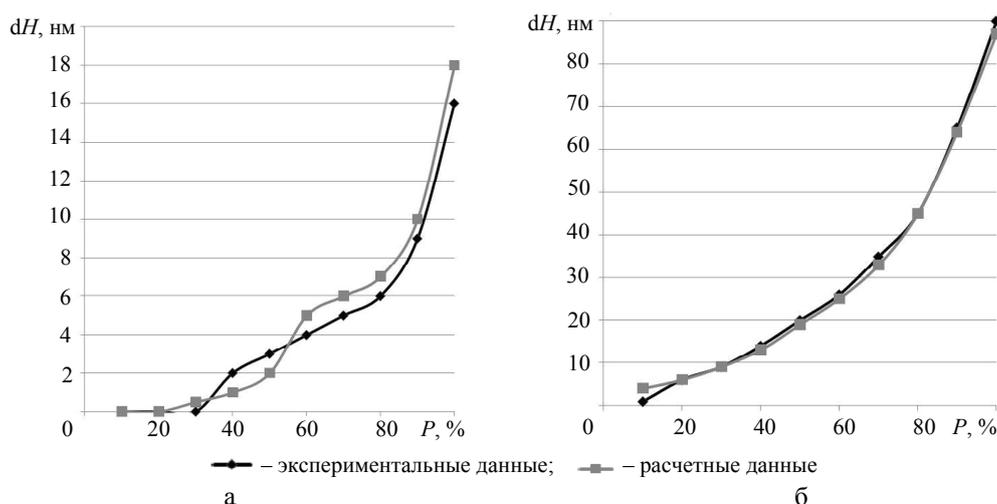


Рис. 7. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов: а – для пленки с характерным размером кристаллитов приблизительно 25 нм; б – для квазиаморфной пленки

Для пленок толщиной около 80 нм максимальное отклонение расчетной высоты следов окисления от полученных в эксперименте составило менее 5 нм, что позволяет сделать вывод об адекватности предложенной модели.

### Заключение

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что окисление преимущественно идет по границам кристаллитов, а не по всему объему пленки, причем окисление идет растворенным в пленке кислородом. Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности предложенной физико-математической модели.

Таким образом, в ходе проделанной работы были получены следующие основные результаты.

- Впервые установлено, что основное влияние на профиль полученного микрорельефа для пленок хрома толщиной менее 100 нм оказывает окисление границ кристаллитов, а не объема материала.
- Предложена и экспериментально подтверждена новая модель термохимического окисления пленок хрома толщиной 20–150 нм под действием лазерного излучения, учитывающая неоднородность пленки хрома.
- Теоретически обоснована перспективность использования квазиаморфных пленок хрома для увеличения разрешающей способности.

### Литература

1. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. – СПб: Лань, 2008. – 384 с.
2. Вейко В.П. Структурно-фазовая модификация стеклокерамических материалов под действием излучения CO<sub>2</sub>-лазера / В.П. Вейко, Г.К. Костюк, Н.В. Никоноров, Е.Б. Яковлев // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – Т. 72. – № 2. – С. 184–188.
3. Poleshchuk A.G. Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous-relief diffractive optical elements / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov // Intl. Conf. on Lasers, Applications and Technologies, 2007: Laser-assisted Micro- and Nanotechnology // Proc. of SPIE. – 2007. – V. 6732, 67320X.
4. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
5. Либенсон М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимовлияние. – СПб: Наука, 2007. – 423 с.
6. Боуэн Д.К. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д.К. Боуэн, Б.К. Таннер. – СПб: Наука, 2002. – 274 с.
7. Агафонов А.Н. Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров микроструктуры светочувствительной пленки хрома / А.Н. Агафонов, О.Ю. Моисеев, А.А. Корлюков // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 101–108.
8. Агафонов А.Н. Разработка физических принципов и алгоритмов компьютерного моделирования методами вероятностного клеточного автомата базовых процессов формирования микроструктур / А.Н. Агафонов, А.В. Волков, А.Г. Саноян, С.Б. Коныгин // Вестник СамГТУ. – 2007. – № 1. – С. 99–107.
9. Агафонов А.Н. Моделирование процесса термохимического окисления тонких пленок хрома, стимулированного лазерным излучением. – Харьковская нанотехнологическая ассамблея, 2007. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст», 2007. – С. 262.

*Агафонов Андрей Николаевич* – Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, ассистент, andr\_agafonov@mail.ru

УДК 544.537

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

**В.П. Вейко, А.В. Баранов, М.В. Ярчук, А.И. Иванов, К.В. Богданов**

Рассмотрен термохимический метод модификации тонких пленок хрома лазерными импульсами сверхкороткой длительности. Рассмотрены режимы облучения до испарения. Получены облученные участки в атмосфере и в вакууме, устойчивые к травлению. Определен структурный и химический состав облученных областей. Подобран наиболее технологичный режим модификации хрома, который отвечает задаче увеличения разрешающей способности метода. **Ключевые слова:** модификация поверхности, тонкие пленки хрома, фемтосекундный лазер, оксиды хрома, раман-спектроскопия.

### Введение

Термохимический метод записи информации на тонких пленках хрома применяется в основном для изготовления дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. Он основан на локальном лазерном окислении тонкой металлической пленки, нанесенной на диэлектрическую (обычно стеклянную) под-

ложку, с последующим травлением необлученной области [2]. Этот способ является альтернативой лазерной фотолитографии и прямому лазерному удалению материала подложки.

ДОЭ широко используются в различных устройствах, таких как принтеры, аппараты для чтения штрих-кодов, лазерные CD и DVD-плееры и т.д. Новые виды ДОЭ применяются в технологических системах, лазерных скальпелях, искусственных хрусталиках и т.д. Точность изготовления ДОЭ в последние годы значительно возросла, что позволяет решать весьма сложные проблемы – создание волновых корректоров для контроля асферической оптики основного зеркала современных телескопов.

Лазерная фотолитография является одним из лучших способов формирования топологии ДОЭ, однако она характеризуется весьма большой сложностью и временными затратами. Для создания ДОЭ применяется также локальное лазерное испарение тонкой металлической пленки, но эта технология имеет некоторые ограничения по точности и качеству топологических структур, связанные с термическими и гидродинамическими искажениями изображения.

В термохимическом способе записи информации вышеупомянутые искажения отсутствуют, а количество технологических операций существенно меньше, чем при изготовлении фотошаблонов классическим методом. Таким образом, исследование и развитие этого метода кажется нам весьма важной и перспективной задачей [3, 4]. В частности, до настоящего времени не выяснены пределы разрешающей способности метода, что принципиально ограничивает диапазон его возможных применений. Основная цель данной работы – исследование предельного разрешения при наноструктурировании пленочных слоев и изучение термохимического действия лазерных импульсов пико- и фемтосекундного диапазона. Для этого необходимо изучение физико-химических процессов, происходящих в тонких пленках хрома под воздействием сверхкоротких импульсов. На данный момент они не изучены достаточным образом и требуют теоретического и экспериментального исследования.

### Постановка задачи исследования

Локальное окисление тонких металлических пленок под действием импульсного лазерного излучения исследовалось уже с 70-х годов прошлого века [1, 2]. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показали, что главным фактором, определяющим кинетику и результат активации реакции, является тепловое действие излучения.

Согласно развитым представлениям и имеющимся экспериментальным данным того времени минимальная длительность лазерного воздействия, при которой обнаруживаются следы термохимических изменений в зоне облучения, составляет 10–50 нс [5]. Длительность воздействия излучения определяет размеры области распространения тепла в пленке и, соответственно, влияет на размеры области, в которой инициируется реакция. Поэтому, для уменьшения минимального размера области окисления на поверхности пленки и повышения разрешающей способности термохимической обработки целесообразно использовать более короткие импульсы излучения. Как известно, при импульсном воздействии излучения толщина прогретого слоя  $\sqrt{a\tau}$  составляет величину от долей микрона (при длительностях  $\tau \sim 10^{-9}$  с), до нескольких десятков микрометров (при  $\tau \sim 10^{-3}$  с), где  $a$  – коэффициент температуропроводности. Таким образом, чем меньше длительность импульса, тем меньше размер зоны облучения отличается от формы и размеров температурного и оптического изображения. Таким образом, «термохимическое изображение» при кратковременных воздействиях может быть гораздо «острее» фокального пятна лазера (рис. 1), где  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  границы температур от структурной модификации хрома в низкопороговом малоинерционном режиме  $T_{\min} \sim 450^\circ\text{C}$ , до испарения  $T_{\max} \sim 2500^\circ\text{C}$ . Эффект увеличения «резкости изображения» характерен для всех типов термической литографии, включая лазерное окисление.

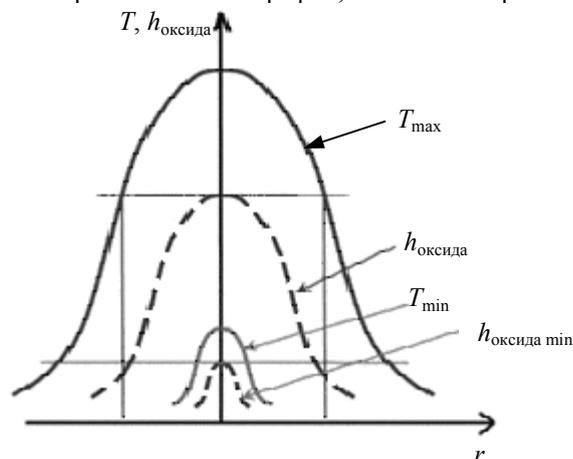


Рис. 1. Распределение температуры  $T$  и толщины окисла  $h$  по площади модифицированной области  $r$  при гауссовом распределении мощности

Было проведено исследование окислительных реакций металлов под действием сверхкоротких импульсов: пикосекундной ( $10^{-12}$  с) и фемтосекундной ( $10^{-15}$  с) длительности.

В качестве образца был взят образец тонкой пленки Cr, напыленной на стекло методом магнетронного напыления. Толщина пленки Cr около 70 нм. Целью эксперимента было получение устойчивого к травлению окисленного слоя на поверхности тонкой пленки хрома под воздействием лазерных импульсов различной длительности.

Эксперименты проводились на пикосекундном лазере, с частотой следования импульсов  $\nu=10$  Гц на длине волны  $\lambda=535$  нм при длительности импульса  $\tau=3 \cdot 10^{-11}$  с и мощности  $P=0,15$  мВт, а также на фемтосекундном лазере с частотой следования импульсов  $\nu=80$  МГц на длине волны  $\lambda=810$  нм при длительности импульса  $\tau=10^{-13}$  с и мощности  $P=0,25$  мВт. В результате проведенных опытов были получены устойчивые к травлению облученные участки хрома при пико- и фемтосекундных воздействиях.

По существующей теории окисление включает в себя несколько стадий: адсорбция кислорода на поверхности, связывание свободных электронов металла или растущего окисла, диффузия и электроперенос ионов металла и кислорода по вакансиям, междоузлиям и другим дефектам сквозь слой продукта реакции к межфазным границам, а также, собственно химическую реакцию [6]. Однако, при воздействии сверхкоротких импульсов, диффузионные процессы не успевают протекать, и образование окисла, по видимому, происходит с участием других процессов. Все это позволяет говорить о том, что имеющаяся (классическая) физическая теория импульсной лазерной термохимии не может быть напрямую использована [5]. Для определения структуры окисленного хрома был изготовлен образец со специальной топологией, на котором были реализованы режимы модификации исходной пленки хрома от плавления до рекристаллизации. Структурный состав пленок изучался методом Раман-спектроскопии и методом электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА). Для контроля высоты и геометрических размеров облученной поверхности мы использовали метод атомно-силовой микроскопии (АСМ).

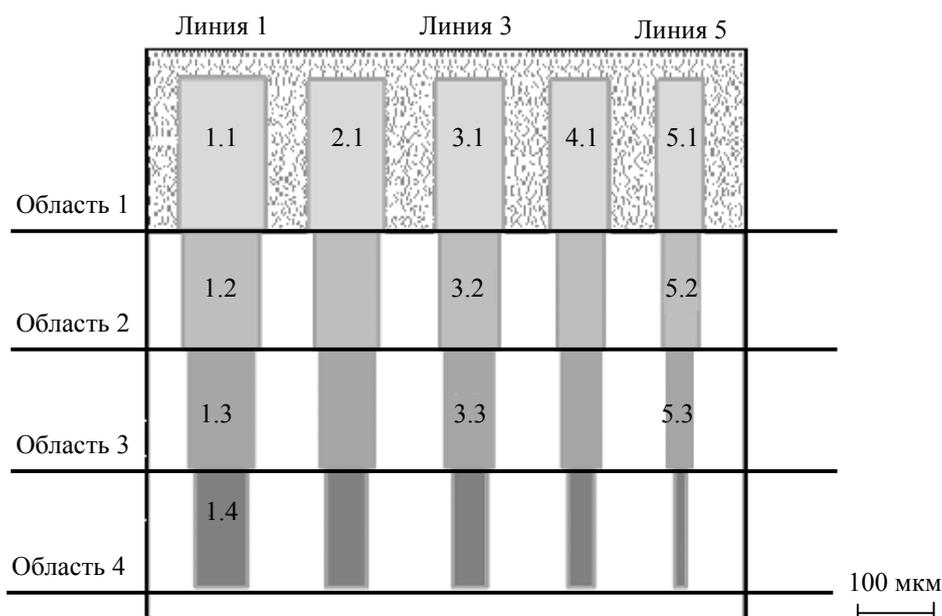


Рис. 2. Образец для исследования структуры хрома: область 1 – до травления; область 2 – травление 4 мин.; область 3 – травление 8 мин.; область 4 – травление 12 мин.

Для исследования структуры облученных областей был изготовлен образец (рис. 2), на котором при помощи координатного стола и фемтосекундного лазера были облучены 5 линий. Линии отличались средним количеством импульсов – от  $4,6 \cdot 10^6$  импульсов (линия 5) до  $5,1 \cdot 10^7$  импульсов (линия 1). Также было проведено травление облученных областей с различным временем, что позволило регулировать толщину линий. Раман-спектроскопия структуры проводилась на приборе Renishaw с использованием аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм. Для всех измерений использовались одинаковые начальные условия: мощность лазера – 0,2 мВт, время накопления – 10 с, количество аккумуляций – 20. При максимальном количестве импульсов (первая линия) метод Раман-спектроскопии показал пик на  $554 \text{ см}^{-1}$ , соответствующий соединению  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (рис. 3, а). Интенсивность пика изменялась в зависимости от местоположения области травления. Чем дальше облученная область находилась в травителе (область 3), тем менее интенсивным был пик.

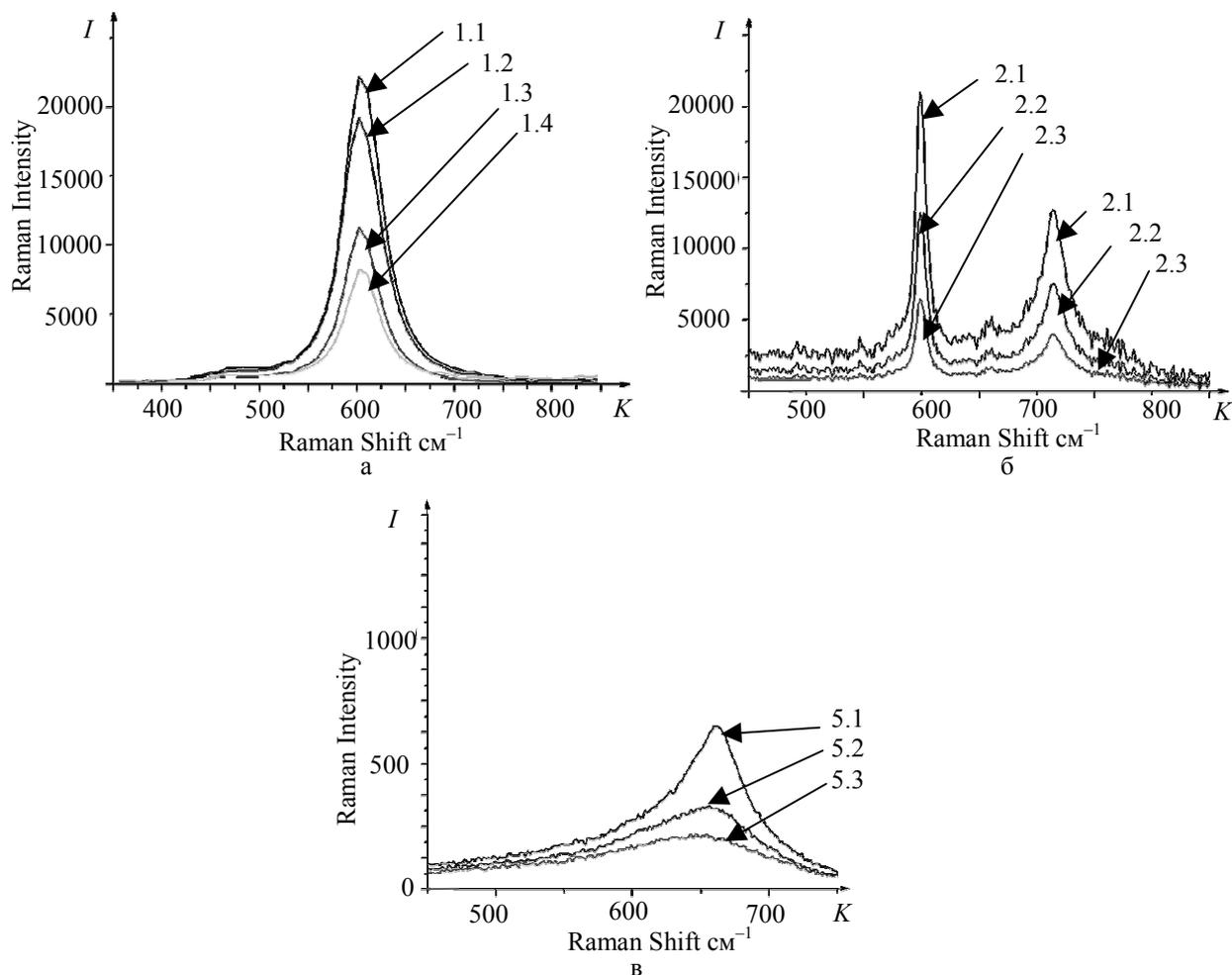


Рис. 3. Спектрограммы облученных участков: а – пик на  $554\text{ см}^{-1}$  (1.1 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до травления, 1.2 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  травление 4 мин., 1.3 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  травление 8 мин., 1.4 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  травление 12 мин.); б – два пика: на  $554\text{ см}^{-1}$  (2.1 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  до травления, 2.2 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  травление 4 мин., 2.3 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  травление 8 мин.),  $665\text{ см}^{-1}$  (2.1 –  $\text{CrO}_2$  до травления, 2.2 –  $\text{CrO}_2$  травление 4 мин., 2.3 –  $\text{CrO}_2$  травление 8 мин.); в – пик на  $665\text{ см}^{-1}$  (5.1 –  $\text{CrO}_2$  до травления, 5.2 –  $\text{CrO}_2$  травление 4 мин., 5.3 –  $\text{CrO}_2$  травление 8 мин.)

При среднем количестве импульсов (линия 3) метод показал уменьшение пика на  $554\text{ см}^{-1}$ , а также появление пика на  $665\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, б). Интенсивность данного пика мала по сравнению с пиком оксида хрома, однако сильно отличается от шумов, получаемых на приборе и составляющих не более 20–30 относительных единиц. Чем дольше облученная область находилась в травителе (область 3), тем менее интенсивным становился пик на  $554\text{ см}^{-1}$ , пока совсем не исчезал. При минимальном количестве импульсов (линия 5) пик на  $554\text{ см}^{-1}$  полностью исчезает, и остается лишь пик на  $665\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, в). Пик на  $665\text{ см}^{-1}$  в центре и по краям линии имеет разную полуширину, что указывает на процесс перехода вещества из аморфного состояния в кристаллическое. Интерпретировать пик на  $665\text{ см}^{-1}$  методом раман-спектроскопии не удалось, и был использован метод ЭСХА, позволивший определить облученную область как соответствующую соединению  $\text{CrO}_2$ .

Одной из задач исследования было определение способов образования покрытия, селективного к травителю. Кроме известного ранее воздействия лазерного излучения на хром с образованием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (режим термохимии в атмосфере), были также получены чисто термические модификации хрома, устойчивые к травлению, без образования соединений с кислородом (облучение проходило в вакууме). Таким образом, кроме процессов окисления, можно предположить наличие структурной модификации пленки хрома во всех облученных областях до плавления. Такие выводы позволила сделать раман-спектроскопия облученных в сверхвысоком вакууме (до  $10^{-9}$  мм рт. ст.) участков хрома.

Для контроля геометрических размеров линий до и после травления был использован метод АСМ. Было показано, что при образовании расплава с  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  высота облученной области увеличивается в 2 раза. При этом устойчивость к травителю максимальная. В областях с двумя пиками устойчивость к тра-

вительно средняя, высота области увеличивается в 1,5 раза. При минимальном количестве импульсов (пятая линия) – устойчивость к травителю наименьшая, но достаточная для технологического процесса изготовления ДОО. Высота линии не изменяется, определить наличие модифицированной области можно методом латеральной микроскопии, который позволяет различать области с различными коэффициентами трения. В результате после травления, в режиме 3, высота всех линий уменьшилась на 25%, тогда как ширина – более чем в 2 раза, что происходит, по-видимому, благодаря гауссову распределению интенсивности в пятне лазера.

Данные АСМ, раман-спектроскопии и ЭСХА позволяют сделать выводы о структуре облученного хрома, которая представлена на рис. 4.

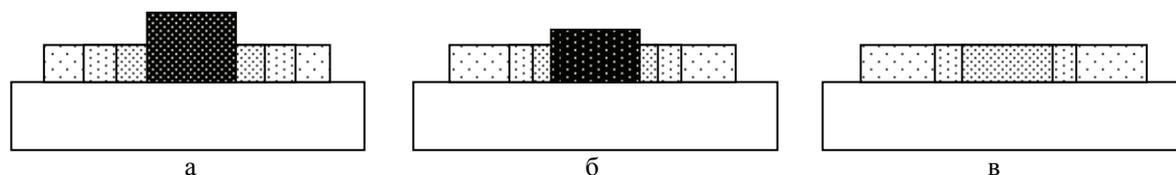


Рис. 4. Структура облученного хрома до травления 1, 3 и 5 линий: – необлученный хром; – слабо модифицированный хром + соединение CrO<sub>2</sub>; – сильно модифицированный хром + соединение CrO<sub>2</sub>; – расплав с Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; – модифицированный хром с двумя пиками: CrO<sub>2</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### Выводы

Показана возможность получения структур на тонких пленках хрома, проявляющих устойчивость к воздействию травителя, под действием квазинепрерывного фемтосекундного лазера, как в атмосфере (термохимический режим), так и в вакууме (режим структурной модификации). Полученные структуры мы можем разделить на три типа. Расплав с образованием пленки Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (что соответствует первой линии), структурная модификация хрома с образованием одновременно Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CrO<sub>2</sub> (третья линия) и структурная модификация хрома с образованием только CrO<sub>2</sub> – пятая линия. По результатам исследования низкопороговый и малоинерционный режим рекристаллизации хрома с образованием CrO<sub>2</sub>, можно считать наиболее технологичным. Схожие по типу структуры были получены при воздействии на хром лазерного излучения с длительностью импульсов от  $\tau = 10^{-12}$  с до  $\tau = 10^{-3}$  с.

Авторы благодарят Заморянскую М.В. за определение структуры образцов методом ЭСХА, Первухину М.С. за рентгенографическое исследование структуры кристаллов облученного хрома, Левичева В.В. за исследование поверхности образцов методами латеральной микроскопии, Юльметову О.С. за подготовку образцов для облучения в вакууме.

Работа поддержана грантом РФФИ №09-02-01065а и госконтрактом РФ ГК№П1134.

#### Литература

1. Твердохлеб П.Е., Коронкевич В.П., Полещук А.Г. и др. 3D лазерные информационные технологии. – Новосибирск: Изд-во ИАЭ, 2003. – 550 с.
2. Вейко В.П. и др. Термохимическое действие лазерного излучения // Доклады АН СССР. – 1973. – Т. 208. – 600 с.
3. Veiko V.P., Metev S.M. Laser-Assisted Microtechnology. – Springer-Verlag, NY-Heidelberg, 1998. – 391 p.
4. Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. et al. // Appl. Opt. – 1999. – № 38. – 1295 p.
5. Либенсон М.Н., Котов Г.А. Теория роста тонких окисных пленок на поверхности металла при импульсном нагревании. – Новосибирск: Электронная техника, 1973. – 200 с.
6. Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P. et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. – 1999. – № 38. – 1301 p.

- Вейко Вадим Павлович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, veiko@lastech.ifmo.ru
- Баранов Александр Васильевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, a\_v\_baranov@yahoo.com
- Ярчук Михаил Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, chukforyou@list.ru
- Иванов Александр Игоревич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ale4103@gmail.com
- Богданов Кирилл Вадимович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kirw@inbox.ru

УДК 535.3; 535.4; 535.012.21

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Е.О. Гавриш, В.А. Чуйко

Исследуется возможность создания анизотропной текстуры на гладкой поверхности ориентирующих пленок на основе аморфного углерода (а-С:Н) и оксидов индия и олова (ITO) с помощью УФ лазерного излучения. Приводятся результаты исследования с помощью оптической микроскопии поверхности образцов до и после обработки УФ лазерным излучением, а также ориентации жидких кристаллов (ЖК) на обработанной поверхности. Обсуждается влияние условий обработки на текстуру поверхности.

**Ключевые слова:** аморфный углерод, оксид индия и олова, тонкие пленки, УФ излучение, жидкий кристалл.

### Введение

Совершенствование методов ориентации нематических ЖК актуально как для развития дисплейных ЖК-технологий [1, 2], так и при разработке активных компонентов телекоммуникационных систем [3]. К бесконтактным способам ориентации жидких кристаллов относятся: обработка поверхности ионными пучками, поляризованным и неполяризованным УФ светом [2, 4]. Эти методы основаны на удалении слоя материала для формирования анизотропной текстуры поверхности ориентирующего слоя, которая обеспечивает при взаимодействии с жидкими кристаллами однонаправленную параллельную ориентацию молекул. Для воздействия неполяризованного УФ света на тонкую углеродную пленку используют излучение мощной ртутной лампы. В качестве источника поляризованного УФ излучения может быть использован лазер. Для формирования направления ориентации на поверхности углеродных конденсатов применяют воздействие неполяризованного и поляризованного УФ излучения [2]. Для создания ориентирующей поверхности можно перед нанесением ориентирующего слоя создать текстуру поверхности электрода, используя для этого бомбардировку пучком ионов [5].

Целью этой работы является исследование возможности формирования анизотропии текстуры поверхности ориентирующих слоев а-С:Н, а также предшествующего им электродного слоя на основе ITO с помощью поляризованного УФ излучения для улучшения качества ориентации жидких кристаллов.

Слои ITO получали методом катодного распыления. Ориентирующие слои а-С:Н осаждали на стеклянные подложки, покрытые прозрачным проводящим покрытием в плазме тлеющего разряда на постоянном токе из паров ацетона при давлении в вакуумной камере  $5 \cdot 10^{-2}$  Па и ионном токе 1 мА. Слои а-С:Н, полученные с помощью CVD-процесса осаждения в плазме, являются гладкими и повторяют рельеф предшествующей поверхности.

### Создание анизотропии текстуры поверхности способом обработки УФ излучением аморфной углеродной пленки

Для формирования анизотропии поверхности тонких пленок а-С:Н был использован УФ лазер ЛГИ-504А с длительностью импульса 6 нс и длиной волны 0,337 мкм [6]. Плотность мощности УФ излучения варьировали, изменяя напряжение накачки лазера и фокусировку пучка. Текстура поверхности создавалась путем перемещения образца, закрепленного на координатном столике, по двум координатам со скоростью 1,2 мм/с при неподвижном лазерном пучке. В результате такой обработки происходило удаление слоя материала и образование параллельных канавок. Глубину канавки, образующуюся при воздействии лазерного излучения, измеряли при помощи микроинтерферометра МИИ-4. В таблице приведены условия обработки УФ излучением поверхности образцов и глубина канавки, полученная в результате усреднения по трем измерениям каждого образца. Среднеквадратичная ошибка измерений не превышала 10%.

Номер образца	$q$ , Вт/см <sup>2</sup>	Вид пучка	Глубина канавки, мкм	Ширина канавки, мкм	Скорость стола, мм/с	Вид поверхности
1	0,24	сфокусированный	0,64±0,06	27	1,2	а-С:Н
2	0,02	расфокусированный	0,52±0,04	27	1,2	а-С:Н
3	0,03	расфокусированный	0,13±0,01	55	1,2	а-С:Н
4	0,24	сфокусированный	–	13,5	10	ITO
5	0,31	сфокусированный	–	7,4	10	ITO

Таблица. Условия обработки образцов УФ излучением

На рис. 1, а, б, приведены фотографии поверхности образцов после обработки их  $N_2$ -лазером, полученные с помощью микроскопа БИОЛАМ с десятикратным увеличением, оснащенного видеокамерой. Как видно на рис. 1, а, при обработке сфокусированным пучком плотностью мощности  $0,24 \text{ Вт/см}^2$  образуются глубокие канавки ( $0,64 \text{ мкм}$ ). Воздействие расфокусированного пучка (образец № 2) приводило к уменьшению глубины канавки до  $0,52 \text{ мкм}$  (рис. 1, б). Наименьшая глубина съема материала аморфной углеродной пленки, равная  $0,13 \text{ мкм}$ , была получена у образца № 3 при обработке расфокусированным пучком плотностью мощности  $0,03 \text{ Вт/см}^2$ . Однако воздействие УФ излучения на а-С:Н пленку приводило к удалению не только слоя углерода, но также и поликристаллического электродного слоя под ним.

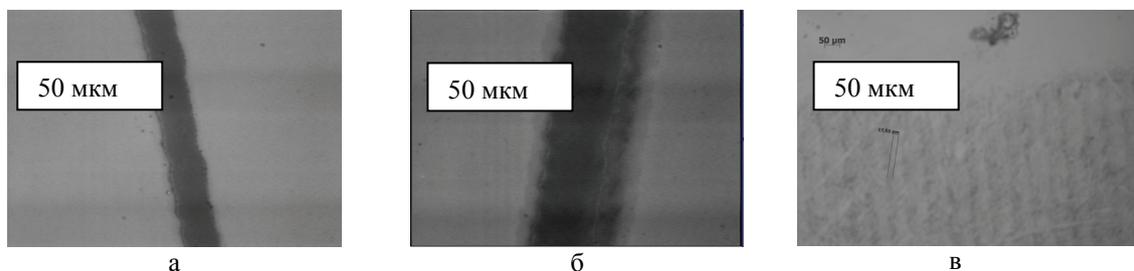


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов, обработанных УФ лазером:  
а – № 1; б – № 2; в – № 3 (см. таблицу)

### Создание анизотропии текстуры поверхности способом обработки УФ излучением ИТО слоя

В качестве альтернативного метода был использован способ формирования анизотропии текстуры поверхности ИТО слоем, поляризованным УФ излучением, перед осаждением на него слоя а-С:Н. Для снижения съема материала была увеличена скорость перемещения координатного столика, на котором закреплялся образец, относительно лазерного пучка в 10 раз. В результате этого значительно уменьшилась ширина канавок (рис. 1, в). Из-за недостаточного высокого разрешения микроинтерферометра глубину канавок в данном способе померить не удалось.

На рис. 2, а, для сравнения приведена микрофотография однородной параллельной ориентации нематического ЖК на поверхности слоя а-С:Н, осажденной на подложки, расположенные под углом  $20^\circ$  относительно вертикали [4]. Нанотекстура ориентирующей поверхности в этом случае создавалась перед нанесением пленки а-С:Н в результате обработки ее ионами инертного газа Ar, падающими под скользящими углами при наклонном расположении подложек в плазме.

На рис. 2, б, приведена микрофотография ориентации ЖК-1282 (НИОПИК) на поверхности слоя а-С:Н, осажденного на подложки, расположенные горизонтально относительно потока в плазме и обработанные затем с помощью УФ лазера. При исследовании ЖК ячеек, собранных из элементов, обработанных УФ излучением, было обнаружено чередование полос с разной ориентацией. На рис. 2, б, можно видеть, что глубокие канавки, образовавшиеся на поверхности в результате воздействия УФ излучения, нарушают однородность параллельной ориентации ЖК. Вдоль канавок молекулы ЖК ориентируются гомеотропно (перпендикулярно поверхности), что свидетельствует об удалении ориентирующего слоя а-С:Н.

На рис. 2, в, показана микрофотография однородной параллельной ориентации нематического ЖК при использовании метода осаждения слоя а-С:Н на поверхность слоя ИТО, обработанного УФ поляризованным излучением. Уменьшение глубины канавок при таком способе создания ориентирующей поверхности привело к улучшению качества ориентации.

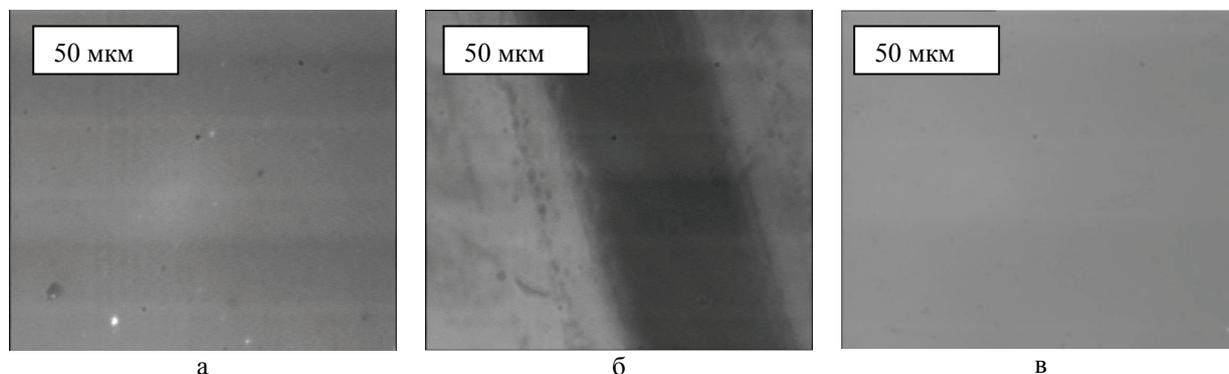


Рис. 2. Микрофотографии ориентации нематического ЖК на поверхности а-С:Н, полученных в плазме тлеющего разряда (а), после обработки поверхности а-С:Н УФ излучением (б), после предварительной обработки УФ излучением слоя ИТО, перед осаждением а-С:Н (в)

### Заключение

При сканировании поверхности исследуемых образцов с толщиной ориентирующего слоя а-С:Н менее 130 нм с помощью УФ излучения азотного лазера, глубина канавок превышала его толщину. В результате этого удалялся не только ориентирующий, но и частично слой ИТО, что вызывало неоднородность ориентации ЖК на плоскости внутри канавок с образованием полосатой структуры. В случае предварительной обработки слоя ИТО, для создания анизотропии текстуры его поверхности, благодаря повышению скорости перемещения образца относительно лазерного пучка, удалось не только уменьшить глубину канавок, но и получить затем однородную ориентацию жидкого кристалла на поверхности ориентирующего слоя а-С:Н, осажденного на эту поверхность. Дальнейшее совершенствование способа формирования анизотропии ориентирующей ЖК поверхности будет направлено на оптимизацию условий обработки с использованием УФ поляризованного излучения: длины волны, плотности мощности и скорости перемещения обрабатываемой поверхности.

### Литература

1. Rho S.J., Lee D.-K., Baik H.K. et al. Investigation of the alignment phenomena using a-C:H thin films for liquid crystal alignment materials // *Thin Solid Films*. – 2002. – V. 420–421. – P. 259–262.
2. Hwang J.-Y., Jo Y.-M., Seo D.-S., Jang J. Liquid crystal alignment capability by the UV alignment method in a-C:H thin films *Jap // J. of Appl. Phys., Part 2: Letts*. – 2003. – V. 42. – № 2A. – P.114–116.
3. Васильев В.Н., Коншина Е.А., Костомаров Д.С., Федоров М.А., Амосова Л.П., Гавриш Е.О. Влияние ориентирующей поверхности и толщины слоя жидкого кристалла на характеристики электроуправляемых оптических модуляторов // *ПЖТФ*. – 2009. – Т. 35. – Вып. 11. – С. 33–38.
4. Park C.-J., Hwang J.-Y., Kang H.-K., Seo D.-S., Ahn H.-J., Kim J.-B., Kim K.-C., Baik H.-K. Liquid crystal alignment effects and electro optical performances of twisted Nematic-Liquid Crystal display using ion-beam alignment method of nitrogen-doped diamond like carbon thin film layer. *Jap // J. of Appl. Phys. Letts*. – 2005. – V. 44. – № 3. – P.1352–1355.
5. Wu H.-Y., Pan R.-P. Liquid crystal surface alignments by using ion beam sputtered magnetic thin films // *Applied Physics Letters*. – 2007. – 91. – 074102. – 2007.
6. Гавриш Е.О. Формирование анизотропии наноструктуры поверхности тонких пленок на основе аморфного углерода // *Сборник трудов конференции молодых ученых. Выпуск 3. Оптоинформатика, наносистемы и теплотехника*. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 263 с.

- Гавриш Екатерина Олеговна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, katty87@list.ru
- Чуйко Владимир Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, veiko@lastech.ifmo.ru

УДК 681.2-2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОКОНТРАСТНОГО РАСТРА ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО МАРКИРОВАНИЯ

О.С. Юльметова, А.Г. Щербак

Приводятся результаты исследований влияния режимов лазерного маркирования на степень контрастности и микрогеометрии меток, полученных на доведенной поверхности бериллиевых узлов гироскопов. В ходе исследований выявлена возможность получения требуемого уровня контрастности  $0,7 \pm 0,1$  на длине волны 860 нм посредством лазерного маркирования.

**Ключевые слова:** лазерное маркирование, шероховатость.

### Введение

Для оптико-электронных систем съема информации с таким узлом, как ротор электростатического гироскопа, важной задачей является создание рисунка заданной контрастности [1]. При этом контрастность рисунка, описываемая соотношением (1), определяется разностью коэффициентов отражения базовой поверхности  $R_b$  и растра  $R_r$ , полученного локальной модификацией базовой поверхности:

$$K = \frac{R_b(\lambda) - R_r(\lambda)}{R_b(\lambda) + R_r(\lambda)}, \quad (1)$$

где  $R_b$  и  $R_r$  – коэффициент отражения бериллиевой и растровой поверхности соответственно;  $\lambda$  – рабочая длина волны, определяемая условиями функционирования оптической системы съема информации и составляющая 860 нм.

В качестве эффективного метода локальной модификации поверхности, позволяющей создать растр с требуемым уровнем контрастности, предложено использовать лазерное маркирование. Выбор данного способа растрообразования обусловлен его устойчивостью к механическим и тепловым воздействиям, высокой стабильностью параметров ( $\pm 2\%$ ), пространственной и спектральной яркостью [2].

Целью работы являлось создание рисунка на поверхности доведенного бериллиевого образца с контрастностью в пределах 0,4–0,8, получение в конечном счете требуемого уровня контрастности  $K=0,7\pm 0,1$  на длине волны 860 нм при минимальном изменении шероховатости растра относительно шероховатости базовой поверхности образца, составляющей по параметру среднеквадратичного отклонения профиля поверхности  $Rq = 0,07$  мкм.

Требование к однородности шероховатости базовой поверхности и растров обусловлено тем, что в оптико-электронных системах гироскопов съем информации осуществляется в процессе вращения сферического ротора, на поверхность которого нанесен контрастный рисунок. При этом локальная неоднородность поверхностной структуры ротора может вызвать нежелательное изменение его дисбаланса.

Для достижения поставленной цели необходимо комплексное решение следующих задач:

- выбор средств оснащения процессов лазерного маркирования и контроля качества растрового рисунка;
- выявление особенностей физической сущности процесса лазерного маркирования, влияющих на степень оптического контраста и шероховатость модифицированного слоя;
- исследование влияния мощности лазерного излучения на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя;
- определение корреляции контрастности и шероховатости лазерных меток со скоростью движения сканатора;
- оценка влияния плотности линий на однородность, контрастность и шероховатость лазерного рисунка.

#### **Выбор средств оснащения процессов лазерного маркирования и контроля качества растрового рисунка**

Для создания рисунка использовалась лазерная установка МиниМаркер – компактный прецизионный маркер на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны лазерного излучения 1,06 мкм.

Исследование контрастности полученного рисунка осуществлялось с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К, позволяющего измерять коэффициенты отражения базовой поверхности  $R_b$  и поверхности растров  $R_r$  в диапазоне длин волн 350–900 нм. Расчет контрастности был произведен по формуле (1). Контроль шероховатости осуществлялся на измерительной станции Hommel Tester T8000.

#### **Физическая сущность процесса лазерного маркирования и ее влияние на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя**

Лазерное маркирование основано на локальном нагреве маркируемой поверхности, в результате которого происходит сублимация материала. Процесс нагрева поверхности материала лазерным излучением при отсутствии фазовых переходов описывается уравнениями (2) и (3).

Падающее излучение поглощается в тонком приповерхностном слое по закону Бугера:

$$q(x) = A \cdot q_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (2)$$

где  $q(x)$  – плотность потока лазерного излучения;  $A$  – коэффициент поглощения;  $A \cdot q_0$  – плотность лазерного потока, поглощенная поверхностью;  $\alpha$  – показатель поглощения.

Глубина проникновения излучения в вещество равна

$$\delta = 1/\alpha. \quad (3)$$

Для металлов величина  $\alpha$  составляет  $10^{-5} - 10^{-6} \text{ см}^{-1}$  [2].

Распространение теплового потока описывается законом Фурье, определяющим, что плотность теплового потока в твердом теле пропорциональна градиенту температуры [3].

Однако физическая сущность лазерной обработки не ограничивается термическими процессами. Этот процесс сопровождается активным взаимодействием поверхности образца с элементами воздушной среды, в результате которого на поверхности появляется цветная пленка, отражающая структурные и химические изменения поверхностного слоя. Глубина модифицированного слоя при этом не превышает величину  $\delta$ , определяемую соотношением (3).

Исходя из рассмотренных физических особенностей процесса, контрастность рисунка при маркировании определяется толщиной цветовой пленки и шероховатостью модифицированной поверхности. Очевидно, что чем больше шероховатость растрового рисунка, тем выше степень оптического контраста, определяемого соотношением (1). При этом необходимо учитывать, как указывалось выше, и требование к однородности шероховатости рисунка и базовой поверхности.

Толщина цветовой пленки определяется условиями обработки: она зависит от газовой среды, в которой велась обработка; от температуры обработки как катализатора реакции взаимодействия поверхности образца с элементами газовой среды; от плотности линий – числа линий, пройденных лазером на 1 мм поверхности, характеризующей однородность рисунка. В частности, на рис. 1 приведены фотографии поверхности, подвергнутой лазерной обработке с одним из параметров обработки  $N$  – число линий на 1 мм, 20 и 1000  $\text{мм}^{-1}$  соответственно при диаметре лазерного пятна  $5 \cdot 10^{-5}$  м.

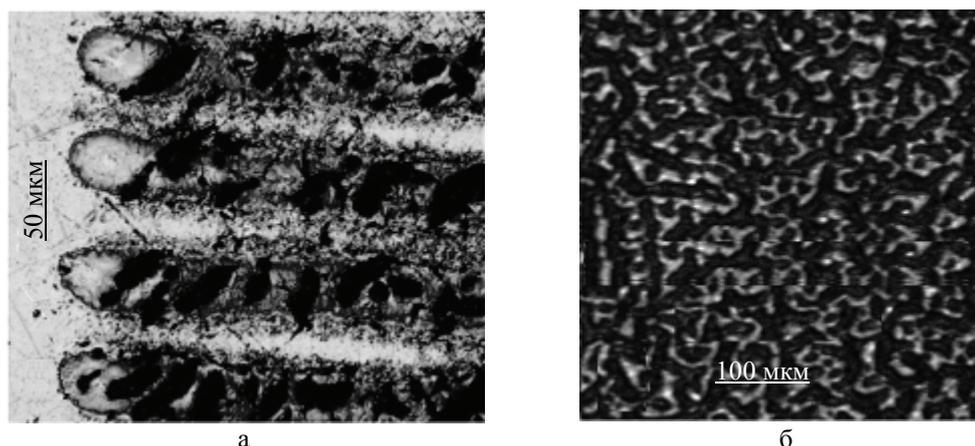


Рис. 1. Поверхности после лазерной обработки при 20-кратном увеличении и плотности линий: а –  $N=20 \text{ мм}^{-1}$ ; б –  $N=1000 \text{ мм}^{-1}$

Из рис. 1 видно, что плотность линий существенно влияет на однородность рисунка, что подтверждает важность исследований влияния плотности линий на степень контрастности.

В свою очередь, шероховатость напрямую зависит от режимов обработки: мощности лазерной обработки  $P$ , скорости движения лазера  $V$  и плотности линий  $N$ .

#### Исследование влияния мощности лазерной обработки на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя

На рис. 2 приведены зависимости шероховатости от мощности лазерного излучения для разных диапазонов мощности.

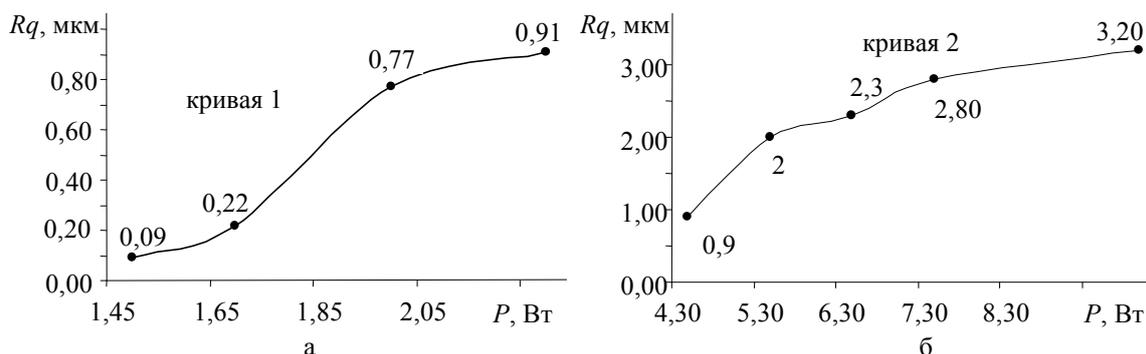


Рис. 2. Зависимость шероховатости от мощности лазера: а – скорость сканирования 10 мм/с и плотность линий 500  $\text{мм}^{-1}$ ; б – скорость сканирования 12 мм/с и плотность линий 20  $\text{мм}^{-1}$

Кривая 1, представленная на рис. 2, а, была получена при скорости сканирования 10 мм/с, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 500  $\text{мм}^{-1}$ , а кривая 2 рис. 2, б, определяется скоростью сканирования 12 мм/с, частотой импульсов 20 кГц и плотностью 20  $\text{мм}^{-1}$ . Характер изменения кривых 1 и 2 свидетельствует о том, что с увеличением мощности лазерного излучения, шероховатость пропорционально увеличивается. Эта закономерность согласуется с физической сущностью процесса лазерной обработки: возрастание мощности приводит к росту объема испаряемого материала.

При этом для кривой 1 имеет место явно выраженное увеличение параметра  $Rq$  в диапазоне мощностей  $P$  от 1,7 до 2,08 Вт ( $Rq$  меняется от 0,22 до 0,77), а при  $P$  менее 1,7 Вт и  $P$  в пределах от 2,0–2,4 Вт  $Rq$  меняется не так интенсивно.

С целью уменьшения испарений обработка намеренно велась в диапазоне малых мощностей от 1 до 2,5 Вт (кривая 1). В результате эксперимента было выявлено, что при мощности 1 Вт поверхность остается без изменения – нет ни цветообразования, ни испарения. А при мощности маркирования 1,5 Вт параметр шероховатости  $Rq$  составил 0,09 мкм, т.е. параметр шероховатости увеличился на 12,5%, так как  $Rq$  исходной поверхности составляет 0,08 мкм. Для выявленного на первом этапе приемлемого диапазона мощностей, на втором этапе необходимо оценить контрастность.

На рис. 3 приведен график зависимости контрастности от мощности, варьируемой в диапазоне от 1,5 до 2 Вт. График, представленный на рис. 3 свидетельствует о том, что контрастность, соответствующую требованию  $K=0,7\pm 0,1$ , можно получить в диапазоне мощности от 1,6 до 1,7 Вт.

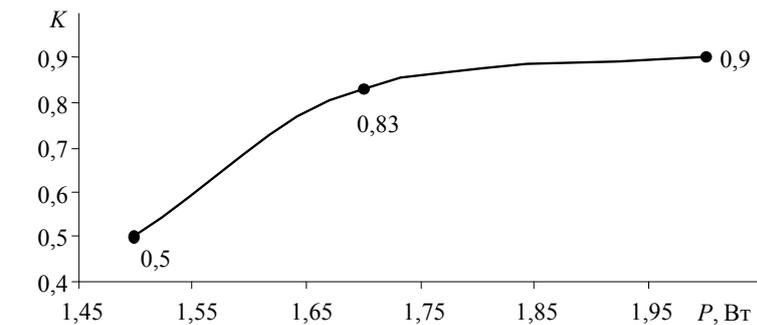


Рис. 3. Зависимость контрастности от мощности лазера при скорости 10 мм/с, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 500 мм<sup>-1</sup>

#### Корреляция контрастности и шероховатости со скоростью движения лазера

На рис. 4 приведен график зависимости шероховатости от скорости движения лазерного луча. С увеличением скорости сканирования шероховатость поверхности имеет общую тенденцию снижения. Эксперимент с варьированием скоростей был проведен при мощности излучения 2 Вт и, поэтому, уровень шероховатости модифицированного слоя отличается от шероховатости базовой поверхности ( $Rq=0,08$  мкм) значительно, минимальное значение составило 0,38 мкм. На рис. 5 приведен график зависимости контрастности от скорости перемещения лазера. С увеличением скорости сканирования контрастность уменьшается. При этом все значения контрастности при данных условиях обработки удовлетворяют требованию: не менее 0,8.

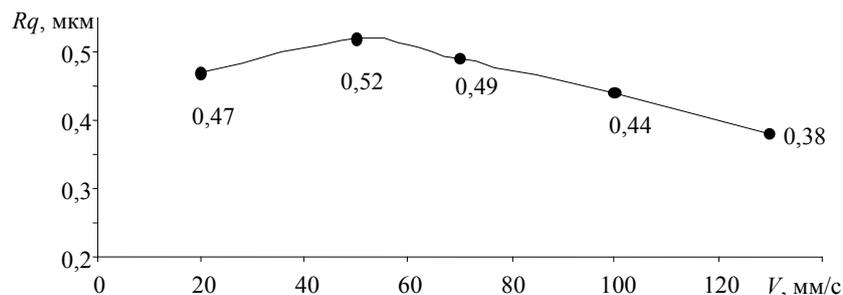


Рис. 4. Зависимость шероховатости от скорости сканирования при мощности 2 Вт, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 700 мм<sup>-1</sup>

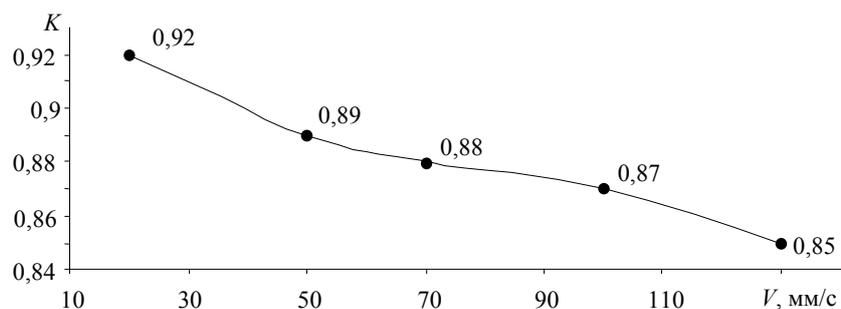


Рис. 5. Зависимость контрастности от скорости сканирования при мощности 2 Вт, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 700 мм<sup>-1</sup>

Полученные в данном разделе экспериментальные результаты обозначили перспективы дальнейших исследований, а именно: варьирование скоростей сканирования при базовой мощности в пределах от 1,6 до 1,7 Вт с целью уменьшения шероховатости растра, полученного в ходе лазерной обработки.

**Оценка влияния плотности линий на однородность, контрастность и шероховатость лазерного рисунка**

В табл. 1 приведены результаты исследований влияния плотности линий при сканировании на степень оптического контраста и шероховатость обработанного лазером слоя.

Мощность лазера $P$ , Вт	Скорость сканатора $V$ , мм/с	Частота импульсов $f$ , кГц	Плотность линий $N$ , мм <sup>-1</sup>	Контрастность, $K$	$Rq$ , мкм
2	30	20	150	0,63	0,3
			250	0,88	0,33
			350	0,90	0,41
			750	0,92	0,46
1,5	20	20	1000	0,47	0,09
			2000	0,79	0,10
			2500	0,87	0,15

Таблица 1. Влияние числа линий при сканировании на контрастность и шероховатость модифицированного слоя

Проведенные измерения свидетельствуют о том, что с увеличением плотности линий шероховатость и контрастность увеличиваются. Наиболее приемлемый результат при мощности 2 Вт и минимальной плотности линий  $N=150$  мм<sup>-1</sup> составил  $K=0,63$  при  $Rq=0,3$  мкм. При мощности  $P=1,5$  Вт и  $N=2000$  мм<sup>-1</sup> результат, удовлетворяющий заявленным требованиям –  $K=0,79$  при  $Rq=0,1$  мкм.

Результаты, удовлетворяющие поставленной цели, представлены в табл. 2.

Мощность лазера $P$ , Вт	Скорость сканатора $V$ , мм/с	Плотность линий $N$ , мм <sup>-1</sup>	Контрастность, $K$	$Rq$ , мкм
1,5–1,7	10	500	0,5–0,83	0,09–0,22
2	130	700	0,85	0,38
2	30	150	0,63	0,3
		250	0,88	0,33
1,5	20	1000	0,47	0,09
		2000	0,79	0,10

Таблица 2. Рекомендуемые режимы

Табл. 2 содержит рекомендуемые режимы лазерной обработки, полученные в ходе исследования влияния мощности лазерного излучения, скорости движения луча и плотности линий на степень оптического контраста и микрогеометрию модифицированного слоя.

**Заключение**

Выявлена принципиальная возможность получения требуемого уровня контрастности рисунка  $0,7\pm 0,1$  на длине волны 860 нм посредством лазерного маркирования. Определен диапазон оптимальных параметров лазерной обработки, обеспечивающих требуемые характеристики растрового рисунка.

Перспективы дальнейших исследований связаны с исследованием влияния режимов лазерной обработки на толщину цветовой пленки, влиянием газовых сред и исходной шероховатости на степень контрастности модифицированного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

**Литература**

1. Агроскин Б.Н., Галай В.И., Гинзбург В.А., Гуттовская А.К., Перминова Н.В. Сравнительная оценка электрохимического и фотохимического методов формообразования светоконтрастного рисунка на роторе бескарданного электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 1996. – №3 (14). – С. 41–47.

2. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел «Технологические лазеры и лазерное излучение». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 50 с.
3. Неумоина Н.Г., Белов А.В. Тепловые процессы в технологической системе резания: учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – 84 с.

*Юльметова Ольга Сергеевна*

– ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, [www.ralli@rambler.ru](mailto:www.ralli@rambler.ru)

*Щербак Александр Григорьевич*

– ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, [a\\_sch@gtm.ru](mailto:a_sch@gtm.ru)

УДК 681.513.675

**УПРАВЛЕНИЕ НЕТРИВИАЛЬНЫМИ МАЯТНИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ  
В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

С.А. Колюбин, А.А. Пыркин

Рассматривается проблема управления движением неполноприводных маятниковых систем в условиях параметрических и функциональных неопределенностей на примере стабилизации перевернутого положения маятника с инерционным колесом на подвижном основании. Разработан адаптивный алгоритм, реализующий цель управления при априорной неизвестности параметров объекта, наличии в системе неучтенной динамики и ограничениях на величину управляющего воздействия. В отличие от известных аналогов, алгоритм поддерживает настройку регуляторов в режиме реального времени. Эффективность предлагаемого подхода проиллюстрирована экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** неполноприводная маятниковая система, адаптивное управление, идентификация, мехатронный комплекс.

**Введение**

Интенсивное научно-техническое развитие ставит перед современной теорией автоматического управления новые более сложные задачи. В ряде случаев классические методы не удовлетворяют необходимым критериям или оказываются просто неэффективными, тогда возникает задача разработки новых подходов.

Особый интерес вызывают методы управления объектами, характеризующимися существенно нелинейной динамикой. Большое количество работ в области теории управления, представленных за последние годы на крупнейших международных конференциях, посвящено исследованию неполноприводных маятниковых систем, как наиболее доступному и наглядному средству моделирования сложных нелинейных колебаний [1–8].

В данной работе в качестве объекта управления выбран маятник с инерционным колесом (маятник Шмидта). Стабилизация такого маятника в перевернутом положении является классической задачей. Множество работ посвящено решению этой проблемы. Так в [2] предлагается использование схемы из двух регуляторов, где первый синтезируется на основе пассивации системы, а второй – на основе локальной линеаризации частичной обратной связью [3]. Альтернативный подход представлен в [4], где глобальная асимптотическая устойчивость верхнего положения маятника обеспечивается одним непрерывным законом управления по обратной связи. Надо отметить, что при таком подходе будет затруднена экспериментальная реализация регулятора, так как здесь не учитывается ограничение на величину управляющих моментов. В [5] рассматривается задача стабилизации маятника по выходу. В [6] представлена модификация подхода [5] с учетом накладываемых ограничений на величину управления. В [7] рассматривается регулятор, обеспечивающий стабилизацию перевернутого положения при максимальном начальном отклонении. В [8] делается попытка разработки регулятора для параметрически неопределенной системы, однако предлагаемый здесь подход требует проведения предварительной идентификационной процедуры.

По мнению авторов, подобная задача не решалась ранее методами адаптивного управления. Адаптивный подход имеет очевидные перспективы, особенно если требуется практическое применение алгоритмов, например, в задачах робототехники, где разработчик зачастую сталкивается с неполнотой информации об объекте и переменной средой функционирования. Таким образом, данная работа является обобщением предыдущих результатов с усилением теоретической постановки задачи, которая решена в условиях полной параметрической неопределенности объекта.

**Постановка задачи. Математическая модель объекта управления**

Маятник с инерционным колесом является примером неполноприводной маятниковой системы с одной неуправляемой степенью свободы. Неполноприводные механические системы – это системы, в которых число управлений меньше числа переменных состояния (обобщенных степеней свободы). Сложность управления подобными системами обусловлена их преимущественно нелинейной динамикой. Прямая линеаризация в этом случае нереализуема, соответственно применение классических методов управления затруднено.

Рассматриваемая маятниковая система схематично изображена на рис. 1. Она представляет собой однозвенный свободно закрепленный в точке подвеса плоский маятник с установленным на нем инерционным колесом. Управление колебаниями осуществляется за счет ускоренного вращения инерционного колеса в разных направлениях.

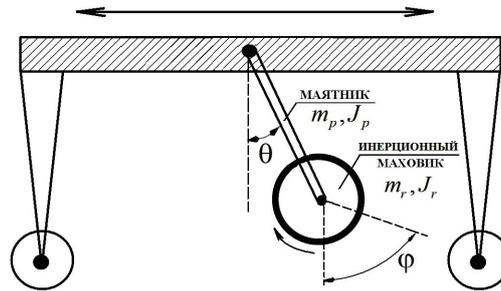


Рис. 1. Схематичное представление маятника Шмидта на подвижном основании

Модель объекта управления без учета динамики платформы была получена с использованием метода Лагранжа и может быть описана системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} p_1 \ddot{\theta}(t) + p_2 \ddot{\varphi}(t) + p_3 \sin \theta(t) = 0, \\ p_2 \ddot{\theta}(t) + p_2 \ddot{\varphi}(t) = u(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол поворота маятника;  $\varphi$  – абсолютный угол поворота инерционного колеса;  $p_1, p_2, p_3$  – неизвестные параметры, зависящие от физических характеристик системы;  $u$  – управление.

Целью управления является стабилизация маятника в перевернутом положении из произвольного начального состояния в условиях параметрической и функциональной неопределенностей и при ограниченном управлении. Функциональная неопределенность может здесь быть интерпретирована как наличие неучтенной динамики нестационарного основания.

Здесь надо отметить, что за основу при синтезе регуляторов будет взята гибридная схема с переключением между раскачивающим и стабилизирующим алгоритмами. Такая постановка обусловлена необходимостью соблюдения малости управляющего момента.

### Идентификация неизвестных параметров

Первоначально для выполнения параметризации исходной системы (1) введем в рассмотрение вспомогательные фильтры второго порядка  $H_f(p) = \frac{k}{(p + \lambda)^2}$ , где  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования;  $k > 0, \lambda > 0$  – параметры фильтра. Дополнительно введем новую функцию  $\vartheta = \sin(\theta)$ . Таким образом, после соответствующих преобразований можно переписать модель системы в регрессионной форме:

$$\begin{cases} y_1 = \Omega_1^T \varphi, \\ y_2 = \Omega_2^T \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где  $y_1 = \ddot{\theta}_f, y_2 = \ddot{\varphi}_f, \Omega_1^T = \begin{bmatrix} -1 & -p_3 \\ p_1 - p_2 & p_1 - p_2 \end{bmatrix}$  и  $\Omega_2^T = \begin{bmatrix} p_1 & p_3 \\ p_2(p_1 - p_2) & p_1 - p_2 \end{bmatrix}$  – векторы неизвестных параметров;  $\varphi^T = [u_f \quad \vartheta_f]$  – регрессор;  $\theta_f = H_f(p)\theta, \varphi_f = H_f(p)\varphi, u_f = H_f(p)u, \vartheta_f = H_f(p)\vartheta$  – соответствующие выходные сигналы фильтров.

Для дальнейшего использования в экспериментах на мехатронном комплексе для идентификации неизвестных параметров объекта был предложен рекуррентный алгоритм на основе наименьших квадратов. Этот алгоритм может использоваться в дискретных системах, т.е. менее чувствителен к периоду дискретизации чем, например, метод скоростного градиента, а реализация на цифровом оборудовании всегда сопряжена с проявлением процессов квантования сигналов по времени.

Введем следующие массивы данных:

$$Y_1 = [y_1(1) \quad y_1(2) \quad \dots \quad y_1(N)]^T,$$

$$Y_2 = [y_2(1) \quad y_2(2) \quad \dots \quad y_2(N)]^T,$$

$$\Phi = [\varphi(1) \quad \varphi(2) \quad \dots \quad \varphi(N)]^T,$$

где  $N$  – число последовательных измерений,  $y_1(i)$ ,  $y_2(i)$ ,  $\varphi(i)$  при  $i = \overline{1:N}$  – значения соответствующих величин на каждой итерации. Тогда схема идентификации имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{\Omega}_1 = (\Phi \Phi^T)^{-1} \Phi Y_1, \\ \hat{\Omega}_2 = (\Phi \Phi^T)^{-1} \Phi Y_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\hat{\Omega}_1, \hat{\Omega}_2$  – векторы оценок неизвестных параметров.

**Замечание 1:** Алгоритм идентификации (3) при увеличении числа итераций  $N$  обеспечивает сходимость оценок параметров к истинным значениям, если матрица  $\Phi \Phi^T$  не вырождена.

Реализуемый алгоритм идентификации для системы (2) описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\Omega}_j(t) = \hat{\Omega}_j(t-1) + K(t)(y_j(t) - \varphi^T(t)\hat{\Omega}_j(t-1)), \\ K(t) = P(t-1)\varphi(t) / (1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)), \\ P(t) = (I_2 - K(t)\varphi^T(t))P(t-1), \end{cases} \quad (4)$$

где  $j = 1, 2$ ,  $I_2 - 2 \times 2$  – единичная матрица. После некоторых преобразований получаем выражения для прямого вычисления неизвестных параметров объекта:

$$\hat{P}_1 = -\frac{\hat{\Omega}_2^{(11)}}{\hat{\Omega}_1^{(11)}(\hat{\Omega}_1^{(11)} + \hat{\Omega}_2^{(11)})}, \hat{P}_2 = \frac{1}{\hat{\Omega}_1^{(21)} + \hat{\Omega}_2^{(11)}}, \hat{P}_3 = \frac{\hat{\Omega}_1^{(21)}}{\hat{\Omega}_1^{(11)}}, \quad (5)$$

где через  $\hat{\Omega}_{i,j}^{(ij)}$ ,  $i, j = \overline{1,2}$  обозначены соответствующие элементы матриц неизвестных параметров.

### Раскачивающий алгоритм

Особенностью данной работы является то, что в систему дополнительно вносится неучтенная динамика в виде нестационарности платформы, на которой закреплен маятник. Это требует некоторой модификации раскачивающего алгоритма по сравнению с известными результатами [8]. С другой стороны, это иллюстрирует преимущества адаптивного подхода.

Для синтеза раскачивающего алгоритма был использован метод скоростного градиента [9] с энергетической целевой функцией. В работе [8] показано, что для рассматриваемой маятниковой системы в целевую функцию целесообразно вводить не гамильтониан системы, а только часть энергии, характеризующую движение непосредственно звена маятника. Тогда уравнение целевой функции выглядит следующим образом:

$$Q(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \Delta E^2, \quad (6)$$

где  $\Delta E = E(t, \theta, \dot{\theta}) - E^*(t)$ ,  $E(t, \theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2}(p_1 - p_2)\dot{\theta}^2 + p_3(1 - \cos \theta)$  – текущая частичная энергия системы,

$E^*(t) = E_0(1 + \mu \int_0^t 1(\tau) d\tau)$  – желаемый уровень энергии, причем  $E_0$  соответствует потенциальной энергии

неподвижного маятника в верхней точке траектории, а  $\mu \int_0^t 1(\tau) d\tau$  – некоторая настраиваемая функция,

увеличивающая значение желаемой энергии системы для компенсации движения основания,  $\mu > 0$ .

**Замечание 2:** Необходимо отметить, что задача раскачки маятника на нестационарном основании имеет смысл только тогда, когда платформа обладает значительно большей инерционностью по сравнению с самим маятником.

Релейный регулятор, полученный из конечной формы алгоритма скоростного градиента, определяется выражением:

$$u = -\gamma \text{sign} \nabla_u \omega(t, \theta, \dot{\theta}), \quad (7)$$

где  $\gamma > 0$ ,  $\omega(t, \theta, \dot{\theta}) = \frac{\partial Q}{\partial t}$ .

**Замечание 3:** Выбор релейного регулятора обусловлен стремлением обеспечить сходимость оценок параметров в замкнутом контуре. В этом случае управляющий сигнал, входящий в вектор регрессора (2), представляет собой меандр, т.е. частотно богатый сигнал. Таким образом, может быть выполнено условие неисчезающего гармонического возбуждения для алгоритма (3).

Подставляя (6) в (7), получаем выражение для реализуемого раскачивающего алгоритма:

$$u(t) = \gamma \operatorname{sign}\left(\frac{1}{2}(\hat{p}_1 - \hat{p}_2)\hat{\theta}(t)^2 - \hat{p}_3(1 + \cos \theta(t) + 2\mu)\hat{\theta}(t)\right), \quad (8)$$

где  $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3$  – оценки неизвестных параметров из (4)–(5),  $\hat{\theta}$  – оценка скорости вращения маятника.

### Стабилизирующий алгоритм

В малой окрестности перевернутого положения при  $\theta^* = \pi$  приблизительно выполняется соотношение  $\sin \theta \approx (\pi - \theta) \bmod 2\pi$ . Тогда мы можем получить локально линеаризованную модель исходной системы (1) в форме вход–состояние–выход:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{p_3}{p_1 - p_2}x_1 - \frac{1}{p_1 - p_2}u, \\ \dot{x}_3 = \frac{p_3}{p_1 - p_2}x_1 + \frac{p_1}{p_2(p_1 - p_2)}u, \end{cases} \quad (9)$$

где  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$ ,  $x_3 = \hat{\phi}$ .

Для увеличения быстродействия стабилизирующего регулятора в качестве такового был выбран пропорционально-дифференциальный регулятор:

$$u(t) = -k_1x_1 - k_2x_2 - k_3x_3. \quad (10)$$

Для расчета коэффициентов регулятора был выбран метод модального управления на основе стандартных характеристических полиномов. Характеристический полином замкнутой системы имеет вид

$D(s) = s^3 + \frac{k_3p_1 - k_2p_2}{p_2(p_1 - p_2)}s^2 + \frac{p_3 - k_1}{(p_1 - p_2)}s + \frac{k_3p_3}{p_2(p_1 - p_2)}$ , где  $s$  – оператор Лапласа. Тогда коэффициенты реализуемого стабилизирующего регулятора могут быть определены из следующих соотношений:

$$k_1 = \hat{p}_3 - A_2w_0^2(\hat{p}_1 - \hat{p}_2), k_2 = w_0(\hat{p}_1 - \hat{p}_2)\left(\frac{\hat{p}_1}{\hat{p}_3}w_0^2 - A_1\right), k_3 = \frac{w_0^3\hat{p}_2(\hat{p}_1 - \hat{p}_2)}{\hat{p}_3}, \quad (9)$$

где  $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3$  – оценки неизвестных параметров из (4)–(5),  $w_0, A_1, A_2 > 0$  – параметры стандартного полинома  $D^*(s) = s^3 + A_1w_0s^2 + A_2w_0^2s + w_0^3$ , выбираемые определенным образом в зависимости от требуемых показателей качества переходного процесса.

### Схема переключения алгоритмов

Условия коммутации раскачивающего и стабилизирующего алгоритмов обоснованы в [1]. Здесь остановимся только на кратком описании схемы организации переключения. Закон управления в гибридной системе управления может быть описан следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t), & \text{if } |\theta - \pi| \leq \theta_s, \\ u_2(t), & \text{if } |\theta - \pi| > \theta_s, \end{cases}$$

где  $u_1(t)$  – алгоритм стабилизации (9),  $u_2(t)$  – раскачивающий алгоритм (8),  $\theta_s = \frac{\pi}{6}$  – угол переключения управлений, определяющий сектор работы стабилизирующего регулятора.

### Результаты экспериментальной реализации

Для экспериментальной проверки эффективности полученных алгоритмов был использован мехатронный маятниковый комплекс Mechatronic Control Kit фирмы Mechatronics Systems Inc., находящийся в распоряжении кафедры систем управления и информатики СПбГУ ИТМО. Подробное описание комплекса дано в [1], внешний вид установки представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты аппаратно-программной реализации синтезированных алгоритмов, иллюстрирующие эффективность предложенного подхода в решении поставленной задачи.

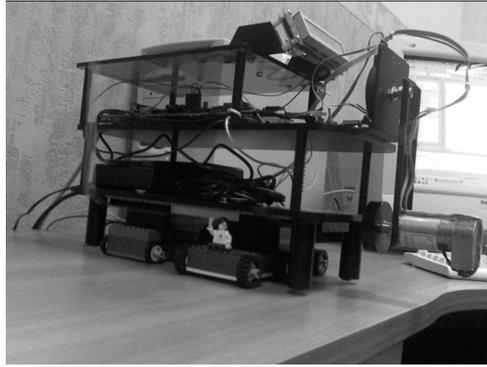


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной маятниковой установки

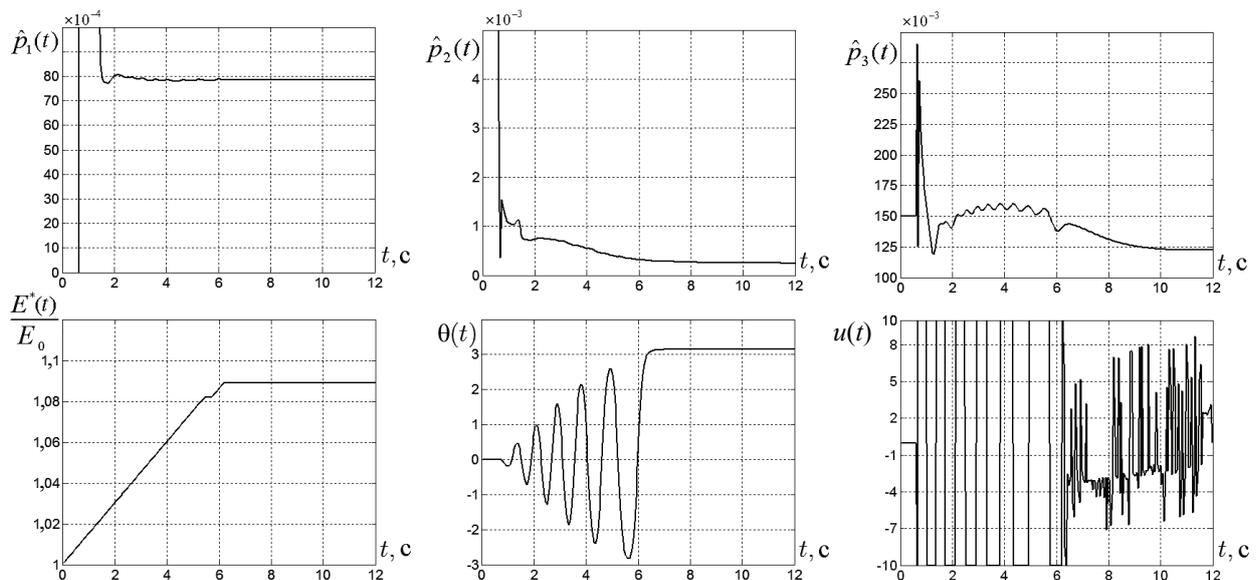


Рис. 3. Переходные процессы в реальной системе при  $k = 2, \lambda = 5, \mu = 0,015, \gamma = 1,5, A_1 = 2,05, A_2 = 2,39, \omega_0 = 0,05$

### Заключение

В результате была разработана адаптивная гибридная система управления, реализующая раскочку и стабилизацию положения неустойчивого равновесия маятника Шмидта в условиях параметрической неопределенности и при наличии в системе неучтенной динамики. В отличие от известных аналогов, полученные алгоритмы не требуют предварительных идентификационных процедур и обеспечивают настройку параметров регуляторов в процессе работы.

Работа поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П127 от 13 апреля 2010г.).

### Литература

1. Astrom K.J., Block D.J., Mark W. Spong The Reaction Wheel Pendulum. Synthesis Lectures on Controls and Mechatronics // Morgan and Claypool Publishers. – 2007. – 105 p.
2. Spong M., Corke P. and R. Lozano. Nonlinear control of the reaction wheel pendulum // Automatica. – 2001. – V. 37. – P. 1845–1851.
3. Spong M. Partial feedback linearization of underactuated mechanical systems, in Proc. Intern. Conf. Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany. – 1994. – P. 314–321.
4. Olfati-Saber R. Global stabilization of a flat underactuated system: the inertia wheel pendulum, in Proc. 40th Conf. Decision and Control, Orlando, USA. – 2001. – P. 3764–3765.
5. Ortega R., Spong M., Gomez-Estern F. and G. Blankenstein. Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and damping assignment // IEEE Trans. Autom. Control. – 2002. – V. 47. – P. 1218–1233.

6. Santibanez V., Kelly R. and J. Sandoval. Control of the inertia wheel pendulum by bounded torques, in Proc. 44th Conf. Decision and Control and the European Control Conf., Seville, Spain. – 2005. – P. 8266–8270.
7. Гришин А.А., Ленский А.В., Охоцимский Д.Е. и др. О синтезе управления неустойчивым объектом. Перевернутый маятник // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 5. – С. 14–24.
8. Андриевский Б.Р. Стабилизация перевернутого маятника с инерционным маховиком в качестве движителя. Управление в физико-технических системах / Под ред. А.Л. Фрадкова. – СПб: Наука, 2004. – С. 52–71.
9. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000. – 549 с.

**Колубин Сергей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ksa\_tau@mail.ru

**Пыркин Антон Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.pyrkin@gmail.com

УДК 681.5.11

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ АЛТАЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА ТИ-3.12

В.А. Толмачев, М.В. Никитина, М.Е. Сергеева

Предложена методика синтеза системы управления силового следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства большого телескопа ТИ-3.12 Алтайского оптико-лазерного центра.

**Ключевые слова:** трехмассовая модель механизма, следящий электропривод, частота механического резонанса.

### Введение

Объектом исследования в данной работе является система управления следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) большого телескопа ТИ-3.12 Алтайского оптико-лазерного центра.

Конструктивные особенности ОПУ азимутальной оси описаны в работе [1]. Азимутальная ось представляет собой многомассовую конструкцию с общей массой 55 т. Типовые требования к статическим и динамическим характеристикам следящих электроприводов современных комплексов, описание типовой функциональной схемы следящего электропривода оси ОПУ на основе трехфазного вентильного двигателя и назначение ее основных узлов приведены в работах [2, 3].

При синтезе системы управления рекомендовано в качестве расчетной использовать четырехконтурную систему регулирования угла поворота с трехмассовой моделью механизма [1], структурная схема которой представлена на рис. 1. Система управления содержит основной контур регулирования положения и подчиненные ему контуры регулирования скорости и электромагнитного момента двигателя.

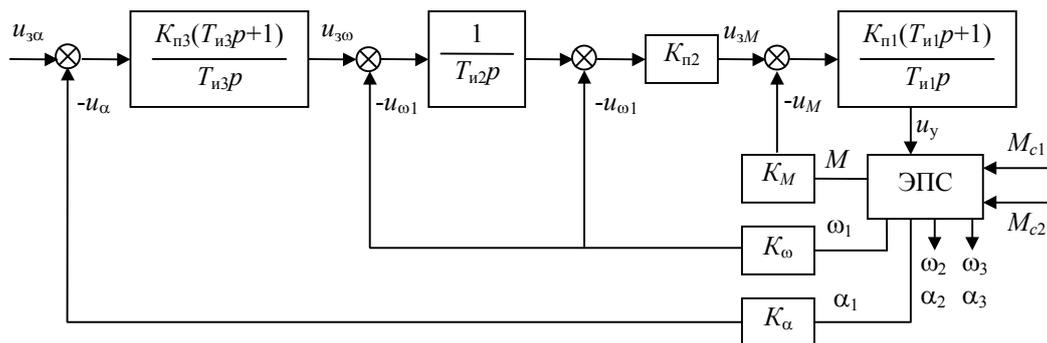


Рис. 1. Структурная схема четырехконтурной системы

Основной контур – контур регулирования угла – содержит ПИ-регулятор угла с коэффициентом передачи  $K_{п3}$  и постоянной времени интегрирования  $T_{и3}$ , на входе которого сравнивается напряжение  $u_{3\alpha}$ , пропорциональное заданному значению угла поворота входного конца исполнительный оси ОПУ, с напряжением  $u_\alpha$  датчика угла с коэффициентом передачи  $K_\alpha$ . Выходной сигнал регулятора  $u_{3\omega}$  является напряжением задания для внешнего контура регулирования скорости первой массы  $\omega_1$ .

Первый внешний контур регулирования скорости содержит И-регулятор с постоянной времени интегрирования  $T_{и2}$ , на входе которого напряжение  $u_{3\omega}$ , пропорциональное заданному значению скорости

входного конца исполнительской оси ОПУ, сравнивается с напряжением  $u_\omega$ , поставляемым датчиком скорости с коэффициентом передачи  $K_\omega$ . Выходной сигнал И-регулятора представляет напряжение задания для внутреннего контура скорости, содержащего П-регулятор с коэффициентом передачи  $K_{п2}$ . Такое построение скоростной подсистемы при настройке каждого из контуров на «технический оптимум» позволяет снизить перерегулирование при реакции на скачок сигнала задания до 4,3% относительно перерегулирования в одноконтурной скоростной подсистеме (43%) с ПИ-регулятором скорости и настройке на «симметричный оптимум» [4].

Выходной сигнал  $u_{3М}$  регулятора скорости внутреннего контура является сигналом задания для контура регулирования электромагнитного момента двигателя, содержащего ПИ-регулятор момента с коэффициентом передачи  $K_{п1}$  и постоянной  $T_{п1}$ . На входе регулятора сигнал  $u_{3М}$  сравнивается с сигналом  $u_M$  датчика момента с коэффициентом передачи  $K_M$ . Выходной сигнал  $u_y$  регулятора момента поступает на вход управляющего преобразователя электрической энергии энергетической подсистемы (ЭПС).

Цель исследования, проводимого в данной работе – разработка методики синтеза четырехконтурной системы регулирования угла поворота с трехмассовой моделью механизма.

### Математическая модель и обобщенная структурная схема ЭПС

В соответствии с [4, 5] процессы в ЭПС, содержащей трехфазный синхронный электромеханический преобразователь, транзисторный инвертор и трехмассовую модель механизма исполнительской оси можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} T_{пр}\dot{\omega}_0 = K_{пр}U_y - \omega_0 \\ T_3\dot{M} = \beta(\omega_0 - \omega_1) - M \\ J_1\dot{\omega}_1 = M - M_{c1} - M_{12} - M_{13} \\ \dot{\alpha}_1 = \omega_1 \\ \dot{M}_{12} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2) \\ J_2\dot{\omega}_2 = M_{12} - M_{c2} \\ \dot{\alpha}_2 = \omega_2 \\ \dot{M}_{13} = C_{13}(\omega_1 - \omega_3) \\ J_3\dot{\omega}_3 = M_{13} \\ \dot{\alpha}_3 = \omega_3 \end{cases} \quad (1)$$

где  $K_{пр} = K_{ШИП}/C'_e$  – статический коэффициент передачи обобщенного управляемого преобразователя электрической энергии с выходом в виде скорости холостого хода обобщенного двигателя  $\omega_0$ ;  $T_{пр}$  – зависит от вида широтно-импульсной модуляции и периода коммутации ключей  $T$  трехфазного инвертора;  $C'_e$  – приведенная конструктивная постоянная по ЭДС вращения;  $\beta$  – жесткость линеаризованной механической характеристики вентильного двигателя;  $T_3$  – электрическая постоянная времени фазной обмотки двигателя;  $K_{ШИП}$  – статический коэффициент передачи усилительно-преобразовательного устройства с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения в линейной зоне его регулировочной характеристики,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловая скорость первой, второй и третьей масс;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – угол поворота первой второй и третьей масс;  $M_{12}$  и  $M_{13}$  – моменты упругих связей;  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $C_{12}$  и  $C_{13}$  – коэффициенты упругих связей;  $J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции;  $M_{c1}$  и  $M_{c2}$  – моменты нагрузок на опорах оси.

Системе уравнений (1) можно поставить в соответствие обобщенную структурную схему ЭПС, представленную на рис. 2.

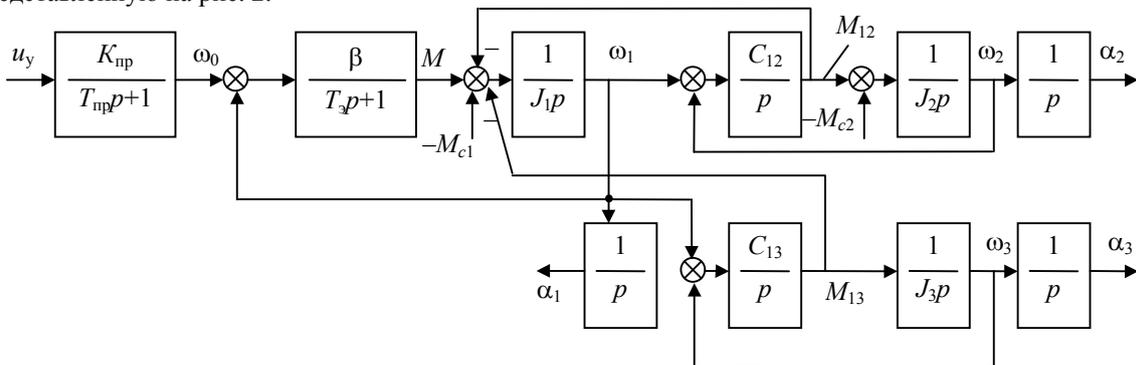


Рис. 2. Обобщенная структурная схема ЭПС

### Синтез и моделирование системы управления

В работе [6] предложена методика синтеза системы управления электропривода с четырехконтурной структурой и двухмассовой моделью механизма оси. Основу методики синтеза составляет определение частоты механического резонанса и коэффициента соотношения масс, устанавливающие предельную полосу пропускания скоростной подсистемы электропривода. В работе [7] для случая многомассового механизма оси предложено при синтезе скоростного контура ориентироваться на самую низкую из резонансных частот, которую, как правило, приходится определять экспериментально.

Для рассматриваемого случая трехмассового механизма со структурой (рис. 2) резонансные частоты могут быть получены расчетным путем.

$$\text{Для трехмассовой модели матрица } A = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_1 & 0 & -1/J_1 & 0 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & 0 & 0 & 0 & -C_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_3 & 0 \end{bmatrix}, \text{ тогда характеристическое уравнение примет вид}$$

$$p(p^4 + bp^2 + c) = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } b = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{13}J_2(J_1 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad c = \frac{C_{12}C_{13}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}.$$

Решая (2), получим соотношения, определяющие угловые частоты механического резонанса:

$$\omega_{p1} = \sqrt{\left(1 - \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right) \frac{b}{2}}, \quad \omega_{p2} = \sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right) \frac{b}{2}} \quad (3, a)$$

или

$$f_{p1} = \omega_{p1}/(2\pi), \quad f_{p2} = \omega_{p2}/(2\pi). \quad (3, б)$$

Оптимизация внутреннего контура регулирования момента осуществляется из условия обеспечения апериодического переходного процесса с заданной постоянной времени  $T_T$  на основе соотношений

$$T_{и1} = T_3, \quad K_{п1} = T_3 / (\beta K_{шипп} K_M T_T). \quad (4)$$

Величина постоянной времени замкнутого контура регулирования момента  $T_T$  определяется периодом коммутации силовых ключей инвертора, формирующего фазные напряжения двигателя, и ограничивается на уровне  $T_1 = 2T$  [6].

Настройка внутреннего контура регулирования скорости на технический оптимум осуществляется из условия реализации полосы пропускания частот  $2 \cdot \omega_0^*$ , связанной с резонансной угловой частотой  $\omega_{p0}$  соотношением [7]

$$\omega_0^* < \omega_{p0} / \sqrt[4]{\gamma^3},$$

где  $\gamma = (J_1 + J_2 + J_3) / (J_1 + J_2)$  – коэффициент соотношения масс, а  $\omega_{p0}$  – наименьшая из угловых частот механического резонанса, определяемая по (3).

Настройка на технический оптимум внешнего и внутреннего контуров регулирования скорости достигается выбором параметров И- и П-регуляторов на основе соотношений

$$K_{п2} = (J_1 + J_2 + J_3) K_M / (2T_{T1} K_\omega), \quad T_{и2} = 4T_{T1}, \quad (5)$$

где  $T_{T1} = 1 / (2 \cdot \omega_0^*)$ . При этом полоса пропускания внешнего контура равна  $\omega_0^*$ , а расчетное время реакции на скачок задающего воздействия –  $6 / \omega_0^*$ .

Настройка контура регулирования угла на симметричный оптимум обеспечивается при выборе параметров регулятора угла на основе соотношений

$$K_{п3} = K_\omega / (8T_{T1} K_\alpha), \quad T_{и3} = 16T_{T1}. \quad (6)$$

При этом расчетное время реакции углового контура на задающие воздействия определяется величиной  $48T_{T1}$  или  $24 / \omega_0^*$ , а полоса пропускания частот –  $\omega_0^* / 4$ .

Соотношения (3)–(6) составляют основу методики синтеза системы управления рассматриваемой структуры с заданными ее параметрами  $K_{пр}$ ,  $T_{пр}$ ,  $T$ ,  $T_3$ ,  $\beta$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $K_M$ ,  $K_\omega$ ,  $K_\alpha$ .

Поставим перед собой задачу определения резонансных частот ЭПС с параметрами  $C_{12} = 1,35 \cdot 10^9$  Нм/рад,  $C_{13} = 8,62 \cdot 10^8$  Нм/рад,  $J_1 = 2120$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_2 = 4480$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_3 = 197300$  кг·м<sup>2</sup>. Согласно (3),  $\omega_{p1} = 318,6$  рад/с,  $\omega_{p2} = 1117$  рад/с,  $f_{p1} = 51$  Гц,  $f_{p2} = 178$  Гц.

На рис. 3 приведены результаты численного спектрального анализа контура регулирования момента. Как видно, резонансные частоты составляют 51 и 178 Гц, что совпадает с расчетными частотами, полученными по формулам (3) и подтверждает корректность полученных соотношений.

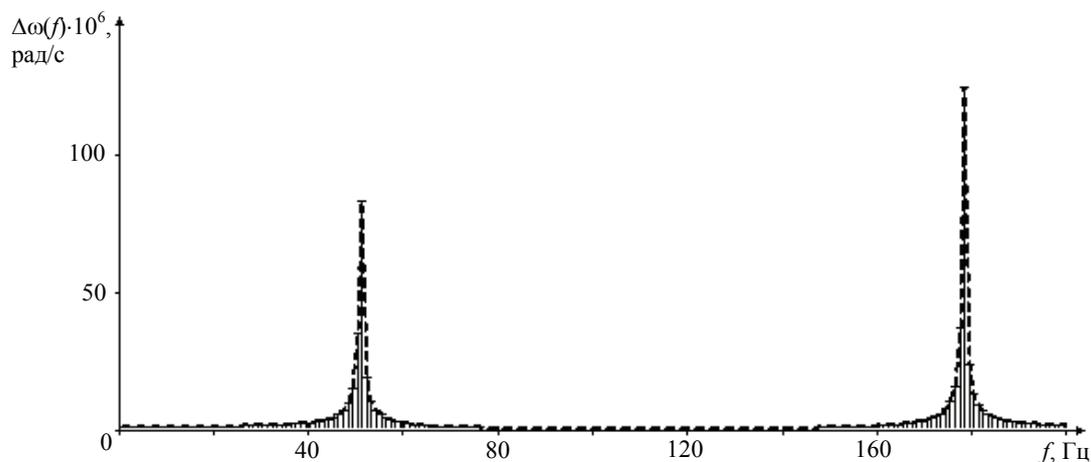


Рис. 3. Спектр контура регулирования момента

Синтезируем скоростную подсистему с параметрами приведенными выше и  $K_{пр}=0,0262$ ,  $T_{пр}=0,2$  мс,  $T=0,1$  мс,  $T_3=1,6$  мс,  $\beta=2,9 \cdot 10^4$ ,  $K_M=1,34 \cdot 10^{-4}$  В/Нм,  $K_\omega=38,1$  В·с/рад,  $K_\alpha=6,366$  В/рад. Согласно (4)–(6) параметры регуляторов –  $T_{п1}=1,6$  мс,  $K_{п1}=3,929$ ,  $T_{п2}=82$  мс,  $K_{п2}=174,346$ ,  $T_{п3}=0,328$  с,  $K_{п3}=36,375$ .

На рис. 4 представлены результаты моделирования реакции системы на линейно возрастающее задающее воздействие, где кривая 1 – электромагнитный момент двигателя в масштабе 1:100000; кривая 2 – угловые скорости первой, второй и третьей масс; кривая 3 – углы поворота первой, второй и третьей масс; кривая 4 – эталонная характеристика угла; 5 – угол задания.

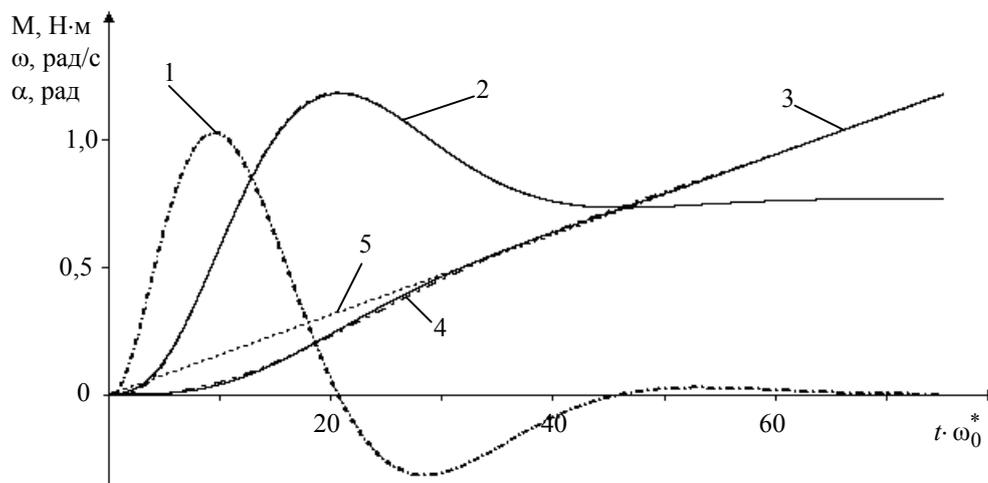


Рис. 4. Результаты моделирования синтезируемой системы

Как видно из рис. 4 кривая 3 практически совпадает с эталонной кривой 4, время реакции системы соответствует расчетному ( $48/\omega_0^*$ ), т.е. переходные характеристики синтезируемой системы соответствуют переходным характеристикам системы, настроенной на симметричный оптимум, что подтверждает корректность настроек регуляторов и предложенной методики синтеза.

### Заключение

В работе предложена математическая модель системы управления следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства телескопа ТИ-3.12 и методика синтеза регуляторов контуров регулирования момента, скорости и угла поворота при заданных параметрах ЭПС с трехмассовой моделью механизма исполнительный оси. Результаты моделирования переходных процессов синтезируемой системы с использованием расчетных соотношений, полученных в работе, в средах MathCad и MathLab совпадают с высокой точностью, что подтверждает корректность предложенной методики.

Полученные расчетные соотношения, определяющие частоты механического резонанса рассматриваемой системы, позволяют при синтезе избежать процедуры численного спектрального анализа.

Математическая модель ЭПС и методика синтеза могут быть использованы при исследовании различных режимов работы следящего электропривода азимутальной оси опорно-поворотного устройства телескопа ТИ-3.12, а также при проектировании и исследовании режимов работы структур с трехмассовыми моделями механизма.

### Литература

1. Исупов А.Н., Исупов К.С., Храмов С.Н. Определение амплитудно-частотных характеристик альт-азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 38–44.
2. Томасов В.С., Денисов К.М., Толмачев В.А. Следящие электроприводы систем наведения оптико-механических комплексов нового поколения. Проблемы и достижения // Труды V Междунар. (XVI Всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. 18–21 сентября 2007. – СПб, 2007. – С. 175–177.
3. Васильев В.Н., Томасов В.С., Шаргородский В.Д., Садовников М.А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 5–12.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентельные электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1997.
6. Толмачев В.А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 68–72.
7. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

*Толмачев Валерий Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, va-tolmachev@mail.ru

*Никитина Мария Владимировна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nikitina@ets.ifmo.ru

*Сергеева Мария Евгеньевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, sergeeva.maria@mail.ru

УДК 519.673

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ КВАНТОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

М.И. Гаврилов, И.Ю. Попов

Построена математическая модель системы связанных волноводов. С ее помощью появилась возможность численно получать зависимость коэффициентов прохождения от геометрических и энергетических параметров системы.

**Ключевые слова:** квантовая механика, связанные волноводы, численное моделирование.

### Введение

Принципиально новые возможности в построении вычислительных систем открывает перед нами квантовая механика, так как сложность квантовой системы возрастает экспоненциально относительно ее размера [1]. Проблема квантовых вычислений тесно связана со сложностью физической реализации. В настоящее время существует несколько возможных элементных баз для квантового компьютера: связанные ионы, ядерный магнитный резонанс в жидкости, квантовые точки и др. [2]. Каждая из них имеет свои преимущества, но и соответствующие недостатки. Идеальной для реализации базы пока не существует, поэтому актуальна проблема исследования и разработки наноустройств для квантовых вычислений.

Целью данной работы является исследование поведения плоских слабосвязанных наноструктур, как возможной основы для реализации квантовых элементов. В работе произведено построение математической модели системы связанных волноводов. С ее помощью появилась возможность численно получать зависимость коэффициентов прохождения от геометрических и энергетических параметров системы. Это позволяет подобрать необходимые характеристики для требуемого в конкретных задачах поведения системы. Кроме того, данную модель можно использовать для поиска стационарных состояний волновой функции для заданной системы.

Математическая модель

Для исследования возможности построения квантовых операций при «волноводной» [3, 4] интерпретации очень важно знание коэффициентов прохождения и отражения в системе при различных значениях ее параметров. Рассмотрим систему двух волноводов, связанных через отверстия, с условиями Дирихле на границе (рис. 1).

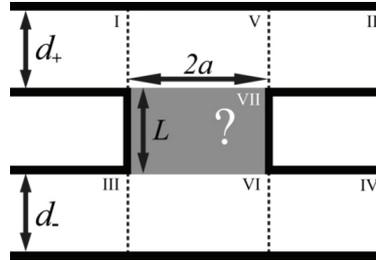


Рис. 1. Схема математической модели системы связанных волноводов

При этом допускается, что в области связи могут быть введены некоторые дополнительные условия, зависящие только от вертикальной координаты, например, потенциал, электрическое поле и др. Пусть ширины верхнего и нижнего волноводов равны  $d_+$  и  $d_-$  соответственно,  $b = 2a$  – ширина окна,  $L$  – высота области связи (если область связи отсутствует, то  $L = 0$ ). Положим также полную энергию электрона равной  $k^2$ .

В силу квантовых свойств системы поперечная составляющая волновой функции в волноводе ширины  $d$  может выступать только как суперпозиция квантованного набора состояний  $\sin\left(\frac{n\pi}{d}y\right)$ . Воспользовавшись этим свойством, зададим в первой граничной области волновую функцию в виде [5]:

$$\Psi_I = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{d_+}(y-L-d_-)\right) \left( a_n e^{ik_n^+ x} + b_n e^{-ik_n^+ x} \right),$$

где  $k_n^+ = \sqrt{k^2 - (n\pi/d_+)^2}$ . Соответствующие коэффициенты для волновых функций остальных трех граничных областей  $\Psi_{II}$ ,  $\Psi_{III}$  и  $\Psi_{IV}$  положим равными  $c_n$  и  $d_n$ ,  $g_n$  и  $h_n$ ,  $p_n$  и  $q_n$  соответственно.

В области взаимодействия положим волновую функцию в виде:

$$\Psi_{VII} = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{2a}x\right) \Phi(y, k'_n),$$

где  $k'_n = \sqrt{k^2 - (n\pi/2a)^2}$ . В областях, прилегающих к отверстию, представим ее в виде суммы продольной и поперечной составляющих

$$\Psi_V = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{d_+}(y-L-d_-)\right) \left( e_n e^{ik_n^+ x} + r_n e^{-ik_n^+ x} \right) + \sum_{i=1}^{\infty} t_n \sin\left(\frac{n\pi}{2a}x\right) \Phi^+(y, k'_n).$$

Аналогично вводим коэффициенты  $v_n$ ,  $u_n$  и  $w_n$  для волновой функции нижнего волновода в области VI. Совокупность функций  $\Phi(y, k'_n)$  и  $\Phi^\pm(y, k'_n)$  образуют базисный набор функций, по которым раскладывается  $y$ -составляющая в этих областях. Так, например, в отсутствии внешних полей они будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \Phi(y, k'_n) &= f_n e^{ik'_n y} + e_n e^{-ik'_n y}, \\ \Phi^+(y, k'_n) &= \sin(k'_n(y - d_+ - L - d_-)), \\ \Phi^-(y, k'_n) &= \sin(k'_n y). \end{aligned}$$

Будем также обозначать символами  $\phi(y, k'_n)$  и  $\phi^\pm(y, k'_n)$  производные по  $y$  соответствующих функций.

Проведем согласование разложения на границах областей по значениям и первым производным вдоль нормали:

$$\Psi_i = \Psi_j, \frac{\partial \Psi_i}{\partial n} = \frac{\partial \Psi_j}{\partial j}.$$

Уравнения, соответствующие «вертикальным» граничным условиям, умножаем на  $\sin\left(\frac{\pi n}{d_{\pm}} y\right)$  и интегрируем по длине границы. В силу ортогональности базиса синусов имеем:

$$\int_0^{d_{\pm}} \sin\left(\frac{n\pi}{d_{\pm}}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{d_{\pm}}\right) dy = \frac{\pi}{2} \delta_{mn}.$$

Введем так же обозначение  $A_{nm}^{\pm}$ :

$$A_{nm}^+ = \frac{m\pi}{bd_+k_n^+} \int_{L+d_-}^{L+d_-+d_+} \Phi^+(y, k_m) \sin\left(\frac{n\pi}{d_+}(y-L-d_-)\right) dy,$$

$$A_{nm}^- = \frac{m\pi}{bd_-k_n^-} \int_0^{d_-} \Phi^-(y, k_m) \sin\left(\frac{n\pi}{d_-} y\right) dy.$$

Таким образом, во введенной системе обозначений, получаем систему линейных уравнений. Решение дает значение выходных параметров  $b_m, c_m, h_m$  и  $p_m$  относительно входных  $a_m, d_m, g_m$  и  $q_m$ :

$$b_n = d_n + i \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm}^+ \left(1 - (-1)^m e^{ik_n^+ b}\right) t_n, \quad c_n = a_n + i \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm}^+ \left(1 - (-1)^m e^{-ik_n^+ b}\right) t_n,$$

$$h_n = q_n + i \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm}^- \left(1 - (-1)^m e^{ik_n^- b}\right) w_n, \quad p_n = g_n + i \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm}^- \left(1 - (-1)^m e^{-ik_n^- b}\right) w_n.$$

Сами значения  $t_n$  и  $w_n$  определяются из «горизонтальной» системы связи в районе окна:

$$\begin{cases} t_n \Phi^+(L+d_-, k'_n) = \Phi(L+d_-, k'_n), \\ w_n \Phi^-(d_-, k'_n) = \Phi(d_-, k'_n), \\ \varphi(L+d_-, k'_n) = i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^+ t_l + X_n + t_n \varphi^+(L+d_-, k'_n), \\ \varphi(d_-, k'_n) = i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^- w_l + Y_n + w_n \varphi^-(d_-, k'_n), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$C_{nl}^{\pm} = 2(1+(-1)^{n+l}) \sum_{m=1}^{\infty} B_{nm}^{\pm} A_{ml}^{\pm} (1-(-1)^n e^{ik_m^{\pm} b}),$$

$$B_{nm}^{\pm} = \frac{\pi^2 mn}{d_{\pm} ((n\pi)^2 - (bk_n^{\pm})^2)}, \quad X_n = \sum_{m=1}^{\infty} 2B_{nm}^+ (a_m (1-(-1)^n e^{ik_m^+ b}) + d_m (1-(-1)^n e^{-ik_m^+ b})),$$

$$Y_n = \sum_{m=1}^{\infty} 2(-1)^m B_{nm}^- (g_m (1-(-1)^n e^{ik_m^- b}) + d_m (1-(-1)^n e^{-ik_m^- b})).$$

Заметим также, что в случае  $L=0$  данная система преобразуется к более простому виду:

$$\begin{cases} t_n \Phi^+(d_-, k'_n) = w_n \Phi^-(d_-, k'_n), \\ i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^+ t_l + X_n + t_n \varphi^+(d_-, k'_n) = i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^- w_l + Y_n + w_n \varphi^-(d_-, k'_n). \end{cases}$$

Для численных вычислений бесконечные суммы ограничиваются некоторой константой  $N$ , в рамках которой и производятся вычисления. Матрица, соответствующая исходной системе уравнений, в силу большого размера имеет гораздо более плохую обусловленность, что негативно сказывается при численном решении. Плохая обусловленность вызвана волновыми функциями, соответствующими комплексным значениям энергии  $k_n^{\pm}$  и  $k'_n$ . Скорее всего, при аналитическом решении бесконечной системы, соответствующие коэффициенты системы должны обращаться в ноль.

Заметим, что после построения системы появляется возможность решения ряда задач.

Во-первых, появляется возможность решить задачу рассеяния. Для этого положим  $a_n = \delta_{n1}$ , а  $d_n$ ,  $g_n$  и  $q_n$  тождественно равными нулю. Решив систему и найдя выходные параметры  $b_n$ ,  $c_n$ ,  $h_n$  и  $p_n$ , коэффициенты прохождения определяются исходя из формул:

$$T_{12} = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} |c_n|^2 k_n^+ / k_1^+, \quad T_{11} = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} |b_n|^2 k_n^+ / k_1^+, \\ T_{14} = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} |p_n|^2 k_n^- / k_1^-, \quad T_{13} = \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} |h_n|^2 k_n^- / k_1^-.$$

Во-вторых, облегчается поиск связанных состояний. Для этого некоторый выбранный параметр (например,  $L$  или  $k$ ) варьируется в некоторых пределах для достижения нулевого значения определителя матрицы (1). В этом случае система при нулевых векторах начальных условий имеет ненулевое решение, которое и определяет соответствующую собственную функцию.

### Анализ системы без внешнего электрического поля

В случае отсутствия внешних полей в области окна, разумно рассматривать набор функций  $\Phi^\pm(y, k_n)$  как граничные составляющие собственных функций потенциальной ямы шириной  $(d_+ + L + d_-)$ :

$$\Phi^+(y, k_n) = \sin(k_n(y - d_+ - L - d_-)), \\ \Phi^-(y, k_n) = \sin(k_n y).$$

Соответствующие константы  $A_{nm}^\pm$ :

$$A_{nm}^+ = -\frac{mn\pi^2 \sin(k'_m d_+)}{bk_n^+ ((n\pi)^2 - (d_+ k'_m)^2)}, \\ A_{nm}^- = -(-1)^n \frac{mn\pi^2 \sin(k'_m d_-)}{bk_n^- ((n\pi)^2 - (d_- k'_m)^2)}.$$

Пусть, в секторе VII будет потенциальный барьер высотой  $V$ , тогда функция  $\Phi$  будет иметь вид:

$$\Phi(y, k'_n) = f_n e^{ik''_n y} + e_n e^{-ik''_n y}, \\ \phi(y, k'_n) = ik''_n (e^{ik''_n y} - e_n e^{-ik''_n y}),$$

$$\text{где } k''_n = \sqrt{(k'_n)^2 - V} = \sqrt{k_n^2 - (n\pi/b)^2 - V}.$$

Перепишем систему (1), используя выбранную систему функций:

$$\begin{cases} i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^+ t_l + X_n + k'_n t_n \cos(k'_n d_+) + k''_n \frac{\sin(k'_n d_-)}{\sin(k'_n L)} (t_n \cos(k''_n L) + w_n) = 0, \\ i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl}^- w_l + Y_n + k'_n w_n \cos(k'_n d_-) + k''_n \frac{\sin(k'_n d_-)}{\sin(k'_n L)} (t_n + w_n \cos(k''_n L)) = 0. \end{cases}$$

Пусть  $R_n = k'_n \cos(k'_n d_-) + k''_n (k'_n L) \sin(k'_n d_-)$ .

В случае  $d_+ = d_- = d$  (соответственно,  $C_{nl}^+ = C_{nl}^- = C_{nl}$ ) система допускает разделение переменных. Обозначим  $U_n = t_n + w_n$  и  $V_n = t_n - w_n$ , тогда:

$$\begin{cases} i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl} U_l + (X_n + Y_n) + R_n U_n + k''_n \frac{\sin(k'_n d)}{\sin(k'_n L)} U_n = 0, \\ i \sum_{l=1}^{\infty} C_{nl} V_l + (X_n - Y_n) + R_n V_n - k''_n \frac{\sin(k'_n d)}{\sin(k'_n L)} V_n = 0. \end{cases} \quad (2)$$

### Численное моделирование

Было проведено численное моделирование для случая отсутствия внешних полей (рис. 2). Даже в таком упрощенном случае в зоне взаимодействия, функции коэффициентов прохождения в зависимости от параметров системы являются сложными и мало предсказуемыми. Само моделирование происходило на основе решения системы (2).

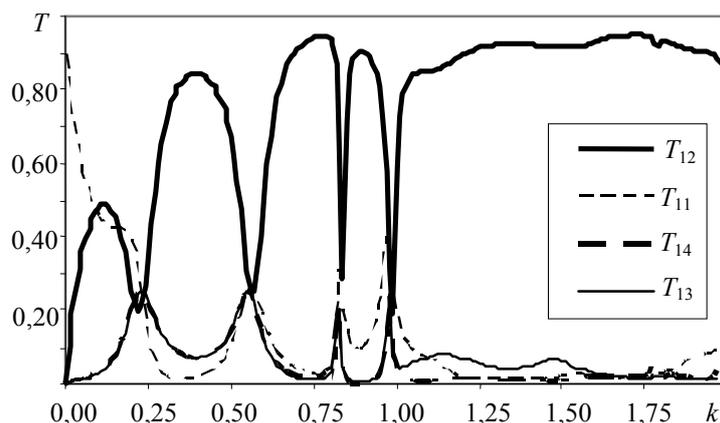


Рис. 2. Зависимость коэффициентов прохождения от энергии для системы с  $V = 0$ ,  $L = d = b$

Варьируя параметры системы, можно получить ярко выраженный резонанс (рис. 3). Данный результат хорошо согласуется с аналитическими результатами, полученными в [6, 7].

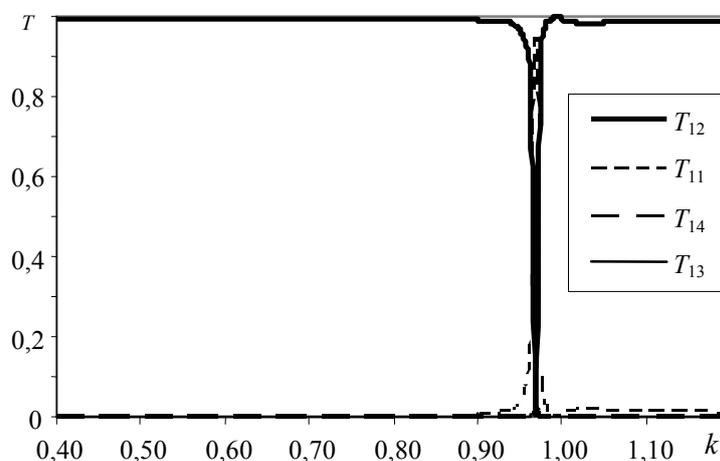


Рис. 3. Эффект полного отражения в системе с  $V = 2,8$ ,  $L = d$ ,  $b = 0,4d$

### Заключение

Произведено построение математической модели системы связанных волноводов. Ее использование позволяет существенно экономнее и быстрее по сравнению с другими вычислительными методами получать зависимость коэффициентов прохождения от геометрических и энергетических параметров системы. Это позволяет подобрать необходимые характеристики для требуемого в конкретных задачах поведения системы. В дальнейшем, данную модель планируется адаптировать для поиска стационарных состояний волновой функции системы.

### Литература

1. Фейнман Р. Моделирование физики на компьютерах // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. – Ижевск, 1999. – Т. 2. – 96 с.
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – М.: R&C Dynamics, 2001. – 358 с.
3. Gavrilov M.I., Gortinskaya L.V., Pestov A.A., Popov I.Yu., Tesovskaya E.S. Quantum Algorithms Implementation Using Quantum Wires System // Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics Information Photonics 2006, September 4–7. – SPb, Russia, 2006. – P. 327–329.
4. Popov I.Yu., Gortinskaya L.V., Gavrilov M.I., Pestov A.A., Tesovskaya E.S. Weakly coupled quantum wires and layers as an element of quantum computer // Письма в ЭЧАЯ. – 2007. – Т. 4. – № 2(138). – С. 237–243.

5. Abramowitz M., Stegun I.A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. – 10th edition. – New York: Dover Publications, 1972. – P. 1046.
6. Exner P. and P. Seba. Bound states in curved quantum waveguides // J. Math. Phys. – 1989. – V. 30. – № 11. – P. 2574–2580.
7. Gortinskaya L.V., Popov I.Yu., Tesovskaya E.S. // Proc. of Intern. Seminar @Day on Diffraction' 2003. – SPb, 2003. – P. 52.

*Гаврилов Максим Иванович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, maxim.gavrilov@gmail.com

*Попов Игорь Юрьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, popov@mail.ifmo.ru

УДК 621.391.172

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.Б. Торопов, В.А. Васильев

Описывается программный комплекс, позволяющий проводить анализ эффективности алгоритмов решения нелинейных задач при проектировании современных навигационных систем.

**Ключевые слова:** алгоритмы калмановского типа, фильтрация, навигация.

### Введение

До недавнего времени необходимость решения нелинейных задач фильтрации, связанных с навигационной тематикой, возникала лишь при построении систем для традиционных объектов, таких как морские суда, летательные и космические аппараты. В последнее время число объектов, для которых требуется решать такого рода задачи, существенно возрастает. Это обусловлено широким внедрением средств навигации в наземный, и, в первую очередь, в автомобильный транспорт [1]. Кроме того, навигационные системы востребованы и самим человеком, а также активно используются у различного вида роботов [2]. Важно отметить, что допущения, справедливые при решении традиционных навигационных задач, для таких объектов не всегда выполняются.

Для анализа эффективности линейных алгоритмов для навигационных систем широко используются различного рода универсальные программы, облегчающие процесс их создания. Существующие пакеты для нелинейного случая [3, 4] в основном ориентированы на проверку работоспособности алгоритмов, в то время как вопросам анализа точности не уделяется должного внимания. Кроме того, такие программы, по мнению авторов, не обладают удобным интерфейсом.

В работе приводится описание программного комплекса для анализа эффективности решения нелинейных навигационных задач. В частности, рассматривается постановка задачи фильтрации, решаемой в программном комплексе, описываются алгоритмы калмановского типа для решения нелинейных задач фильтрации, используемые в программном комплексе, и предлагается методика оценки их эффективности.

### Постановка задачи фильтрации, решаемой в программном комплексе

Задана  $n$ -мерная случайная последовательность

$$\mathbf{x}_i = \Phi_i \mathbf{x}_{i-1} + \Gamma_i \mathbf{w}_i, \quad (1)$$

и имеются  $m$ -мерные измерения

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{s}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{v}_i, \quad (2)$$

где  $\mathbf{w}_i$  – вектор порождающих шумов;  $\mathbf{v}_i$  – вектор ошибок измерения,  $\Phi_i$ ,  $\Gamma_i$  – известные матрицы;  $\mathbf{s}_i(\mathbf{x}_i) = [s_{i1}(\mathbf{x}_i), \dots, s_{im}(\mathbf{x}_i)]^T$  – известная нелинейная функция. Последовательности  $\mathbf{w}_i$  и  $\mathbf{v}_i$  представляют собой дискретные, центрированные белые шумы с известными законами распределения. Предполагается известным закон распределения вектора  $\mathbf{x}_0$ . Векторы  $\mathbf{x}_0$ ,  $\mathbf{w}_i$  и  $\mathbf{v}_i$  считаются некоррелированными между собой.

Требуется, располагая накопленными к текущему моменту времени  $i$  измерениями  $\mathbf{Y}_i = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_i^T]^T$ , найти рекуррентный алгоритм вычисления оптимальных в среднеквадратическом смысле оценок  $\hat{\mathbf{x}}_i(\mathbf{Y}_i)$  последовательности (1), минимизирующих критерий

$$J_i = M \left\{ (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i(\mathbf{Y}_i))^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i(\mathbf{Y}_i)) \right\} \quad (3)$$

и алгоритм вычисления характеристик точности в виде матриц ковариаций ошибок оценивания. В выражении (3)  $M$  – знак математического ожидания.

Как известно, решение поставленной задачи сводится к отысканию условного среднего с привлечением численных процедур, требующих большого объема вычислений [5]. Задача может быть существенно упрощена, если ввести ограничение на класс используемых оценок при минимизации (3). В рассматриваемых ниже алгоритмах калмановского типа (КТ) предполагается нахождение оценки  $\mathbf{x}_i(\mathbf{Y}_i)$  в классе линейных оптимальных несмещенных оценок.

### Алгоритмы калмановского типа, используемые в программном комплексе

Поясним, что понимается под алгоритмами КТ. Предположим, что имеется составной вектор  $\mathbf{z}^T = (\mathbf{x}^T, \mathbf{y}^T)$ ,  $\mathbf{y} = \mathbf{s}(\mathbf{x})$ , для которого определены математические ожидания  $\bar{\mathbf{x}}$ ,  $\bar{\mathbf{y}}$ , матрицы ковариаций  $\mathbf{P}_{xx}$ ,  $\mathbf{P}_{yy}$  и взаимная матрица ковариаций  $\mathbf{P}_{xy}$ . Под линейной оптимальной несмещенной оценкой будем понимать оценку следующего вида

$$\mathbf{x}(\mathbf{y}) = \bar{\mathbf{x}} + K(\mathbf{y} - \mathbf{y}^{lin}), \quad (4)$$

где  $K$  и  $\mathbf{y}^{lin}$  выбираются такими, чтобы обеспечить минимальное значение критерия  $J = M \left\{ (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{y}))^T (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{y})) \right\}$ . Алгоритмы, в которых оценка вычисляется в виде (4) будем называть алгоритмами КТ.

Известно [5], что при фиксированном известном значении вектора  $\mathbf{y}$  линейная оптимальная несмещенная оценка вектора  $\mathbf{x}$  и соответствующая ей матрица ковариаций  $\mathbf{P}$  определяются с помощью следующих соотношений:

$$\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{y}) = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}_{xy} \mathbf{P}_{yy}^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}), \quad \mathbf{P} = \mathbf{P}_{xx} - \mathbf{P}_{xy} \mathbf{P}_{yy}^{-1} \mathbf{P}_{yx}. \quad (5)$$

По своей сути алгоритмы КТ различаются процедурами вычисления коэффициента усиления  $K$  и первых двух моментов составного вектора  $\mathbf{z}$ , включающего оцениваемый вектор и вектор измерений.

В предлагаемом программном комплексе реализованы следующие алгоритмы КТ:

- обобщенный и итерационный фильтры Калмана [5, 6];
- линейный оптимальный алгоритм [5];
- Unscented Kalman Filter [7].

Обобщенный и итерационный фильтры Калмана являются одними из самых простых и удобных для реализации на практике алгоритмов. Они основаны на разложении нелинейной функции в ряд Тейлора с последующим использованием только первых двух членов ряда. Другими словами, такие алгоритмы используют локальную линеаризацию, т.е. при вычислении моментов вектора  $\mathbf{z}_i^T = (\mathbf{x}_i^T, \mathbf{y}_i^T)$  предполагается допустимость линеаризованного представления функции  $\mathbf{s}_i(\mathbf{x}_i)$ .

При получении линейного оптимального алгоритма предполагается, что решается задача отыскания линейных оптимальных несмещенных оценок последовательности (1) по измерениям  $\mathbf{Y}_i = \mathbf{S}_i(\mathbf{X}_i) + \mathbf{V}_i$ , где  $\mathbf{S}_i(\mathbf{X}_i) = [\mathbf{s}_1^T(\mathbf{x}_1), \mathbf{s}_2^T(\mathbf{x}_2), \dots, \mathbf{s}_i^T(\mathbf{x}_i)]^T$ ,  $\mathbf{X}_i = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_i^T]^T$ ,  $\mathbf{V}_i = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T, \dots, \mathbf{v}_i^T]^T$  – вектор шумов измерений с матрицей ковариаций  $\mathbf{P}_{V_i}$ . В этом случае задача сводится к отысканию первых двух моментов вектора  $\mathbf{z}_i^T = (\mathbf{X}_i^T, \mathbf{Y}_i^T)$  и последующему применению формул типа (5).

Идея построения алгоритмов типа Unscented Kalman Filter заключается в реализации линейного оптимального алгоритма по рекуррентной схеме, т.е. на каждом шаге отыскиваются моменты вектора  $\mathbf{z}_i = (\mathbf{x}_i^T, \mathbf{y}_i^T)^T$  с использованием информации об оценке и матрице ковариаций с предыдущего шага. При этом необходимо располагать аппроксимацией плотности прогноза, которая в общем случае неизвестна. В целях упрощения вместо нее используется гауссовская аппроксимация с параметрами, вычисленными на предыдущем шаге. Для снижения объема вычислений при реализации алгоритмов, построенных по такой структуре, в работе [7] предлагается для вычисления моментов вектора  $\mathbf{y}_i$  и взаимной ковариации  $\mathbf{P}_{x_i y_i}$  использовать приближенную численную процедуру, названную Unscented Transformation.

При исследовании возможностей алгоритмов КТ для решения различных прикладных задач возникает потребность оценки их эффективности. В нелинейных навигационных задачах основными показателями эффективности алгоритмов являются уровень достигаемой точности и необходимый объем вычис-

лений, причем если объем вычислений можно оценить путем сопоставления затраченного времени на моделирование, то вопросы анализа эффективности с точки зрения точности требуют специального рассмотрения.

### Методика оценки эффективности алгоритмов КТ

При исследовании точности рассматриваемых алгоритмов КТ необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, при построении этих алгоритмов решение отыскивается в классе линейных оценок вида (4), поэтому «эталоном» точности для исследуемых алгоритмов является точность байесовского оптимального алгоритма, обеспечивающего нахождение оценки, минимизирующей (3) без введения каких-либо ограничений [5]. Во-вторых, матрица ковариаций ошибок оценивания, рассчитываемая в алгоритмах КТ (называемая расчетной матрицей ковариаций), может отличаться от своего истинного значения – действительной матрицы ковариаций.

Заметим, что для реализации байесовского оптимального алгоритма необходимо выполнять большой объем моделирования. Эта процедура может быть значительно упрощена, если воспользоваться неравенством Рао–Крамера, которое позволяет найти нижнюю границу для матрицы ковариаций ошибок оптимального оценивания [5].

Таким образом, предлагаемая методика оценки эффективности предполагает:

- вычисление характеристики точности, соответствующей байесовскому алгоритму (под характеристикой точности понимается зависимость квадратных корней из диагональных элементов матрицы ковариаций от времени);
- вычисление расчетной и действительной характеристик точности, соответствующих алгоритмам КТ;
- вычисление характеристики точности, соответствующей нижней границе точности;
- сопоставление действительной характеристики точности, соответствующей алгоритмам КТ с характеристикой точности, соответствующей оптимальному алгоритму или нижней границе точности;
- сопоставление действительных и расчетных характеристик точности, соответствующих алгоритмам КТ.

### Программный комплекс

Общая структурная схема программного комплекса представлена на рис. 1.

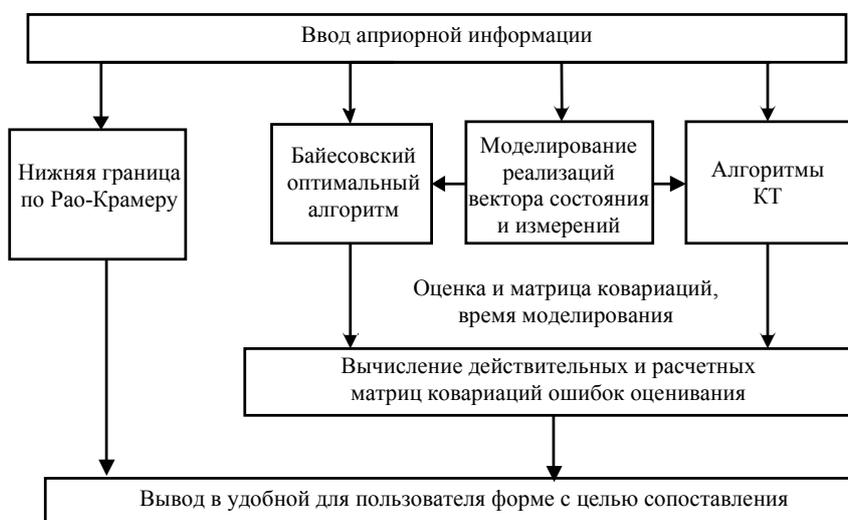


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса

Здесь приведены общие блоки, реализующие алгоритмы КТ и иллюстрирующие последовательность действий при реализации методики оценки эффективности, которая заключается в следующем. На основании априорной информации моделируются реализации оцениваемой последовательности (1) и измерений (2), которые являются входными данными для алгоритмов. Оценки, вырабатываемые в этих алгоритмах, используются для формирования действительных матриц ковариаций. Сопоставление полученных матриц ковариаций, соответствующих алгоритмам КТ, оптимальному алгоритму и нижней границе точности позволяет судить об эффективности алгоритмов КТ.

При работе с комплексом программ вначале пользователю предлагается ввести необходимую априорную информацию (рис. 2 и 3). Здесь могут быть выбраны алгоритмы КТ, для которых будет проводиться моделирование, параметры оцениваемой последовательности (1), а также графики, характеризующие зависимости диагональных элементов матриц ковариаций ошибок оценивания (расчетных и действительных), которые выбрал пользователь, от времени. Вид нелинейной функции  $s_i(x_i)$  может зада-

ваться либо аналитически, либо в виде отдельной  $m$ -функции, название которой предлагается ввести пользователю. Значения матриц ковариаций вектора состояния, шумов измерений и порождающих шумов вводятся в виде таблиц. Все введенные пользователем параметры для моделирования можно сохранить в файл для дальнейшего использования.

После ввода всех необходимых значений и нажатия кнопки «Пуск» начинается процесс моделирования, по завершении которого появляются окна вывода результатов моделирования (рис. 4).

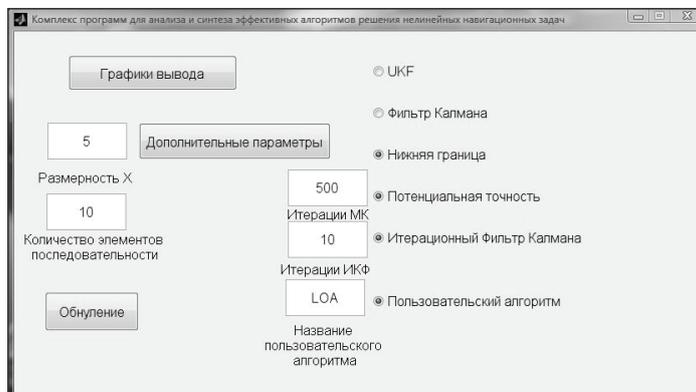


Рис. 2. Окно ввода априорной информации

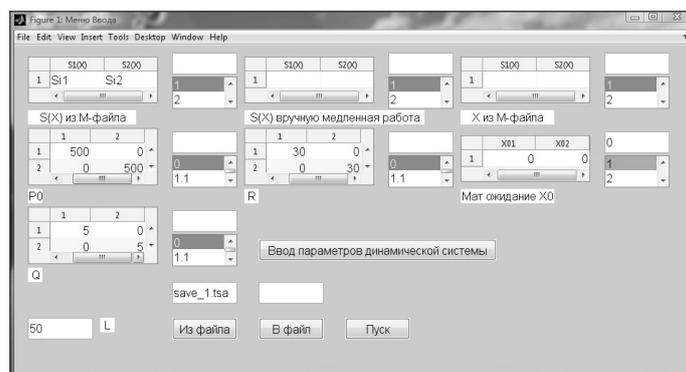


Рис. 3. Окно ввода параметров моделирования

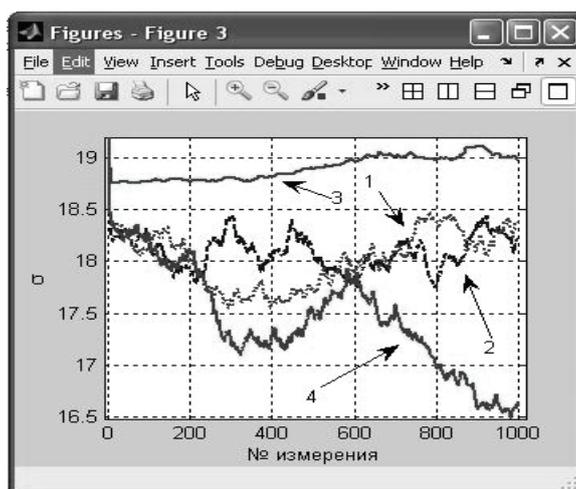


Рис. 4. Окно вывода результатов моделирования

В окнах приводятся зависимости диагональных элементов матриц ковариаций ошибок оценивания (расчетных и действительных), которые выбрал пользователь, от времени. По полученным данным пользователь может судить об эффективности алгоритмов КТ.

Апробация рассмотренного программного комплекса была проведена на примере задачи определения координат объекта по информации о дальностях до точечных ориентиров. Проведенное моделирование подтвердило правильность построения программного комплекса.

## Заключение

Предложена методика оценки эффективности алгоритмов решения нелинейных навигационных задач, с учетом которой разработан программный комплекс, обладающий удобным интерфейсом и позволяющий:

- моделировать алгоритмы калмановского типа для решения нелинейных навигационных задач;
- анализировать эффективность алгоритмов калмановского типа с точки зрения точности и быстродействия.

Предполагается провести доработку комплекса программ с целью расширения его возможностей, в частности, совершенствования интерфейса пользователя и построения графиков апостериорной плотности.

Авторы выражают признательность за помощь в подготовке публикации научному руководителю, д.т.н. Степанову О.А. Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 09-08-00828-а.

## Литература

1. Степанов О.А. Состояние, перспективы развития и применения наземных систем навигации для подвижных объектов // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 2. – С. 95–121.
2. Lefebvre T., Bruyninckx H. and J. De Schutter. Nonlinear Kalman Filtering for Force-Controlled Robot Task, Springer, Berlin. – 2005. – 265 p.
3. Hartikainen J. and S. Sarkka. Optimal filtering with Kalman filters and smoothers – a Manual for Matlab toolbox EKF/UKF // Centre of Excellence in Computational Complex Systems Research [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lce.hut.fi/research/mm/ekfukf/>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 30.06.2010).
4. Van der Merwe R. and E. Wan. «Recursive bayesian estimation library». Сайт: Machine Learning and Adaptive Signal Processing. – Режим доступа: <http://choosh.csee.ogi.edu/rebel>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 30.06.2010).
5. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2009. – 496 с.
6. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 1998. – 369 с.
7. Juiler S.J. and J.K. Uhlmann. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation // Proc. IEEE. – 2004. – V. 92(3). – P. 401–422.

*Торопов Антон Борисович*  
*Васильев Владимир Андреевич*

– ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник, [toropov\\_a@mail.ru](mailto:toropov_a@mail.ru)  
– Санкт-Петербургский государственный университет, аспирант, [vasiliev\\_vl.a@mail.ru](mailto:vasiliev_vl.a@mail.ru)

УДК: 621.3.045

## КОМПЕНСАЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, ВЫЗВАННЫХ НЕСИММЕТРИЕЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ

И.Е. Овчинников, А.В. Егоров

Рассматриваются способы компенсации радиальных сил реакции опор, возникающих в вентильном двигателе при разделении его обмоточной зоны на несколько независимых статорных обмоток, взаимодействующих с общим ротором, содержащим постоянные магниты.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, радиальное усилие, элементарный момент, катушка статора.

## Введение

В некоторых случаях с целью повышения надежности привода с вентильным двигателем (ВД) его исходная обмотка разделяется на две или три трехфазные зоны, каждая из которых питается от своего инвертора, причем все инверторы управляются от общего датчика положения ротора [1, 2]. Выход из строя любой из обмоточных зон или отказ инвертора не приводит к остановке всей системы, поскольку оставшаяся часть комбинированного ВД будет продолжать функционировать.

Однако по причинам конструктивного характера не всегда оказывается возможным разделить исходной обмоточной системы на две или три равноценные части. В работе рассматриваются возможности компенсации радиальных электромагнитных сил вентильного двигателя, вызванных несимметрией статорной обмотки.

**Симметрирование системы статорных обмоток**

Рассмотрим непосредственный привод с высокомоментным дисковым вентильным двигателем, приводящим в движение некоторую поворотную платформу с установленным оборудованием (труба телескопа, поворотный стол фрезерного станка, орудийная башня и т.д.).

Обмотка статора двигателя представляет собой систему  $N_K$  неперекрещивающихся катушек, а общий дисковый ротор содержит  $2p$  полюсов. В этом случае исходная система может быть разделена на  $n$  независимых или «элементарных» двигателей с общим ротором. Для обеспечения симметричной работы группы из  $k$  двигателей, отвечающих условию  $1 \leq k < n$ , при условии, что  $n - k$  – число отказавших и неработоспособных двигателей, необходимо выполнение двух требований.

1. Обмоточная зона каждого из  $k$  работающих двигателей не может быть сосредоточена в зоне одиночного кольцевого сектора окружности (рис. 1, а), а должна быть разбита на  $s$  секторов с взаимным угловым сдвигом  $\alpha_s$  (рис. 1, б)

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{s} . \tag{1}$$

2. Отношение общего количества катушек обмотки статора  $N_{\Sigma K}$  к числу фаз двигателя  $m$ , умноженному на  $n$  независимых (элементарных) двигателей, должно выражаться целым числом (Ц.Ч.):

$$\frac{N_{\Sigma K}}{m \cdot n} = \text{Ц.Ч.} \tag{2}$$

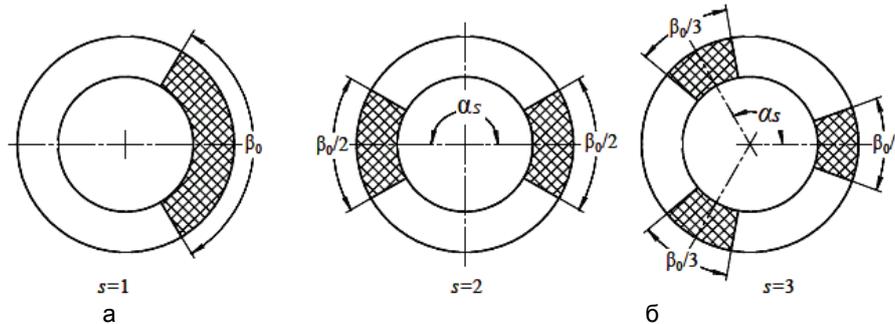


Рис. 1. Активные зоны статорной обмотки одного из трех независимых двигателей: а – с одним кольцевым сектором; б – с двумя и тремя симметрично расположенными кольцевыми секторами

Рассмотрим, к чему приводит невыполнение первого требования, когда обмотка одного из независимых двигателей будет расположена в одном кольцевом секторе (рис. 1, а). Предположим, что обмотка в кольцевом секторе имеет непрерывное распределение проводников, а расстояние между ними бесконечно мало. Вырежем из сектора, занимаемого обмоткой, угловой элемент  $d\beta$  (рис. 2). Элементарный момент, создаваемый проводниками с током, расположенным в этом секторе, равен

$$dM = \frac{M}{\beta_0} \cdot d\beta ,$$

где  $M$  – момент, создаваемый всеми проводниками в секторе  $\beta_0$ . Элементарная сила  $dQ$ , соответствующая моменту  $dM$ , будет иметь проекции на оси  $X$  и  $Y$ , проходящие через центр двигателя, причем ось  $X$  делит сектор  $\beta$  пополам (рис. 2). Таким образом, согласно [3], получаем  $dQ_X = dQ \cdot \sin \beta$ ,  $dQ_Y = dQ \cdot \cos \beta$ . Поскольку элементарная сила может быть представлена как  $dQ = dM / r_{cp}$ , где  $r_{cp}$  – средний радиус приложения силы  $dF$  (на рисунке не обозначена) относительно оси двигателя, то для проекций имеем выражения

$$dQ_X = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} \cdot \sin \beta \cdot d\beta , \quad dQ_Y = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} \cdot \cos \beta \cdot d\beta .$$

Полное значение проекций сил, соответствующих моменту  $M$  одиночного двигателя, имеет вид

$$dQ_X = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} \cdot \int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} \sin \beta d\beta = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} (-\cos \beta) \Big|_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} = 0 ,$$

$$dQ_Y = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} \cdot \int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} \cos \beta d\beta = \frac{M}{\beta_0 \cdot r_{cp}} (\sin \beta) \Big|_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} = \frac{M_0 \cdot \sin(\beta_0 / 2)}{r_{cp} \cdot \beta_0 / 2}. \quad (3)$$

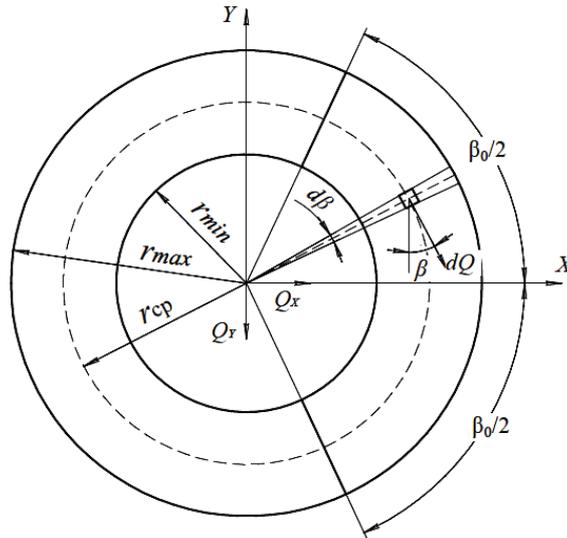


Рис. 2. К определению проекций сил  $Q_x$ ,  $Q_y$ , соответствующих моменту двигателя  $M$

Из формулы (3) можно заметить, что, если обмотка двигателя занимает все кольцо (рис. 1, а) и  $\beta_0 = 2\pi$ , то  $Q_x = 0$ ,  $Q_y = 0$ , и никаких радиальных сил не возникает.

Поскольку, согласно условию равновесия механической системы [4], на которую действует некоторый вектор силы  $Q$ , имеют место равенства  $\Sigma Q_x = 0$ ,  $\Sigma Q_y = 0$ ,  $\Sigma Q_z = 0$ , где  $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$  – проекции всех сил на соответствующие оси прямоугольной системы координат, то для нашего случая необходимо выполнение условия

$$Q_y + Q_{0y} = 0.$$

Здесь  $Q_{0y}$  – радиальная реакция опоры, в которой закреплен ротор двигателя, а  $Q_y$  – суммарная электромагнитная сила, развиваемая проводниками обмотки в зоне кольцевого сектора с углом  $\beta_0$ .

Таким образом, при несимметричном расположении сектора обмотки одного или группы двигателей момент нагрузки на валу или динамический момент в переходных процессах всегда будут вызывать появление боковых (радиальных) сил, воздействующих на опоры ротора.

В качестве примера рассмотрим случай, когда на кольце статора расположены три независимые трехфазные обмотки двигателей  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , взаимодействующие с общим ротором. Каждый из двигателей занимает зону  $\beta_n = 2\pi/3$ . Момент  $M$ , создаваемый двигателем, равен 1400 Н·м, а средний радиус расположения катушек обмотки статора и постоянных магнитов ротора  $r_{cp}$  равен 1 м.

Как показано ранее, при одновременной работе всех трех двигателей в (3) следует положить  $\beta_0 = 3 \cdot 2\pi/3 = 2\pi$ , и суммарная радиальная сила, воздействующая на опоры, оказывается равной нулю. При одновременной работе двух двигателей (один из трех выведен из работы по причине отказа инвертора или обмотки) полагаем  $\beta_0 = 2 \cdot 2\pi/3 = 4\pi/3$ , и, согласно (3),

$$Q_y = \frac{M \cdot \sin(\beta_0 / 2)}{r_{cp} \cdot \beta_0 / 2} = 2 \cdot \frac{1400 \sin(2\pi/3)}{1 \cdot 2\pi/3} = 1158 \text{ [Н]}.$$

Если работает только один двигатель, то полагаем  $\beta_0 = 2\pi/3$ , и, согласно (3),

$$Q_y = \frac{M \cdot \sin(\beta_0 / 2)}{r_{cp} \cdot \beta_0 / 2} = \frac{1400 \sin(\pi/3)}{1 \cdot \pi/3} = 1158 \text{ [Н]}.$$

В обоих случаях радиальная нагрузка на опоры оказалась одинаковой, что объясняется векторным сложением радиальных сил от каждого двигателя, угол между которыми равен  $120^\circ$ . Эти силы имеют значительную величину и при применении магнитных или аэродинамических опор в специальных системах использования рассматриваемого двигателя могут заметно повлиять на точность системы и качество переходных процессов. Таким образом, следует руководствоваться рекомендациями по симметрированию системы статорных обмоток, которые мы показали на практически приемлемых примерах для числа секторов  $s = 2$  и  $s = 3$ , изображенных на рис. 1, б.

## Симметрирование обмоток дисковых ВД на одном статоре с общим многополюсным ротором

Рассмотрим теперь способ симметрирования обмоток дисковых ВД, расположенных на одном статоре и имеющих общий многополюсный ротор. Этот случай будет осложнен тем обстоятельством, что условие (2) не выполняется, а именно,  $N_{\Sigma K} / (m \cdot n) \neq \text{Ц.Ч.}$ . Представим суммарное число катушек всех двигателей  $N_{\Sigma K}$ , равномерно распределенных по кольцу статора, в виде  $N_{\Sigma K} = N_{\text{ак}} + N_{\text{пк}}$ , где  $N_{\text{ак}}$  – число активных катушек, отвечающих условию

$$\frac{N_{\text{ак}}}{m \cdot n} = \text{Ц.Ч.}, \quad (4)$$

а  $N_{\text{пк}}$  – число пассивных катушек, которые обесточены и не участвуют в работе двигателя. Разумеется, число  $N_{\text{ак}}$  выбирается таким образом, чтобы количество пассивных катушек  $N_{\text{пк}}$  было минимальным.

В целях обеспечения симметрии обмоток всех  $n$  независимых двигателей, имеющих общий статор и общий ротор и создающих минимальную (в идеале нулевую) радиальную нагрузку на опоры, необходимо, помимо (1), (2) или (4), соблюдение следующих дополнительных условий для  $m$ -фазной катушечной обмотки каждого двигателя.

Угловое расстояние между соседними катушками одной фазы двигателя должно соответствовать целому числу периодов  $2\pi$  [эл. рад.], т.е. отвечать условию:

$$\frac{\beta_{\text{пк}} \cdot N_{\text{к}}}{2\pi} = q,$$

где  $q$  – любое целое число. Поскольку угловой размер одной катушки статора двигателя равен

$$\beta_{\text{пк}} = \frac{2\pi \cdot p}{N_{\Sigma K}}, \quad (5)$$

где  $p$  – число пар полюсов, то

$$\frac{p \cdot N_{\text{к}}}{N_{\Sigma K}} = q. \quad (6)$$

С целью обеспечения работы  $n$  двигателей от одного датчика положения ротора, начала одноименных фаз двигателей 1, 2, 3 ...  $n$  должны быть сдвинуты на целое число периодов  $2\pi$ . Это означает, что между началами одноименных фаз «элементарных» двигателей должно содержаться число катушек  $N_{\text{кф}}$ , отвечающее условию

$$\frac{\beta_{\text{пк}} \cdot N_{\text{кф}}}{2\pi} = q,$$

или, аналогично выражению (6),

$$\frac{p \cdot N_{\text{кф}}}{N_{\Sigma K}} = q. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда число полюсов ротора  $2p = 88$ , общее число катушек статора  $N_{\Sigma K} = 66$  и требуется разместить на статоре три трехфазные обмотки, принадлежащие двигателям  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Соединение катушек фаз двигателей следует организовать таким образом, чтобы минимизировать возникновение радиальных сил как при совместной работе всех трех двигателей, так и в случае парной или одиночной работы каждого.

Следуя нашей рекомендации (1), рассмотрим два практически приемлемых варианта, а именно разделим обмоточную зону каждого двигателя на два диаметрально противоположных сектора ( $s = 2$ ,  $\alpha_s = \pi$ ) и на три сектора ( $s = 3$ ,  $\alpha_s = 2\pi/3$ ). Это разделение показано на рис. 3.

Поскольку общее число катушек  $N_{\Sigma K}$  не делится нацело на произведение числа фаз  $m = 3$  и числа двигателей  $n = 3$ , то вместо (2) воспользуемся формулой (4) и установим, что  $N_{\text{ак}} = 63$ ,  $N_{\text{пк}} = 3$ . Таким образом, на каждую фазу двигателей будет приходиться  $63/3/3 = 7$  активных катушек, а 3 катушки из 66 будут пассивными и обесточенными. На рис. 3, а, б, зоны пассивных катушек заштрихованы.

На рис. 4, а, б, изображены схемы межкатушечных соединений для фазы 1 двигателя  $A$ . Соединения фаз 2 и 3 выполняются полностью аналогично. Это же относится и к межкатушечным соединениям для фаз двигателей  $B$  и  $C$ . Можно видеть, что шаг соединений отвечает условию (6), а сдвиг между началами одноименных фаз двигателей – условию (7). Так, для рис. 4, а, расстояние между соседними катушками фазы 1 равно  $N_{\text{к}} = 3$  (внутри одного сектора) и  $N_{\text{к}} = 24$  (между секторами). Для условия (6) имеем  $44 \cdot 3 / 66 = 2$  и  $44 \cdot 24 / 66 = 16$ , т.е. условие (6) выполняется.

Аналогично, расстояние между началами одноименных фаз (например фаза 1) двигателей *A*, *B*, *C* равно  $N_{\text{кф}} = 21$ , и условие (7) также выполняется:  $44 \cdot 21 / 66 = 14$ .

Выполнение условий (6) и (7) обеспечено и для схемы рис. 4, б.

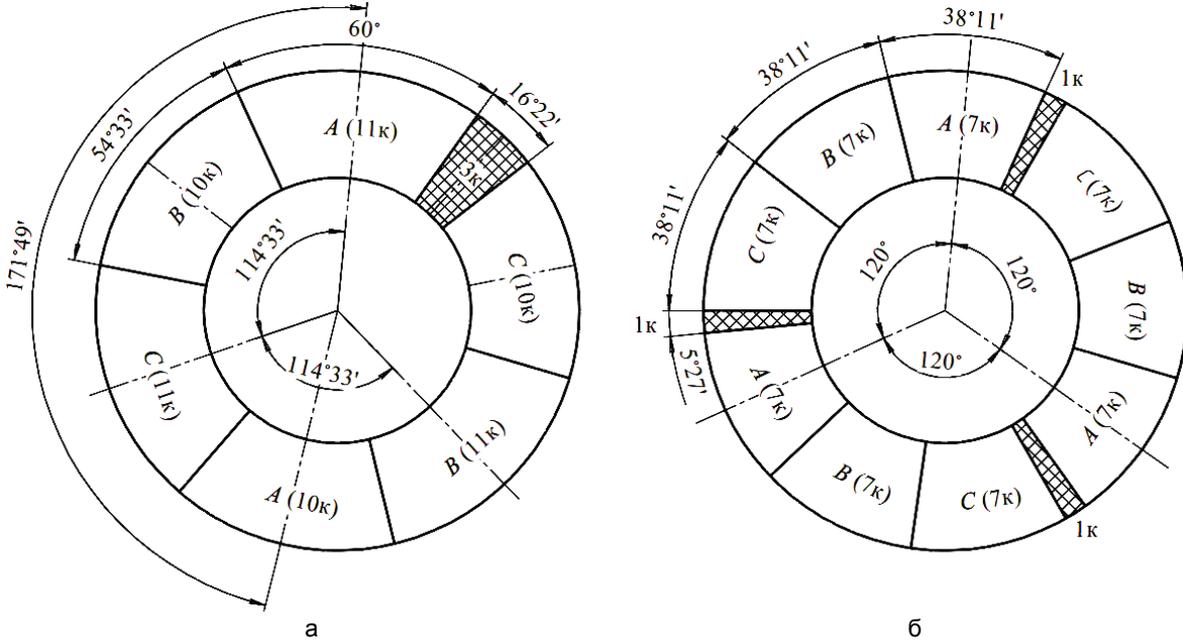


Рис. 3. Обмоточные зоны статора двигателей *A*, *B*, *C*:  
 а – при делении на 2 сектора; б – при делении на 3 сектора

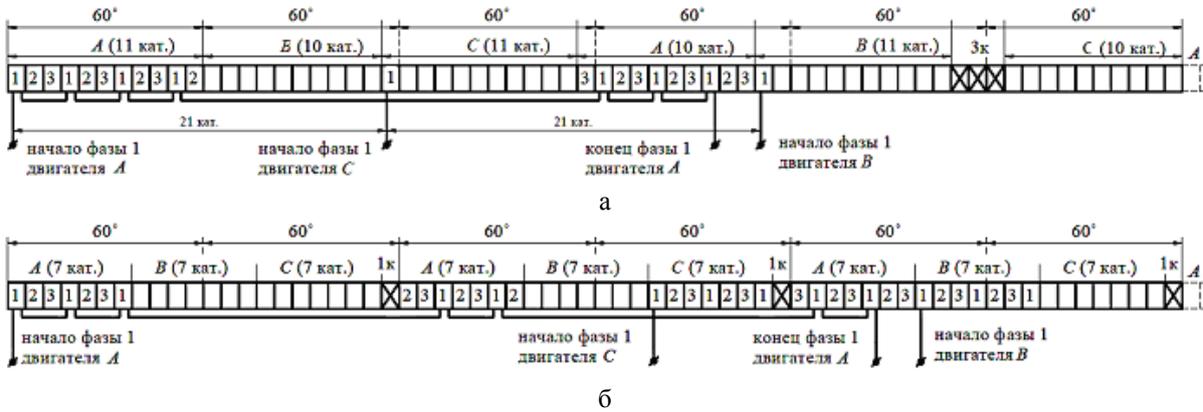


Рис. 4. Схема межкатушечных соединений фазы: а – для двигателей, разделенных на 2 сектора; б – для двигателей, разделенных на 3 сектора

Теперь проанализируем наличие радиальных сил для схем рис. 3, а и 3, б, вызванных наличием пассивных катушек статора, могущих внести несимметрию в распределение усилий, возникающих при одновременной попарной или одиночной работе двигателей.

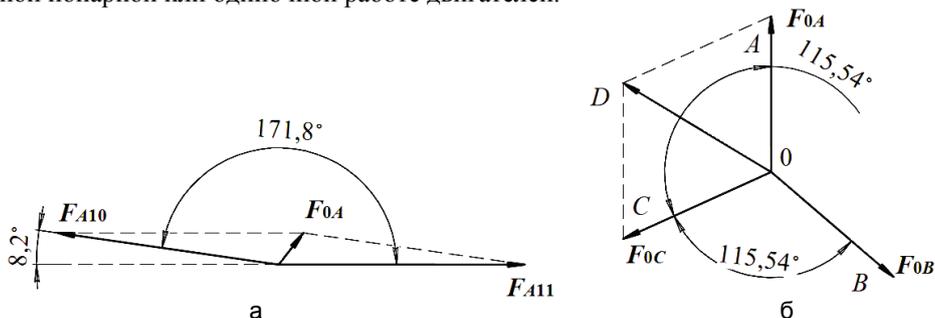


Рис. 5. Векторные диаграммы усилий, воздействующих на опоры со стороны двигателей *A*, *B*, *C*:  
 а – усилия при работе двигателя *A*; б – усилия при совместной работе двигателей

На рис. 5, а, показана векторная диаграмма радиальных усилий, воздействующих на опоры двигателя при работе двигателя А, обмотка которого расположена в секторах, содержащих 11 катушек и 10 катушек (рис. 3, а).

Усилия, создаваемые секторами на основании (3), равны

$$F_{A11} = \frac{M_A}{r_{cp}} \frac{11}{21} \left( \frac{\sin(\pi/6)}{\pi/6} \right), \quad F_{A10} = \frac{M_A}{r_{cp}} \frac{10}{21} \left( \frac{\sin(10 \cdot \pi/33)}{10 \cdot \pi/33} \right), \quad (8)$$

где  $M_A$  – суммарный момент двигателя А, когда под током находится 21 катушка (далее принимаем  $M_A = M_B = M_C = 1400 \cdot 21 / 22 = 1336$  Н·м).

Угол между векторами  $F_{A10}$  и  $F_{A11}$  равен углу между осями секторов  $A_{10}$  и  $A_{11}$  (рис. 3, а), составляющему  $\gamma = 171,8^\circ$ . Поэтому равнодействующая векторов  $F_{A10}$  и  $F_{A11}$ , представляющая усилие, оказываемое на опоры двигателя со стороны двигателя А, равна

$$F_{0A} = \sqrt{F_{A10}^2 + F_{A11}^2 - 2F_{A10}F_{A11}\cos(180^\circ - \gamma)}. \quad (9)$$

На рис. 5, б, показано расположение векторов воздействия на опоры со стороны всех трех двигателей, причем по абсолютной величине все три вектора равны. Эта диаграмма дает возможность вычислять воздействие на опоры:

– одного работающего двигателя  $F_{0A} = F_{0B} = F_{0C}$ ;

– двух одновременно работающих двигателей

$$F_{0AC} = F_{0A} + F_{0C}, \quad F_{0AC} = \sqrt{F_{0A}^2 + F_{0C}^2 - 2F_{0A}F_{0C}\cos(180^\circ - \angle AOC)},$$

$$F_{0BC} = F_{0AC}, \quad F_{0AB} = \sqrt{F_{0A}^2 + F_{0B}^2 - 2F_{0A}F_{0B}\cos(180^\circ - \angle AOB)}; \quad (10)$$

– трех одновременно работающих двигателей

$$F_{0ABC} = F_{0A} + F_{0B} + F_{0C}, \quad F_{0ABC} = \sqrt{F_{0AC}^2 + F_{0B}^2 - 2F_{0AC}F_{0B}\cos(180^\circ - \angle BOD)}.$$

Углы между векторами

$$\angle AOC = 115,54^\circ, \quad \angle AOB = 128,92^\circ, \quad \angle D0B = 173,31^\circ. \quad (11)$$

Результаты вычислений, выполненных по формулам (8)–(11) для среднего радиуса расположения катушек  $r_{cp} = 1$  м и моментов  $M_A = M_B = M_C = 1336$  Н·м, сведены в таблицу.

Работающие двигатели	Радиальное усилие, Н
А или В или С	100
А+С или В+С	106
А+В	86
А+В+С	13,4

Таблица. Результаты вычислений, выполненных по формулам (8)–(11)

Видно, что предложенное распределение катушек двигателей в зонах приблизительно диаметрально противоположных секторов позволило значительно уменьшить радиальные силы воздействия на опоры по сравнению со случаем сосредоточения катушек в одном секторе. Что касается схемы распределения обмоточных зон, показанной на рис. 3, б, то она вообще является идеально сбалансированной, поскольку равнодействующая каждого двигателя равна нулю ( $F_{0A} = F_{1A7} + F_{2A7} + F_{3A7} = 0$ ,  $F_{0B} = 0$ ,  $F_{0C} = 0$ ) ввиду того, что все одноименные сектора имеют одинаковый сдвиг  $120^\circ$ , а абсолютные величины усилий  $F_{A7}$  каждого сектора одинаковы. Однако надо иметь в виду, что из-за большого количества соединений между секторами реализация схемы, представленной на рис. 3, б, технологически может оказаться несколько сложнее, чем для рис. 3, а.

Таким образом, при создании комбинированного ВД, имеющего несколько независимых обмоток на одном статоре и общий ротор, нецелесообразно сосредотачивать каждую обмотку в зоне одного сектора. Надлежащее распределение обмотки по нескольким секторам при выполнении сформулированных условий позволяет минимизировать или полностью исключить возникновение радиальных сил, действующих на опоры.

### Выводы

1. Разделение статорной обмотки дискового ВД согласно сформулированным правилам (1) и (2) позволяет не только повысить надежность всего электропривода, но и обеспечить отсутствие радиальных возмущений в опорах при сохранении простоты управления двигателем.

2. В случае невозможности обеспечения выполнения правил (1) и (2) и, соответственно, возникновении радиальных усилий целесообразно сосредотачивать каждую обмоточную зону в нескольких диаметральных секторах согласно изложенной методике.
3. Расчет на примере существующего дискового ВД показал, что величины радиальных усилий, негативно воздействующие на опоры, могут быть значительными, а предложенные рекомендации позволяют уменьшить их до значений в 10–100 раз меньших, что способствует меньшему износу подшипников двигателя.

### Литература

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций. – СПб: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
2. Овчинников И.Е., Хитерер М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. 2-е изд. – СПб: Корона Принт, 2008. – 368 с.
3. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л. Курс теоретической механики. – СПб: Лань, 2002. – 736 с.
4. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. – М.: Наука, 1971.

*Овчинников Игорь Евгеньевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ludimit@yandex.ru

*Егоров Алексей Вадимович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alexeykey@rambler.ru

УДК 517.984.68

## ДВУХЧАСТИЧНАЯ МОДЕЛЬ ПРОВОДНИКА С КВАНТОВЫМ КОЛЬЦОМ

Д.А. Еремин

С помощью теории самосопряженных расширений строятся операторы, описывающие поведение двух взаимодействующих частиц в проводнике и в кольце. С помощью полученных операторов описывается двухчастичная модель проводника с квантовым кольцом. Спектр полученного оператора численно исследуется на наличие дополнительных точечных уровней. Проводится сравнение результата с аналогичной одночастичной задачей.

**Ключевые слова:** уравнение Шредингера, симметрические операторы, теория Крейна, самосопряженные расширения, функция Грина.

### Введение

Современное развитие нанoeлектроники делает необходимой задачу теоретического исследования различных квантовых наносистем. В некоторых случаях адекватной моделью таких систем является квантовый граф. Математическая теория одночастичных задач для квантовых графов достаточно хорошо развита. В то же время многочастичные задачи рассматривались только для некоторых простых типов систем. Эти задачи являются более сложными, поскольку размерность конфигурационного пространства многократно возрастает в зависимости от числа частиц. С другой стороны, без учета взаимодействия частиц невозможно эффективно моделировать многие наноустройства, в частности, элементы квантового компьютера.

В данной работе описывается двухчастичная модель проводника с квантовым кольцом с помощью схемы, предложенной в работе В.А. Гейлера и И.Ю. Попова [1]. Эта схема использует теорию Крейна самосопряженных расширений симметрических операторов.

### Поведение двух взаимодействующих частиц на прямой

Гамильтониан, описывающий поведение двух невзаимодействующих частиц на прямой, имеет вид (полагаем, что частицы имеют равные массы)

$$H_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right),$$

с пространством состояний  $D(H_0) = L^2(\mathbf{R}^2)$ .

Для удобства воспользуемся системой единиц, в которой  $\hbar = 1$ ,  $m = 1$ .

Оператор  $H_1$ , описывающий поведение двух взаимодействующих частиц на прямой, формально может быть записан в виде (рассматриваем только простейшее  $\delta$ -образное взаимодействие)

$$H_1 = H_0 + k\delta(y - x),$$

где  $k$  – интенсивность взаимодействия частиц между собой.

Построение оператора  $H_1$  производим с помощью техники «сужения–расширения» симметрических операторов. С этой целью рассматриваем сужение  $S$  оператора  $H_0$  на множество функций, равных нулю на диагонали ( $y = x$ ) конфигурационного пространства

$$D(S) = \{\psi \in D(H_0): \psi(x, x) = 0, x \in \mathbf{R}\}.$$

Гамильтониан системы – две взаимодействующие частицы в проводнике – следует искать среди самосопряженных расширений оператора  $S$ . С этой целью воспользуемся формулой Крейна, которая описывает резольвенты всех самосопряженных расширений заданного симметрического оператора  $S$  с помощью резольвенты некоторого его фиксированного самосопряженного расширения [2, 3].

Обозначим через  $G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; z)$  функцию Грина оператора  $H_0$ . Она хорошо известна и имеет вид

$$G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; z) = \frac{1}{\pi} K_0(\sqrt{-2z}|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|), \quad \mathbf{r}, \mathbf{r}' \in \mathbf{R}^2, \quad z \in \mathbf{C} \setminus [0; +\infty),$$

где  $K_0$  – функция Макдональда. Тогда отображения

$$\Gamma(z): L^2(\mathbf{R}) \rightarrow L^2(\mathbf{R}^2),$$

$$Q(z): L^2(\mathbf{R}) \rightarrow L^2(\mathbf{R}),$$

действующие по правилу

$$\Gamma(z)f = \int_{\mathbf{R}} G_0(x, y, x', x'; z) f(x') dx',$$

$$Q(z)f = \int_{\mathbf{R}} G_0(x, x, x', x'; z) f(x') dx',$$

представляют собой, соответственно,  $\Gamma$ -функцию и  $Q$ -функцию Крейна пары операторов  $(S, H_0)$ .

Обозначим через  $R(z)$  и  $R_0(z)$  – резольвенты  $H_1$  и  $H_0$  соответственно. Тогда по формуле Крейна получаем

$$R(z) = R_0(z) - \Gamma(z)[Q(z) + A]^{-1} \Gamma^*(\bar{z}),$$

где  $A = \frac{2}{k}$  – параметр, характеризующий самосопряженные расширения оператора  $S$ .

Непосредственные вычисления показывают, что функция Грина оператора  $H_1$ , описывающего поведение двух взаимодействующих частиц на прямой, имеет вид

$$G_1(x, y, x', y'; z) = \frac{1}{\pi} K_0\left(\sqrt{-2z}\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}\right) - \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbf{R}} \frac{k \exp[i(x+y-x'-y')s/2] \exp[-(|x-y| + |x'-y'|)\sqrt{s^2-4z}/2]}{(k + 2\sqrt{s^2-4z})\sqrt{s^2-4z}} ds.$$

### Поведение двух взаимодействующих частиц в кольце

Аналогично случаю на прямой, строится гамильтониан  $H_r$ , описывающий поведение двух взаимодействующих частиц в кольце. В данном случае невозмущенный оператор  $H_0$ , описывающий поведение двух невзаимодействующих частиц в кольце, имеет вид

$$H_0 = -\frac{1}{2\rho^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial \varphi_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial \varphi_2^2} \right),$$

где  $\rho$  – радиус кольца. Пространство состояний данного оператора записывается в следующем виде:

$$D(H_0) = \left\{ \psi \in L^2(\mathbf{T}^2): \psi|_{\varphi_j=-\pi} = \psi|_{\varphi_j=\pi}, \frac{\partial \psi}{\partial \varphi_j} \Big|_{\varphi_j=-\pi} = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi_j} \Big|_{\varphi_j=\pi} \right\}, \quad j=1,2,$$

где  $\mathbf{T} = [-\pi; \pi]$ .

Функция Грина  $G_r(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_1', \varphi_2'; z)$  оператора  $H_r$  имеет вид

$$G_r(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_1', \varphi_2'; z) = \frac{1}{2\pi^2} \sum_{n,m=-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[im(\varphi_1 - \varphi_1')] \exp[in(\varphi_2 - \varphi_2')]}{m^2 + n^2 - 2z\rho^2} - \frac{1}{\pi^3} \sum_{s,t=-\infty}^{+\infty} \frac{k\rho \exp[i\varphi_1(s+t)/2]}{s^2 + t^2 - 4z\rho^2} \cdot \frac{\exp[i\varphi_2(s-t)/2]}{ka_s(z) + 2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[i(\varphi_2' - \varphi_1')m] \exp[is\varphi_2']}{m^2 + (s-m)^2 - 2z\rho^2},$$

где

$$a_s(z) = \begin{cases} \frac{\rho}{\sqrt{s^2 - 4z\rho^2}} \operatorname{cth}\left(\pi\sqrt{s^2 - 4z\rho^2}/2\right), & s = 2m, \quad m \in \mathbf{Z}, \\ \frac{\rho}{\sqrt{s^2 - 4z\rho^2}} \operatorname{th}\left(\pi\sqrt{s^2 - 4z\rho^2}/2\right), & s = 2m + 1, \quad m \in \mathbf{Z}. \end{cases}$$

**Двухчастичная модель проводника с квантовым кольцом**

Рассматриваем систему, состоящую из квантового кольца и проводника. Схематически такая система изображена на рис. 1.

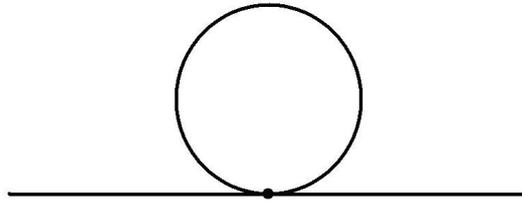


Рис. 1. Система, состоящая из квантового кольца и проводника

Введем два вспомогательных оператора

$$H_2 = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right), \quad D(H_2) = L^2(\mathbf{R} \times \mathbf{T}),$$

$$H_3 = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right), \quad D(H_3) = L^2(\mathbf{T} \times \mathbf{R}),$$

описывающих поведение одной из частиц в кольце, а другой – в проводнике. Функция Грина данных операторов имеет вид

$$G_{2,3}(x, \varphi, x', \varphi'; z) = \frac{1}{2\pi^2 \rho} \int_{\mathbf{R}} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[in(x-x')] \exp[im(\varphi-\varphi')]}{n^2 + \frac{m^2}{\rho^2} - 2z} dn.$$

Конфигурационными пространствами для данных операторов будут цилиндры. С помощью данных цилиндров будем осуществлять склейку плоскости и тора (рис. 2) – конфигурационных пространств для двухчастичных задач на прямой и в кольце соответственно. Пока контакт между проводником и кольцом разомкнут, гамильтониан системы представляет собой прямую сумму

$$H_0 = H_1 \oplus H_2 \oplus H_3 \oplus H_4.$$

Включение контактов моделируем с помощью процедуры «сужение-расширение». С этой целью рассматриваем сужение  $S$  оператора  $H_0$

$$S_0 = S_1 \oplus S_2 \oplus S_3 \oplus S_4,$$

где

$$D(S_1) = \{\psi \in D(H_1) : \psi(0, x) = \psi(x, 0) = 0\}, \quad D(S_2) = \{\psi \in D(H_2) : \psi(0, \varphi) = \psi(x, 0) = 0\},$$

$$D(S_3) = \{\psi \in D(H_3) : \psi(0, x) = \psi(\varphi, 0) = 0\}, \quad D(S_4) = \{\psi \in D(H_4) : \psi(0, \varphi) = \psi(\varphi, 0) = 0\}.$$

Оператор  $S$  – симметрический, он описывает поведение двух частиц в системе изолированных проводника и кольца, имеющих проколы в точках  $x = 0$  (в проводнике) и  $\varphi = 0$  (в кольце). Гамильтониан устройства с включенным контактом следует искать среди самосопряженных расширений оператора  $S$ . Обозначим это расширение через  $H$ , а через  $R(z)$  – его резольвенту. Тогда по формуле Крейна получаем

$$R(z) = R_0(z) - \Gamma(z)[Q(z) + A]^{-1} \Gamma^*(\bar{z}).$$

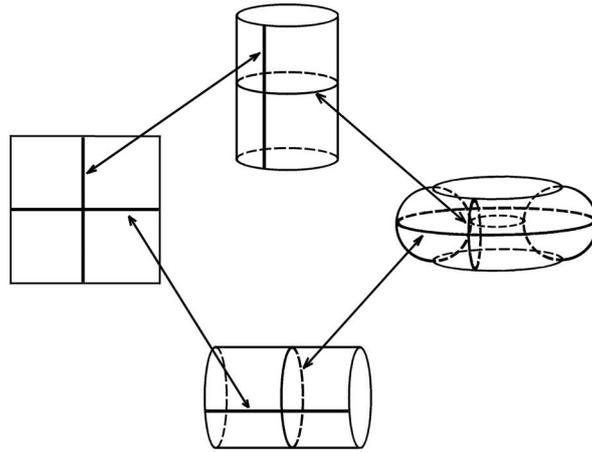


Рис. 2. Правило склейки конфигурационных пространств

Здесь  $A$  – эрмитов оператор  $8 \times 8$ , параметризующий самосопряженные расширения оператора  $S$ . Он описывает характеристики контакта, и его вид определяется условиями Кирхгофа (физически для идеального контакта эти условия означают сохранение потока через точку контакта). Поэтому матрицу выбираем в следующем виде:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ \bar{\beta} & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & \eta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & \eta & 0 \\ 0 & \bar{\beta} & 0 & 0 & 0 & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{\eta} & 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\eta} & 0 & 0 & 0 & \nu \end{pmatrix},$$

где внедиагональные элементы характеризуют степень идеальности контакта, а диагональные элементы – степень отклонения контакта от идеального.

### Исследование модели на дополнительные энергетические уровни

Из формулы Крейна следует, что в спектр оператора  $H$  дополнительно войдут те значения  $z$ , при которых оператор  $Q(z) + A$  необратим. Рассмотрим случай идеального контакта, когда диагональные элементы матрицы  $A$  равны нулю, а внедиагональные равны между собой (пусть, для определенности, они равны  $\beta$ ). В этом случае основной энергетический уровень соответствующей одночастичной задачи может быть найден из уравнения

$$-\frac{1}{2z} \operatorname{cth}(\pi\rho\sqrt{-z}) - \beta^2 = 0.$$

Сравнивая численно полученное значение основного энергетического уровня двухчастичной задачи с основным энергетическим уровнем одночастичной задачи в зависимости от различных значений параметра  $\beta$ , можно сделать вывод, что при уменьшении (увеличении) значения параметра  $\beta$  основной энергетический уровень двухчастичной задачи уменьшается (увеличивается), при этом аналогичное поведение наблюдается и у основного энергетического уровня одночастичной модели. Более того, основные энергетические уровни двухчастичной и одночастичной моделей отличаются в два раза, что объясняется количеством частиц.

На рис. 3 представлены численно полученные энергетические уровни двухчастичных моделей с взаимодействием частиц и без. Полагается, что  $\beta = 0,1$ ,  $\rho = 1$ . Из графиков видно, что взаимодействие частиц приводит к расщеплению энергетических уровней системы.

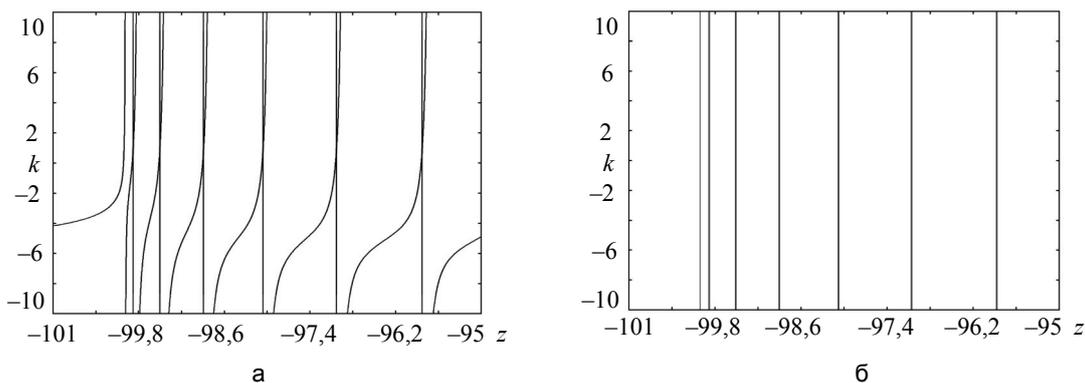


Рис. 3. Энергетические уровни двухчастичных моделей с взаимодействием частиц (а) и без него (б):  $k$  – интенсивность взаимодействия,  $z$  – энергия (в безразмерных единицах)

### Заключение

Построена двухчастичная модель проводника с квантовым кольцом. Модель исследована на наличие дополнительных энергетических уровней, произведено сравнение результата исследования с аналогичной одночастичной задачей. Проведенные расчеты позволяют сделать следующие качественные выводы о характеристиках системы.

1. При уменьшении (увеличении) значения параметра  $\beta$  основной энергетический уровень системы уменьшается (увеличивается).
2. Основной энергетический уровень системы по сравнению с одночастичной моделью изменился в два раза.
3. Взаимодействие частиц приводит к расщеплению энергетических уровней.

### Литература

1. Гейлер В.А., Попов И.Ю. Баллистический транспорт в наноструктурах: явнорешаемые модели // Теоретическая и математическая физика. – 1996. – Т. 107 – № 1. – С. 12–20.
2. Крейн М.Г., Лангер Г.К. О дефектных подпространствах и обобщенных резольвентах эрмитова оператора в пространстве  $P_k$  // Функциональный анализ и его приложения. – 1971. – Т. 5. – Вып. 2. – С. 59–71.
3. Альбеверио С., Гестези Ф., Холден Х., Хоеэг-Крон Р. Решаемые модели в квантовой механике. – М.: Мир, 1991. – 586 с.

*Еремин Дмитрий Александрович* – Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, аспирант, ereminda@mail.ru

УДК 539.1

## РАСЧЕТ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

Д.В. Постоварова

Для регистрации нейтронов и высокоэнергетичных гамма-квантов деления предлагается создать новое устройство – низкофононовый спектрометрический позиционно-чувствительный детектор нейтронов, представляющий собой счетчик тепловых нейтронов, окруженный сцинтилятором, выступающим и в роли замедлителя нейтронов. Приводятся предварительные результаты моделирования регистрации нейтронов с различными спектрами предлагаемым детектором.

**Ключевые слова:** спектроскопический позиционно-чувствительный детектор нейтронов, математическое моделирование.

### Введение

В связи с возросшей террористической опасностью в последнее время в мире развиваются новые методы досмотра коммерческих грузов с целью обнаружения в них незаконно перевозимых ядерных материалов (ЯМ), которые могут быть использованы для создания самодельного ядерного взрывного устройства или в качестве компонента «грязной бомбы». Основным средством обнаружения ЯМ служат радиационные порталы, регистрирующие их собственное нейтронное или гамма-излучение. Однако собственное гамма-излучение многих ЯМ имеет низкую энергию, в значительной степени поглощается в

окружающем веществе, и не всегда может быть обнаружено в присутствии природного фона гамма-излучения. Собственное нейтронное излучение спонтанного деления ЯМ является гораздо более надежным индикатором наличия ЯМ, так как природный нейтронный фон значительно ниже, чем фон гамма-квантов. Тем не менее, природный нейтронный фон ограничивает чувствительность метода [1, 2].

Спонтанное нейтронное излучение присутствует не у всех ЯМ. В связи с этим в мире развиваются системы, основанные на активных ядерных методах [3]. В активных методах в качестве зондирующего излучения используется, как правило, нейтронное излучение, а регистрируются вторичные излучения вынужденного деления: нейтроны и гамма-кванты. При этом работающий источник зондирующего излучения создает значительный собственный фон нейтронного и гамма-излучения, затрудняющий регистрацию нейтронов и гамма-квантов деления. Поэтому одной из главных задач детектирующей системы становится способность отличать интересующие нейтроны вынужденного деления от гамма-квантов, фоновых и зондирующих нейтронов. Для этого нужно измерять энергии нейтронов и направление на их источник.

Существующие детекторы нейтронов делительного спектра основаны, как правило, на органических сцинтилляторах, или на комбинации замедлителя нейтронов с детектором тепловых нейтронов на основе  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$  или Gd. Ни один из этих детекторов не обладает одновременно достаточной степенью нейтрон/гамма разделения, способностью измерять энергетический спектр нейтронов и направление на их источник (позиционной чувствительностью).

### Устройство детектора

Для регистрации нейтронов и высокоэнергетичных гамма-квантов деления предлагается создать новое устройство – низкофоновый спектрометрический позиционно-чувствительный детектор нейтронов. Детектор представляет собой комбинацию из детектора тепловых нейтронов на основе газа  $^3\text{He}$  либо стекла, допированного  $^6\text{Li}$ , и сцинтилляционного детектора, служащего одновременно замедлителем нейтронов.

Детекторы на основе  $^3\text{He}$  (или  $^6\text{Li}$ ) обладают высокой эффективностью регистрации тепловых нейтронов ( $E \ll 1$  эВ), но почти не чувствительны к нейтронам делительного спектра, средняя энергия которых составляет около 2 МэВ. Сцинтилляционные детекторы, напротив, имеют достаточно высокую (50%) эффективность регистрации быстрых нейтронов, но не чувствительны к тепловым нейтронам. При попадании быстрого нейтрона в органический сцинтиллятор в течение примерно 50 мкс он теряет всю свою энергию в столкновениях с ядрами водорода и углерода, после чего с высокой вероятностью регистрируется детектором тепловых нейтронов (рис. 1). Амплитуда всплесков света, возникающих при потере нейтроном энергии в сцинтилляторе, измеряется при помощи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Поскольку детектор тепловых нейтронов регистрирует только нейтроны, оставившие в сцинтилляторе всю свою энергию, измеренная амплитуда сцинтилляции соответствует полной энергии нейтрона. По нашим предварительным расчетам использование информации об энергии нейтронов позволит в 3–5 раз подавить регистрацию нейтронов природного фона, энергетический спектр которых отличается от делительного, благодаря чему удается существенно улучшить соотношение эффект-фон при регистрации нейтронов спонтанного или вынужденного деления ЯМ. Кроме того, использование сцинтиллятора с разделением нейтронов и гамма-квантов по форме импульса позволит независимо регистрировать тем же детектором и гамма-кванты деления.

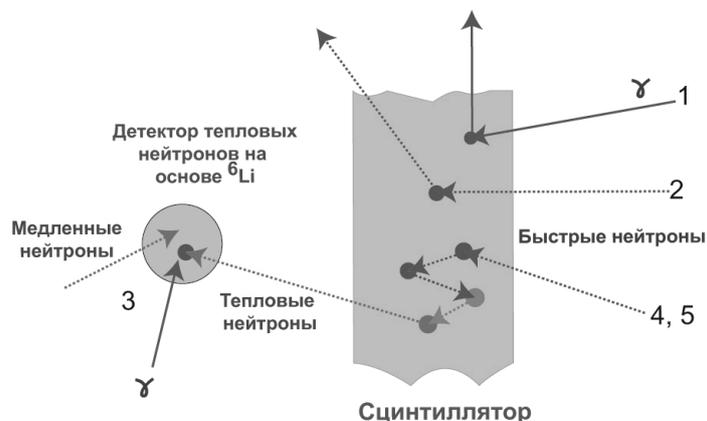


Рис. 1. Принцип действия спектрометрического детектора нейтронов: 1 –  $\gamma$ -квант; 2 – нейтрон, теряющий часть энергии в сцинтилляторе и покидающий объем детектора; 3 – нейтрон с энергией меньше пороговой (0,5 МэВ) или  $\gamma$ -квант; 4, 5 – нейтроны с энергиями, характерными для деления (0,5–5,0 МэВ и более)

По сути, предлагаемый детектор представляет четыре независимых детектора:

1. детектор быстрых и тепловых нейтронов ( $^3\text{He}$  + замедлитель);
2. сцинтилляционный детектор быстрых нейтронов (сцинтиллятор);
3. сцинтилляционный детектор гамма-квантов (сцинтиллятор);
4. спектрометрический детектор быстрых нейтронов ( $^3\text{He}$  в совпадении со сцинтиллятором, работающим и в качестве замедлителя нейтронов).

### Математическое моделирование

Первым этапом в разработке предлагаемого детектора является его математическое моделирование с целью подбора оптимальной геометрии и материалов детектора. Ниже представлены первые результаты такого моделирования.

Моделирование проводилось с помощью существующего модуля MCNP-PoliMi (MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987), позволяющего записывать треки нейтронов и фотонов в заданной геометрии и с заданным нейтронным источником. Моделирование проводилось для двух источников нейтронов: изотопа  $^{252}\text{Cf}$ , испускающего нейтроны делительного спектра, и нейтронного дейтерий-третиевого генератора, испускающего нейтроны с энергией 14 МэВ. Расстояние от источника нейтронов до центра детектора везде предполагалось равным 1 м. Также моделирование проводилось для различных пороговых значений энергии регистрации нейтрона в сцинтилляторе.

### Взаимное расположение компонентов детектора

Эффективность замедления быстрого нейтрона до тепловых энергий и его последующей регистрации детектором тепловых нейтронов зависит от взаимного расположения компонентов детектирующей системы.

Были смоделированы две геометрии. В первом случае сцинтиллятор имел форму параллелепипеда и располагался перед детектором тепловых нейтронов на основе допированного  $^6\text{Li}$  стекла. Во втором случае сцинтиллятор имел форму цилиндра, внутри которого помещался детектор тепловых нейтронов. В расчетах определялась зависимость количества тепловых нейтронов, прореагировавших с атомами  $^6\text{Li}$ , от толщины сцинтиллятора (рис. 2).

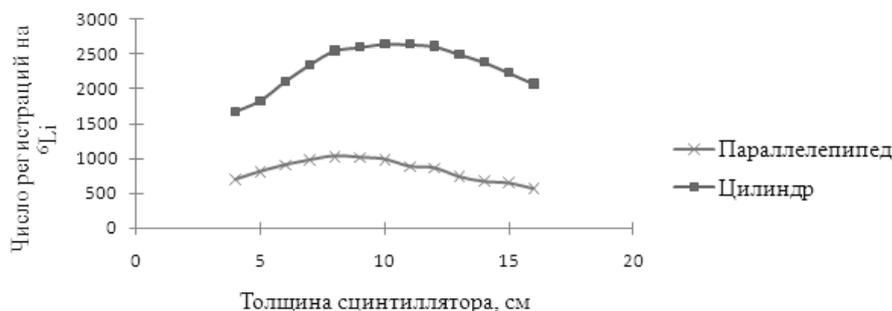


Рис. 2. Сравнение эффективности двух различных геометрий сцинтиллятора

Из полученных зависимостей видно, что в случае цилиндрического сцинтиллятора эффективность регистрации тепловых нейтронов примерно в 2,5 раза выше, чем в случае плоского. Поэтому все дальнейшие расчеты проводились для сцинтиллятора цилиндрической формы.

### Позиционная чувствительность

Разрабатываемый детектор предполагается сделать позиционно-чувствительным. Для этого предлагается использовать в его конструкции два или три различных сцинтиллятора-замедлителя (рис. 3), регистрация света с которых осуществляется независимо (либо разными ФЭУ, либо ФЭУ с позиционно-чувствительным анодом, либо за счет разделения по форме импульса). Чувствительность к направлению, с которого прилетел быстрый нейтрон, достигается требованием того, чтобы его взаимодействие в сцинтилляторе №2 произошло раньше, чем в сцинтилляторе № 1 (рис. 3). Для выбранной ориентации детектора (рис. 3) это условие будет выполняться в основном для нейтронов, прилетевших сверху, в то время как нейтроны, прилетевшие сбоку или снизу, с большой вероятностью сначала будут зарегистрированы сцинтилляторами № 1 или № 3.

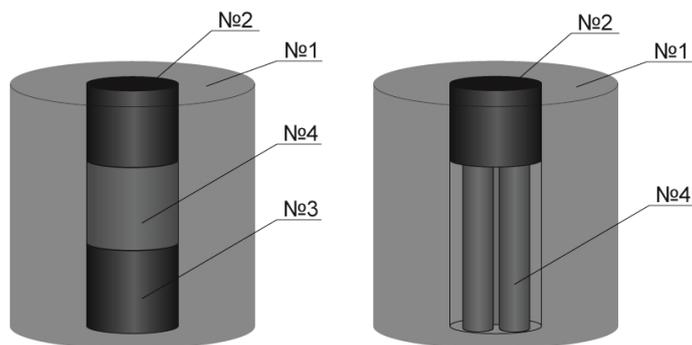


Рис. 3. Варианты геометрии детектора с использованием допированного  ${}^6\text{Li}$  стекла (слева) и газонаполненных счетчиков на основе  ${}^3\text{He}$  (справа): 1, 2, 3 – сцинтилляционные детекторы быстрых нейтронов с разделным светосбором; 4 – детекторы тепловых нейтронов

В качестве детектора тепловых нейтронов использовалось допированное  ${}^6\text{Li}$  стекло (цилиндр диаметром 3" и высотой 3"). Отбирались только события, в которых прилетевший нейтрон сначала регистрировался в сцинтилляторе № 2, затем, возможно, в других сцинтилляторах, и в итоге, замедлившись, в детекторе тепловых нейтронов. Определялось число таких событий в зависимости от толщины сцинтиллятора № 1 (рис. 4).

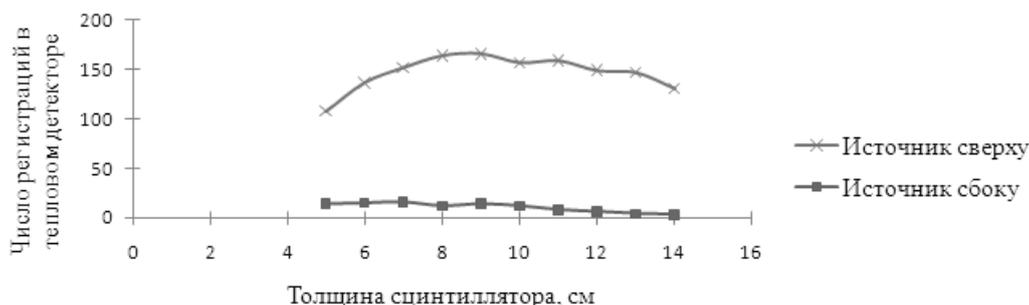


Рис. 4. Число зарегистрированных нейтронов в зависимости от толщины слоя сцинтиллятора № 1 для различных положений источника нейтронов деления

Из рисунка видно, что для выбранной геометрии вероятность регистрации нейтронов, прилетевших сбоку, составляет около 10% от вероятности регистрации нейтронов, прилетевших сверху. Такая позиционная чувствительность позволит отсекал большую часть нейтронов, пришедших не из досматриваемой области пространства.

Чтобы изучить работу предложенного нейтронного детектора в активном режиме (с включенным нейтронным генератором), было проведено моделирование регистрации нейтронов с энергией 14 МэВ, производимых нейтронным генератором. Эти результаты сравнивались с результатами моделирования для источника нейтронов делительного спектра ( ${}^{252}\text{Cf}$ ). Источники располагались в 1 м сверху над детектором. Моделирование проводилось для различных значений порогов регистрации нейтронов сцинтилляторами (пороги брались одинаковыми для всех сцинтилляторов). Строились зависимости числа зарегистрированных нейтронов от толщины слоя сцинтиллятора № 1 (рис. 5).

Из зависимостей видно, что величина порога мало влияет на регистрацию нейтронов с энергией 14 МэВ, но сильно влияет на регистрацию нейтронов делительного спектра. Для эффективной работы детектора необходимо как можно лучше регистрировать нейтроны делительного спектра, и как можно меньше регистрировать нейтроны с энергией 14 МэВ от нейтронного генератора. Следовательно, желательно иметь низкий энергетический порог регистрации нейтронов сцинтилляторами. Оптимальная толщина слоя сцинтиллятора № 1, при которой нейтроны делительного спектра регистрируются с максимальной вероятностью, а нейтроны с энергией 14 МэВ – не с максимальной, составляет около 8 см (для органического сцинтиллятора с формулой  $(\text{CH})_n$  и с плотностью около  $1 \text{ г/см}^3$ ).

Дополнительное подавление нейтронов от нейтронного генератора может быть достигнуто путем расположения детектора так, чтобы эти нейтроны попадали в детектор сбоку, а нейтроны от ЯМ – со стороны сцинтиллятора № 2.

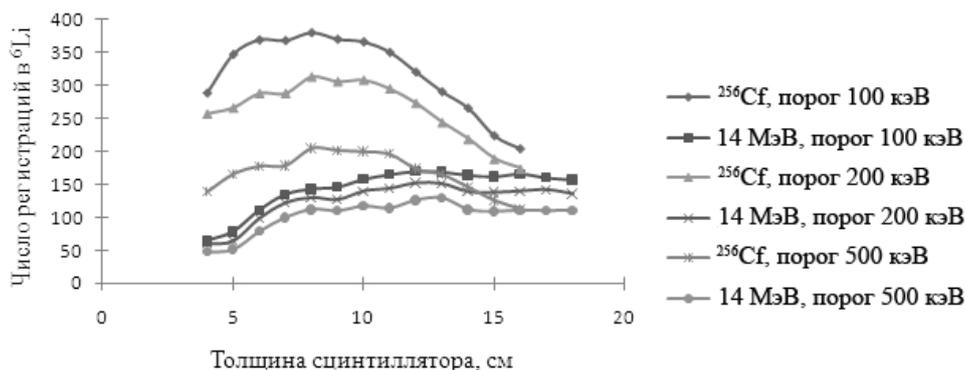


Рис. 5. Зависимости числа зарегистрированных нейтронов от толщины слоя сцинтиллятора № 1 для различных источников нейтронов и различных энергетических порогов регистрации нейтронов в сцинтилляторах

### Выбор типа детектора тепловых нейтронов

На сегодняшний день в мире ощущается острый дефицит  $^3\text{He}$  (в течение последних нескольких лет цены на  $^3\text{He}$  сильно подскочили). По предварительным оценкам спрос на  $^3\text{He}$  составляет около 65000 литров в год, а общее производство (в основном сосредоточенное в США и России) составляет всего около 20000 литров в год. В США этот дефицит называют «национальным кризисом», и сообщают о нем даже в общедоступной печати [4]. В связи с этим предлагается в качестве детектора тепловых нейтронов использовать коммерчески доступные стекла, допированные изотопом  $^6\text{Li}$ . Было проведено моделирование, в котором сравнивались эффективности регистрации нейтронов в  $^3\text{He}$  и  $^6\text{Li}$ . Результаты (рис. 6) свидетельствуют о том, что детектор на основе  $^6\text{Li}$  (цилиндр диаметром 3" и высотой 3") примерно вдвое превосходит по эффективности три стандартные трубки с  $^3\text{He}$ , которые можно разместить в том же объеме (рис. 3).

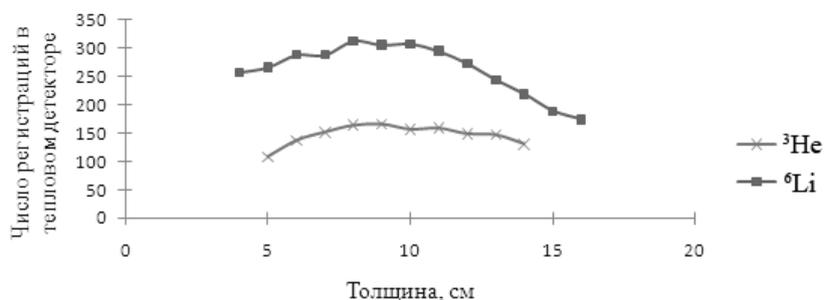


Рис. 6. Сравнение детекторов тепловых нейтронов на основе газа  $^3\text{He}$  и стекла, допированного  $^6\text{Li}$  (6%)

### Дальнейшее развитие модели

Представленные результаты получены в упрощенной модели, не учитывающей процесс преобразования выделенной в сцинтилляторах энергии в электрические сигналы, с которыми далее имеет дело система обработки данных. Для корректного учета этого преобразования в существующую модель будут добавлены модули по расчету преобразования выделенной энергии в фотоны (световыход), распространения света в системе сцинтилляторов и его сбора на фотокатодах ФЭУ (светосбор), и преобразование собранного света в электрические импульсы на выходе ФЭУ. В рамках этой расширенной модели существующий модуль MCNP-PoliMi будет определять для каждого события координаты и времени взаимодействия нейтрона со сцинтилляторами, и выделяемую в каждом из этих взаимодействий энергию.

### Заключение

Приведены результаты математического моделирования низкофонового позиционно-чувствительного детектора. На основе этих результатов предложена цилиндрическая форма внешнего сцинтиллятора с толщиной стенки порядка 8 см. Предложенная геометрия детектора позволит определять направление на источник нейтронов и подавлять фоновые нейтроны, приходящие с других направлений.

## Литература

1. The Black Sea Experiment, science and global security. – 1990. – V. 1. – № 3–4. – P. 323–333.
2. Gordon M.S., Goldhagen P., Rodbell K.P., Zabel T.H., Tang H.H.K., Clem J.M., Bailey P. Measurement of the flux and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. – V. 51. – Is. 6. – P. 3427–3434.
3. Gozani T. The role of neutron based inspection techniques in the post 9/11/01 era // 5th Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications. NIM B. – 2004. – V. 213. – P. 460–463.
4. Wald M.L. Shortage Slows a Program to Detect Nuclear Bombs // The New York Times. – 2009, November 22.

*Постоварова Дарья Владимировна* – Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, младший научный сотрудник, darya.bayandina@gmail.com

УДК 517.946:518.12:538.3:538.5

## ОБ УЧЕТЕ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОВМЕСТНОМ МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.М. Ступаков, М.М. Корсун, М.Э. Рояк

Рассматриваются два способа учета источников поля в математической модели, используемой при моделировании трехмерных электромагнитных процессов совместным методом конечных и граничных элементов. Один из способов основан на введении в расчетную область поверхности разрыва полного скалярного потенциала, во втором используется представление напряженности магнитного поля в виде суммы градиента неполного потенциала и напряженности поля токовых обмоток.

**Ключевые слова:** метод конечных и граничных элементов, электромагнитные процессы.

### Введение

Одним из эффективных методов моделирования трехмерных нестационарных электромагнитных процессов в технических конструкциях с высоким контрастом проводимостей и магнитных проницаемостей является векторный метод конечных элементов. Основной проблемой применения этого метода является плохая сходимость итерационных методов решения получаемых систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Поэтому для решения нестационарных задач электромагнетизма, в которых электромагнитное поле формируется за счет вихревых токов, циркулирующих в отдельных объектах с высокой проводимостью, окруженных непроводящей средой, более эффективными являются вычислительные схемы, основанные на совместном использовании векторного и скалярного магнитных потенциалов [1]. В тех случаях, когда непроводящая среда занимает существенную часть расчетной области, можно заметно снизить вычислительные затраты, используя для аппроксимации векторного потенциала векторный метод конечных элементов, а для скалярного потенциала метод граничных элементов [2]. В данной статье будут рассмотрены некоторые особенности учета источников электромагнитного поля при использовании такого подхода.

### Математическая модель

Система уравнений Максвелла, используемая для описания нестационарных электромагнитных процессов, при несущественности токов смещения принимает вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}^{\text{CT}} + \sigma \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$  – напряженность магнитного и электрического полей,  $\mathbf{J}^{\text{CT}}$  – вектор плотностей сторонних токов,  $\sigma$  – удельная проводимость среды,  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля, связанная с напряженностью соотношением  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

Среду, в которой изучается электромагнитное поле, разделим на две (возможно, неодносвязных) подобласти  $\Omega_{\sigma}$  и  $\Omega_0$ , причем в подобласти  $\Omega_0$  удельная проводимость  $\sigma = 0$ . В подобласти  $\Omega_{\sigma}$  индукцию магнитного поля  $\mathbf{B}^{\sigma}$  представим через вектор-потенциал  $\mathbf{A}$  с помощью соотношения

$$\mathbf{B}^{\sigma} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (4)$$

которое автоматически удовлетворяет уравнениям (2) и (3). Уравнение (1) с учетом соотношения (4) преобразуется к виду:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)+\sigma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}=\mathbf{J}^{\text{ст}}. \quad (5)$$

Представим в подобласти  $\Omega_0$  напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}^0$  в виде

$$\mathbf{H}^0=-\operatorname{grad}U, \quad (6)$$

где  $U$  – полный скалярный потенциал, тогда для выполнения уравнения (3) необходимо, чтобы скалярный магнитный потенциал  $U$  в области  $\Omega_0$  удовлетворял уравнению

$$-\operatorname{div}(\mu\operatorname{grad}U)=0. \quad (7)$$

Чтобы решение уравнений (5) и (7) стало решением исходной системы (1)–(3), на границе  $S$  между подобластями  $\Omega_0$  и  $\Omega_\sigma$  нужно выполнить условия непрерывности нормальных составляющих  $\mathbf{B}$  и тангенциальных составляющих  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{B}^0\cdot\mathbf{n}=\mathbf{B}^\sigma\cdot\mathbf{n}, \quad \mathbf{H}^0\times\mathbf{n}=\mathbf{H}^\sigma\times\mathbf{n}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{n}$  – любая нормаль к рассматриваемой границе  $S$ .

Обратим внимание, что для корректности рассматриваемой модели требуется, чтобы внутри области скалярного потенциала нельзя было бы провести такой замкнутый контур, что интеграл от всех токов, пересекающих натянутую на этот контур поверхность, был бы не равен нулю [1]. Это ограничение создает некоторые дополнительные сложности, связанные как с учетом сторонних, так и с учетом вихревых токов.

Для вихревых токов эта проблема возникает в том случае, если в конструкции имеется замкнутый контур, в котором будет наводиться ток, интегральное значение которого неизвестно. Для разрыва получающегося в таком случае контура обхода ненулевого тока в скалярном потенциале приходится исключать часть расчетной области из  $\Omega_0$  и вводить ее подобласть  $\Omega_\sigma$ , задавая в ней нулевую проводимость. Проблема учета сторонних токов связана с тем, что во многих практических задачах известен полный ток в некотором контуре – источнике поля. При этом распределение тока в самом контуре часто либо вообще не представляет интереса, либо известно. Рассмотрим один из способов учета такого источника поля. В подобласти  $\Omega_0$  зададим поверхность  $S^P$  разрыва скалярного магнитного потенциала так, чтобы обеспечить отсутствие контура, по которому можно было бы обойти ненулевой ток. Зададим во всех точках поверхности  $S^P$  скачок скалярного потенциала, равный известному суммарному току  $I$  в контуре:

$$U|_{S^P_-}=U|_{S^P_+}+I, \quad (9)$$

где  $U|_{S^P_-}$  и  $U|_{S^P_+}$  – значения функции  $U$  с разных сторон поверхности  $S^P$ . Для потенциала  $U$  потребуем выполнение дополнительного условия:

$$\mu^-\frac{\partial U}{\partial\mathbf{n}}\Big|_{S^P_-}=\mu^+\frac{\partial U}{\partial\mathbf{n}}\Big|_{S^P_+}, \quad (10)$$

где  $\frac{\partial U}{\partial\mathbf{n}}\Big|_{S^P_-}$  и  $\frac{\partial U}{\partial\mathbf{n}}\Big|_{S^P_+}$  – значения нормальных составляющих  $\mathbf{H}$  с разных сторон поверхности  $S^P$ ,  $\mu^+$  и

$\mu^-$  – значения коэффициента  $\mu$  с разных сторон поверхности  $S^P$ . Выполнение условия (10) обеспечивает непрерывность нормальных составляющих индукции  $\mathbf{B}$  на  $S^P$ , непрерывность касательных составляющих  $\mathbf{H}$  на  $S^P$  следует из (9). Некоторым недостатком этого способа учета токового контура является то, что он позволяет простым способом учитывать только поверхностно распределенные токи – в этом случае саму область токового контура можно не включать в расчетную область, задав на поверхности контура краевое условие отсутствия нормальной составляющей магнитной индукции. Если же токи не являются поверхностными и их распределение существенно, то сам контур приходится включить в подобласть  $\Omega_\sigma$ .

Рассмотрим другой способ учета источников электромагнитного поля в совместной векторно-скалярной постановке, основанный на использовании неполного скалярного потенциала. Представим в подобласти  $\Omega_0$  напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}^0$  не в виде (6), а в виде

$$\mathbf{H}^0=\mathbf{H}^c-\operatorname{grad}U, \quad (11)$$

где  $\mathbf{H}^c$  – напряженность магнитного поля от токов  $\mathbf{J}^{ct}$  в вакууме (которая может быть вычислена, например, по формуле Био-Савара [1]), а  $U$  – неполный скалярный магнитный потенциал. Тогда для определения  $U$  необходимо вместо однородного уравнения (7) решать неоднородное уравнение

$$-\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) = -\operatorname{div}(\mu \mathbf{H}^c). \quad (12)$$

Однако чаще всего в подобласти  $\Omega_0$  магнитная проницаемость совпадает с магнитной проницаемостью вакуума, поэтому в (12) правая часть становится нулевой. В этом случае  $\mathbf{H}^c$  необходимо учитывать только в уравнениях (8). Заметим, что при необходимости введения в подобласть  $\Omega_0$  непостоянного значения магнитной проницаемости (например, при моделировании конструкций с шихтованным железом, в котором не создаются вихревые токи), можно использовать и более сложную модель в  $\Omega_0$  на основе двух скалярных потенциалов [1].

### Совместное использование векторного метода конечных элементов и метода граничных элементов

Аппроксимация по времени уравнения (5) приводит к векторному уравнению

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}\right) + \gamma \mathbf{A} = \mathbf{F}, \quad (13)$$

где коэффициент  $\gamma$  и вектор-функция  $\mathbf{F}$  определяются разностной схемой аппроксимации по времени.

Пусть  $\mathbf{n}$  – внешняя по отношению к  $\Omega_\sigma$  нормаль к границе  $S$  между подобластями  $\Omega_0$  и  $\Omega_\sigma$ . Тогда, учитывая представление индукции и напряженности через векторный полный и неполный скалярный потенциалы, условия непрерывности (8) принимают вид

$$\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \times \mathbf{n}\right)\Big|_S = \left((\mathbf{H}^c - \operatorname{grad} U) \times \mathbf{n}\right)\Big|_S, \quad (14)$$

$$\mu \cdot \left(\mathbf{H}^c \cdot \mathbf{n} - \frac{\partial U}{\partial n}\right)\Big|_S = (\operatorname{rot} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n})\Big|_S, \quad (15)$$

где  $\mathbf{H}^c \equiv 0$  при использовании полного скалярного потенциала.

Будем считать, что граница расчетной области  $\Omega$  либо может быть бесконечно удаленной, либо на ней в качестве краевых условий могут быть заданы краевые условия равенства нулю касательных, либо нормальных составляющих магнитной индукции. Обозначим через  $S^\tau$  участок границы, на котором задано условие равенства нулю касательных составляющих  $\mathbf{H}$ , а через  $S^n$  – участок границы расчетной области  $\Omega$ , на котором задано условие равенства нулю нормальных составляющих  $\mathbf{B}$ .

Введем следующие обозначения для скалярных произведений, соответствующие интегралам по объему и по границе:  $(v, w)_V = \int_V v \cdot w dV$ ,  $(v, w)_\Gamma = \int_\Gamma v \cdot w d\Gamma$ . С учетом введенных обозначений эквивалентная вариационная постановка для векторного уравнения (13) и условия сопряжения (14) принимает вид [1]:

$$\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}, \operatorname{rot} \Psi\right)_{\Omega_\sigma} + (\operatorname{grad} U \times \mathbf{n}, \Psi)_S + (\gamma \mathbf{A}, \Psi)_{\Omega_\sigma} = (\mathbf{F}, \Psi)_{\Omega_\sigma} + (\mathbf{H}^c \times \mathbf{n}, \Psi)_S. \quad (16)$$

Уравнение (16) должно выполняться для  $\forall \Psi \in H_0^{rot}(\Omega_\sigma)$ , где под  $H_0^{rot}(\Omega_\sigma)$  понимается пространство вектор-функций  $\Psi$ , определенных на  $\Omega_\sigma$ , для которых функция  $\operatorname{rot} \Psi$  является суммируемой с квадратом, при этом касательные всех функций  $\Psi$  должны быть равны нулю на границе  $S^n \cap S^\sigma$  ( $S^\sigma$  – граница области  $\Omega_\sigma$ ).

В том случае, когда коэффициент магнитной проницаемости в области  $\Omega_0$  является постоянным, уравнение (7) эквивалентно уравнению Лапласа

$$-\operatorname{div}(\operatorname{grad} U) = 0, \quad (17)$$

тогда, используя представление решения этого уравнения в виде суммы потенциалов, можно получить граничные интегральные уравнения и построить аппроксимацию скалярного потенциала в подобласти  $\Omega_0$  с помощью метода граничных элементов [2].

Используя оператор Стеклова-Пуанкаре  $\mathcal{S}$ , который связывает значения потенциала на границе и потоки через границу, запишем вариационное уравнение соответствующее условию (16)

$$(-\mu \mathbf{S}U|_{S^0}, v)_{S^0} = (\text{rot } \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} - \mu \mathbf{H}^c \cdot \mathbf{n}, v)_{S^0}, \quad \forall v \in H_0^1(S^0), \quad (18)$$

где  $S^0$  – граница области  $\Omega_0$ ,  $H_0^1(S^0)$  – гильбертово пространство скалярных функций  $v$ , определенных на границе  $S^0$ , имеющих интегрируемые с квадратом первые производные и равные нулю на границе  $S^c \cap S^0$  (более подробно вывод уравнения (18) приводится в [3]).

Построив дискретные аппроксимации уравнений (16) и (18), получим систему линейных уравнений, решение которой позволяет найти искомые потенциалы  $U$  и  $\mathbf{A}$ .

### Результаты численного моделирования

На примере решения модельной задачи проиллюстрируем возможности применения рассмотренных методов учета источников тока в совместном методе конечных и граничных элементов. Пусть в расчетной области содержится объект в виде усеченного металлического цилиндра толщиной 5 и радиусом 50 мм с удельной электропроводностью  $\sigma = 10^7$  См/м и магнитной проницаемостью  $\mu = 10$ . Источником возбуждения электромагнитного поля является петля, имеющая радиус 25 мм и расположенная соосно с объектом на высоте 10 мм над ним. В начальный момент времени токовый импульс отсутствует, в следующие моменты равен 1 А. Поскольку задача является двумерной в цилиндрических координатах, то результаты трехмерного моделирования будем сравнивать с двумерным решением, которое получено с погрешностью, не превышающей 0,1%.

Будем измерять  $z$ -компоненту магнитной индукции  $\mathbf{B}$  в момент времени  $t = 50$  мкс. Линия измерений расположена на высоте 5 мм над цилиндром вдоль оси  $y$  (рис. 1, 2).

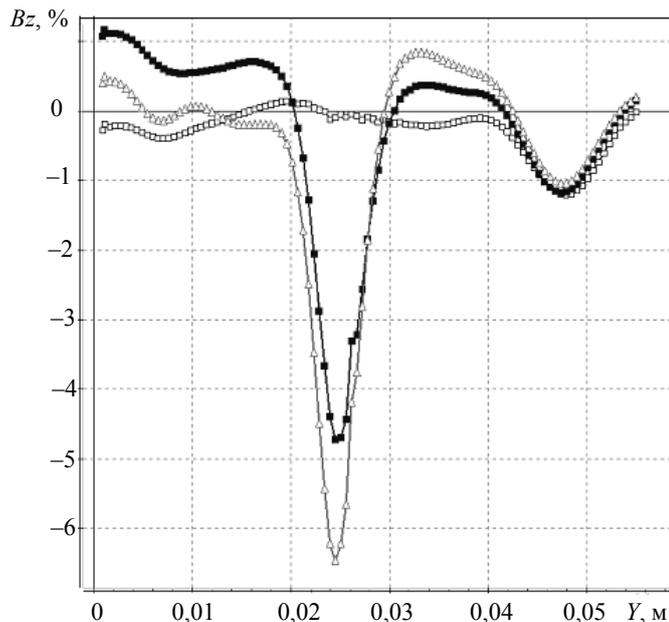


Рис. 1. Погрешность расчетов  $B_z$  на грубых сетках:  $\triangle$  – результаты, полученные при непосредственном задании источника в векторном потенциале;  $\blacksquare$  – результаты, полученные при учете источника тока на основе задания поверхности разрыва  $S^p$ ;  $\square$  – результаты, полученные при учете источника тока на основе метода с неполным потенциалом

На представленных графиках показана погрешность расчетов  $z$ -компоненты магнитной индукции  $\mathbf{B}$  относительно двумерного решения. Анализ результатов показывает, что реализованные методы дают погрешность не более 7% на достаточно грубых сетках, дальнейшее дробление сеток уменьшает погрешность до 1,5%. При этом метод, основанный на использовании неполного потенциала, дает наименьшую погрешность при меньших вычислительных затратах за счет отсутствия неизвестных, требуемых для дискретизации источника.

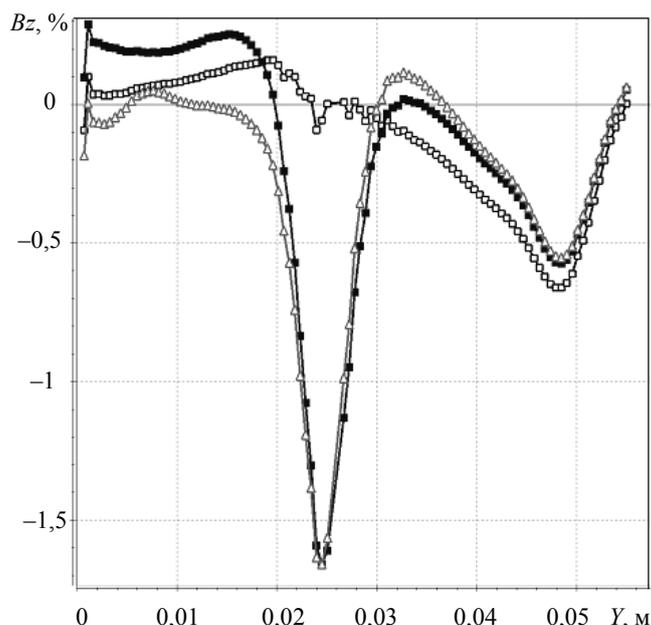


Рис. 2. Погрешность расчетов  $Bz$  на подробных сетках:  $\triangle$  – результаты, полученные при непосредственном задании источника в векторном потенциале;  $\blacksquare$  – результаты, полученные при учете источника тока на основе задания поверхности разрыва  $S^P$ ;  $\square$  – результаты, полученные при учете источника тока на основе метода с неполным потенциалом

### Заключение

Анализируя рассмотренные модели и вариационные постановки, заметим, что учет источников тока с использованием неполного скалярного потенциала технологически удобнее при использовании граничных элементов, поскольку в отличие от полного скалярного потенциала не требует введения дополнительных неизвестных в подобласти с граничными элементами на поверхности разрыва скалярного потенциала. Дополнительные же вычисления поля  $\mathbf{H}^C$  требуются только на границе подобластей  $\Omega_0$  и  $\Omega_\sigma$ , что не приводит к существенному увеличению общих вычислительных затрат на решение задачи.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### Литература

1. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 869 с.
2. Steinbach O. Numerical Approximation Methods for Elliptic Boundary Value Problems. – New York: Springer Science, 2008. – 388 p.
3. Корсун М.М., Ступаков И.М., Рояк М.Э. Об использовании граничных элементов при моделировании электромагнитных процессов с существенным влиянием вихревых токов // Научный вестник Новосибирского ГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 101–109.

**Ступаков Илья Михайлович** – Новосибирский государственный технический университет, аспирант, istupakov@gmail.com  
**Корсун Мария Михайловна** – Новосибирский государственный технический университет, аспирант, maria.korsun@gmail.com  
**Рояк Михаил Эммануилович** – Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор, royak@fpm.ami.nstu.ru

УДК 004.4'22:67.05

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПАКЕТОВ ЗАКАЗОВ  
В УСЛОВИЯХ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

А.А. Саломатина, И.А. Субботин, Е.И. Яблочников

Исследованы различные подходы к решению задачи анализа заказа в условиях кооперационной среды. Рассматривается возможность применения классификатора и экспертной системы в алгоритме формирования пакетов заказов и выбора соисполнителей.

**Ключевые слова:** информационно-управляющая среда, анализ заказа, пакет заказов, классификатор, экспертная система.

**Введение**

Процесс производства перспективных приборов и систем требует интеграции усилий предприятий различных отраслей промышленности. В связи с тем, что сейчас все вопросы проектирования решаются на уровне виртуальных моделей, совместная деятельность организаций невозможна без использования специализированной информационно-управляющей среды (ИУС) [1]. Решение задачи анализа заказа на изготовление изделия является одной из основных функций ИУС. Тем не менее, в настоящий момент не существует готового решения данной проблемы [2–4]. Предлагается следующая методология анализа и формирования пакетов заказов.

**Разработка алгоритма анализа заказа**

Взаимодействие с заказчиком (принятие заказов, ведение переговоров, подписание документов на генеральный подряд, а также ряд других функций) осуществляет так называемый проектный офис. Документация, передаваемая от заказчика, в зависимости от вида заказа (НИОКР, проектирование конструкторской документации (КД), производство приборов и др.) может представлять собой техническое задание, эскизный проект, конструкторскую документацию и т.п. Задача проектного офиса на данном этапе заключается в своевременном и корректном доведении информации о поступившем заказе до потенциальных исполнителей. Для этого все сведения о заказе необходимо опубликовать в ИУС, чтобы зарегистрированные подрядчики смогли ознакомиться с параметрами заказа. Кроме того, следует предусмотреть рассылку уведомлений о поступившем заказе участникам кооперационной среды: полностью полагаться на то, что зарегистрированные организации будут постоянно отслеживать новые предложения, будет неправильным.

В связи с этим возникают следующие вопросы: какую информацию о заказе, в каком виде и каким организациям необходимо направить на ознакомление? Способы решения подобных вопросов являются определяющими для разработки методологии ведения проектов в ИУС. На данном этапе требуется установить, кто возьмет на себя задачу анализа заказа: проектный офис или зарегистрированные участники.

Допустим, задача анализа заказа со стороны проектного офиса никак не решается: регистрация заказа сопровождается рассылкой уведомлений всем зарегистрированным в ИУС предприятиям. Каждый участник кооперации должен в таком случае лично проанализировать заказ и определить для себя, сможет ли он принять участие в реализации совместного проекта. О своем решении организация должна сообщить проектному офису, который, в свою очередь, заинтересован собрать подобную информацию от всех участников кооперации за предельно короткие сроки. Учитывая, что специализация у компаний может быть различной, далеко не все предприятия будут в состоянии адекватно оценить весь проект, что повлечет за собой необходимость согласования и уточнения вопросов с проектным офисом.

Выявлены следующие отрицательные стороны рассмотренного подхода:

- зарегистрированные участники, не заинтересованные в реализации заказа, будут воспринимать информацию о поступившем проекте, как спам, что в результате приведет к негативному отношению к ИУС;
- специалисты предприятий заняты текущей деятельностью и не всегда смогут оперативно выделять время на анализ поступившего заказа;
- на анализ всего проекта в целом у потенциальных исполнителей потребуется гораздо больше времени, чем, если бы задача анализа заказа решалась проектным офисом централизованно;
- задача анализа предложений от потенциальных исполнителей не может быть решена автоматически, так как поступающую информацию невозможно будет формализовать.

Данные обстоятельства указывают на необходимость осуществить выбор в пользу подхода, когда анализом всего проекта в целом первично занимается проектный офис. Результатом решения данной задачи должна стать направленная рассылка информации о заказе потенциальным исполнителям в зависимости либо от сферы деятельности организаций, либо от располагаемых ресурсов. Для этого необходимо определить, какие предприятия способны выполнить ту или иную работу по проекту с учетом имеющегося уровня сложности заказа. Другими словами, осуществить направленный поиск партнеров для производства требуемых изделий. Автоматизированное решение данной задачи возможно при сопоставлении характеристик заказа с характеристиками услуг соисполнителей. Ресурсы, которыми располагают организации, определяют оказываемые услуги. Следовательно, анализ услуг можно осуществить по атрибутам описанных в ИУС ресурсов. В свою очередь, параметры заказа, такие как вид обработки, габариты деталей, требуемая точность и др., могут рассматриваться как основные свойства заказа. Таким образом, сопоставив требования заказа и характеристики оборудования, можно с большой степенью достоверности определить потенциальных исполнителей, ресурсы которых позволят реализовать заказ.

С другой стороны, сопоставление характеристик заказа и оказываемых услуг можно также осуществить, если ввести единую классификацию для обоих объектов по видам работ. Точность результатов поиска соисполнителей будет напрямую зависеть от количества видов объектов в классификаторе.

Использовать на практике первый подход возможно лишь в том случае, когда сформулированы однозначные требования к выполняемым операциям. Некоторые из таких характеристик можно определить по результатам анализа КД, при наличии же технологической документации (ТД) не составит особого труда выявить параметры необходимых ресурсов. Но рассчитывать на то, что заказчик в качестве исходных требований к заказу предоставит КД и ТД, является в корне неверным. В лучшем случае, оператор проектного офиса будет располагать КД. Но зачастую, заказчик представляет исходные требования в виде эскиза проекта (что тоже бывает не всегда), а также перечня функциональных свойств, которыми должно обладать изделие. Не располагая подробным описанием заказа, оператор вряд ли сможет определить требования к выполняемым операциям.

### **Построение алгоритма анализа заказа**

Таким образом, алгоритм анализа заказа должен быть построен, исходя из ответа на вопрос: «Какую информацию, и с какой степенью детализации оператор должен ввести в систему, чтобы определить исполнителей?». Если рассматривать ситуацию, когда оператор не располагает КД и ТД, то для анализа заказа и выявления потенциальных соисполнителей можно использовать классификатор заказов, в котором структурирование объектов происходит только по обобщенным признакам. Тем не менее, классификатор должен отражать различные аспекты рассматриваемых объектов. Поскольку предполагается, что работать с классификатором должен оператор, не будучи универсальным экспертом во многих областях, классификатор, с одной стороны, должен быть легко воспринимаемым, а с другой – разработан с определенной степенью подробности. Фасетный метод классификации позволит обеспечить достаточную емкость и необходимую полноту описания объектов.

Заказы в классификаторе целесообразно структурировать по трем признакам: по видам заказа, по специфике заказа и по отношению к этапам жизненного цикла (ЖЦ). Рассмотрим каждый аспект в отдельности. Заказы могут поступать в виде заказов на услуги и в виде заказов на работы. Под услугами будем понимать разработку документации, например, проектирование конструкторской документации, создание интерактивных технических руководств и др. Таким образом, предоставление услуг не предполагает наличия у предприятий производственного оборудования. Данный момент еще раз подтверждает вывод о том, что на первоначальном этапе анализ заказа не следует осуществлять с точки зрения оборудования. Заказ на работы подразумевает заказ на изготовление изделия. В случае отсутствия КД со стороны заказчика, заказ будет отнесен и к услугам, и к работам.

Заказ на работы, также как и заказ на услуги, имеет отношение к структуре изделия. Любое изделие можно представить как совокупность следующих элементов: механическая, оптическая, электрическая и электротехническая составляющие. Следовательно, заказы следует также классифицировать и по специфике. В то же время можно провести параллель между процессами реализации заказа и этапами ЖЦ: проектирование конструкторской документации, технологическая подготовка производства, производство, сборка, операции контроля и измерения. Учет данного аспекта при анализе заказа и определении множества потенциальных соисполнителей позволит получить более точные результаты.

Фасетный способ классификации объектов позволяет представить структурную формулу объектов в следующем виде:

$$O = (O_i, O_j, O_k),$$

где  $O_i$  – идентификатор вида заказа;  $O_j$  – идентификатор специфики заказа;  $O_k$  – идентификатор этапов ЖЦ.

«Обобщенность» классифицирующих признаков приводит к укрупненным пакетам заказов. Зачастую, большинство предприятий, не обладая всеми необходимыми ресурсами, будут брать на себя ответ-

ственность за весь пакет заказа, рассчитывая вступить в дальнейшую кооперацию с другими компаниями. Как правило, «вторичная» кооперация будет возникать на этапе технологической подготовки производства (ТПП): например, при изготовлении технологической оснастки. В таком случае организации должны самостоятельно осуществить поиск соисполнителей без участия проектного офиса. Очевидно, что классификатор заказов не будет полезен для решения данной задачи, поскольку не позволяет учитывать отдельные технологии предприятий. Анализируя характеристики описанных в ИУС ресурсов компаний, организации могут с большой степенью вероятности определить подрядчиков, ресурсы которых позволят реализовать заказ «второго уровня».

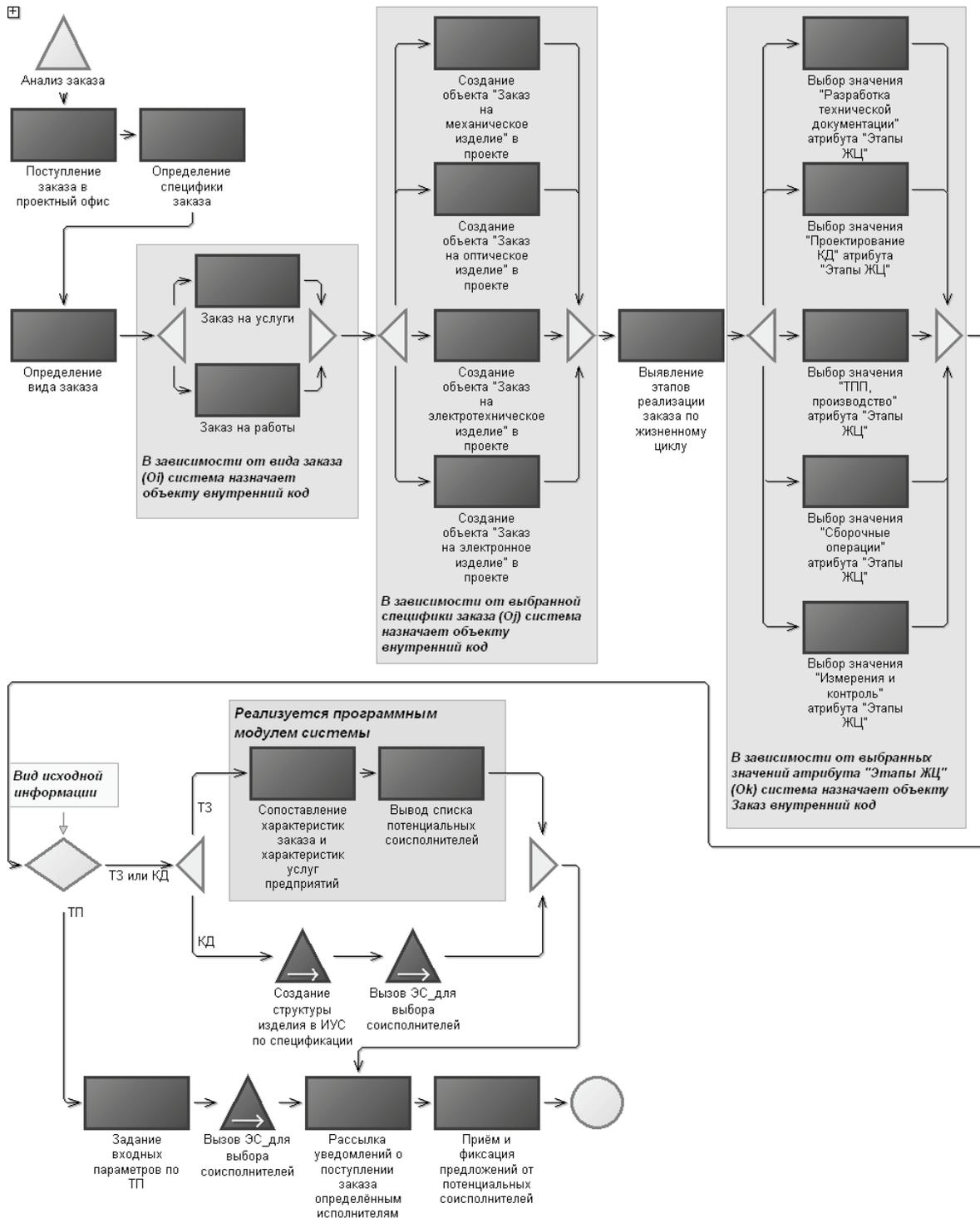


Рисунок. Алгоритм анализа заказа

Действия, выполняемые предприятиями для поиска соисполнителей, можно формализовать, представив их в виде базы правил. Такую базу правил можно использовать в качестве основы для разработки модуля, позволяющего определять соисполнителей по анализу характеристик оборудования. Модуль оценки параметров технологий – это своего рода экспертная система (ЭС), предназначенная для выбора оборудования по конкретным значениям требований к выполняемым операциям: например, необходимая точность, габаритные размеры, используемый материал и другие. ЭС, с одной стороны, должна учитывать различные характеристики оборудования, но с другой стороны – обеспечивать стабильное функционирование ИУС. В связи с этим перечень требований к операциям должен быть минимально необходимым для подбора ресурсов.

Некоторые параметры операций могут быть определены, исходя из анализа КД. На основе данной информации также можно осуществить поиск соисполнителей. Правила, по которым будет выполняться анализ ресурсов организаций на основе информации из КД, следует задать в ЭС.

Алгоритм анализа заказа согласно описанному подходу будет выглядеть так, как представлено на рисунке.

### **Заключение**

Использование классификатора вкупе с экспертной системой в зависимости от исходных данных предоставляет возможность анализировать заказ с различной степенью детализации. Данная методология позволяет с максимальной эффективностью использовать информацию о заказе. В настоящее время ведется разработка алгоритмов конфигурирования предложений от потенциальных исполнителей и исследование практического применения описанной методики.

### **Литература**

1. Колесников Ю.Л., Куликов Д.Д., Сокуренок Ю.А., Фомина Ю.Н., Яблочников Е.И. Разработка и реализация модели непрерывного повышения квалификации педагогических кадров российских технических вузов в системе «вуз – инжиниринговый центр – организация» // Труды второго Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – С. 38–43.
2. Фомина Ю.Н., Саломатина А.А., Яблочников Е.И. Оптимизация конфигурирования и распределения заказов виртуального предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – Т. 28. – С. 151–155.
3. Фомина Ю.Н. Исследование алгоритмов оптимизации конфигурирования и распределения заказов при решении задач ТПП в среде виртуального предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Т. 38. – С. 187–196.
4. Фомина Ю.Н., Яблочников Е.И. Методы распределения заказов на выполнение ТПП в среде виртуального предприятия // Материалы конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». – СПб: ИПМАШ РАН, 2007. – С. 46.

<i>Саломатина Анна Алексеевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Salomatina.Anna@gmail.com
<i>Субботин Игорь Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Soobboteen@gmail.com
<i>Яблочников Евгений Иванович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, eij@mail.ifmo.ru

УДК 623.5

## **ИМИТАЦИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В ЦЕХОВЫХ УСЛОВИЯХ**

**В.А. Валетов, А.В. Красильников**

Рассмотрены схемотехнические решения гидродинамического стенда и его тормозного устройства оригинальных конструкций для отработки подводных пусковых модулей преимущественно малогабаритных необитаемых подводных аппаратов. Приведены соотношения, позволяющие производить оценку влияния стенда на работу пусковых устройств (ПУ). С помощью разработанной расчетной модели доказана работоспособность тормозного устройства в большом диапазоне скоростей входа изделия в тормозную трубу.

**Ключевые слова:** подводный аппарат необитаемый автономный, пусковое устройство, испытание, гидродинамический стенд, коэффициент соответствия, тормозное устройство.

## Введение

Сегодня в мире высоких технологий бурно развивается качественно новое направление – автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), самоходные и несамоходные, в том числе миниатюрные (калибром до 10") различного назначения. Описываемые технические решения составляют новый класс подводных технических объектов, и поэтому важнейшее значение при их проектировании и внедрении в производство имеют вопросы всесторонних испытаний, отработки их опытных образцов и предъявления готовой продукции заказчику и потребителю. Но на сегодняшний день в России (и в мире) практически отсутствуют публикации по проблемам отработки новых образцов подводных аппаратов (ПА), имеющих калиброванную часть, а также их пусковых систем.

Создание и испытания перспективных образцов морской техники в натуральных условиях действующих надводных и подводных кораблей неизбежно влекут за собой значительные временные и финансовые траты, а также, зачастую, невозможность своевременного планирования проводимых исследований из-за постоянно изменяющихся внешних факторов. Поэтому создание специализированных испытательных гидродинамических стендов (ГДС), позволяющих многократно имитировать работу проектируемого устройства в воспроизводимых условиях, максимально приближенных к естественным, является одной из приоритетных задач при решении вышеупомянутых проблем.

ГДС создаются для выполнения физических экспериментов с движущимися объектами в воде, в частности для исследования взаимодействия жидкости с твердыми телами. Примером могут служить ГДС по определению гидродинамических характеристик крыльевых систем (коэффициентов присоединенных масс, лобового сопротивления, подъемной и боковой сил, их поля, моментов и демпфирующих сил в зависимости от углов атаки и чисел Рейнольдса и Фруда). Требования к ГДС обуславливаются техническими характеристиками испытываемых устройств и условиями их эксплуатации.

В настоящей статье рассматриваются вопросы создания испытательного гидродинамического стенда, разработанного применительно к заборным транспортно-пусковым модулям (ТПМ), обеспечивающим использование с различных носителей АНПА с калиброванным корпусом.

## Конструктивно-технологическая схема стенда

На рис. 1 приведено схематическое решение такого ГДС [1–3].

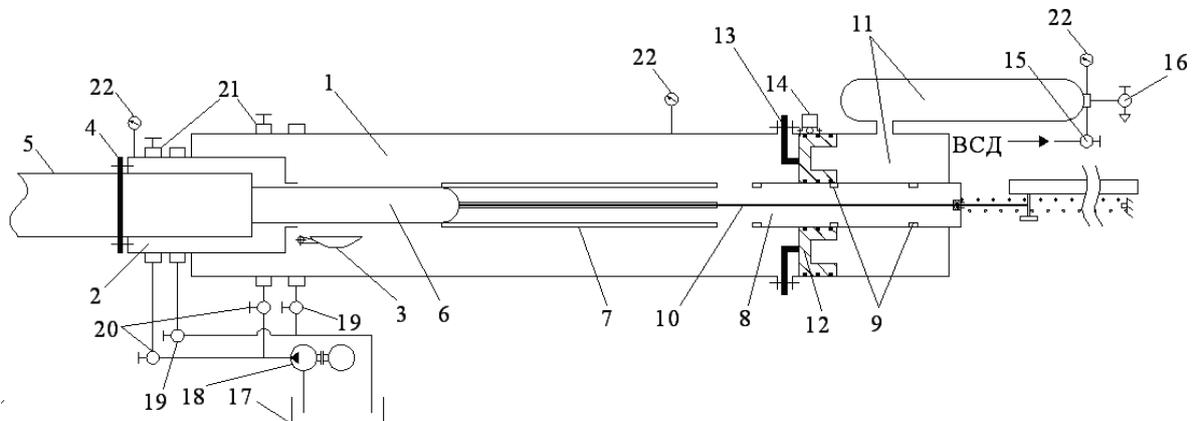


Рис. 1. Конструктивная схема ГДС: 1 – камера-имитатор заборной среды; 2 – шлюзовая полость (ШП); 3 – крышка ШП; 4 – быстроразъемный узел крепления ПУ; 5 – ПУ; 6 – ПА; 7 – направляющий аппарат; 8 – тормозное устройство; 9 – кольца обтюрации переменного сечения; 10 – шток измерителя перемещения ПА; 11 – демпфирующая газовая (воздушная) полость; 12 – поршень; 13 – упор начального положения поршня; 14 – сигнализатор начального положения поршня; 15 – клапан наполнения; 16 – клапан сброса давления; 17 – сливной бак; 18 – насос; 19 – клапаны осушения; 20 – клапаны заполнения; 21 – клапаны вентиляции; 22 – манометры

Гидродинамический стенд для проведения испытаний ТПМ подводных изделий выполнен в виде изолированного от атмосферного воздуха устройства, корпус которого представляет из себя цилиндрической формы заполненную водой камеру. Одна сторона камеры снабжена отделяемой от нее переборкой с крышкой (расходной) (ШП), ко внешнему комингсу которой присоединяется ТПМ, подлежащий испытаниям. Узел крепления ТПМ выполнен быстроразъемным с возможностью полного (или частичного) расположения контейнера вне шлюзовой камеры. В противоположной стороне камеры установлена подвижная перегородка для разделения водного объема от воздушной демпфирующей емкости. Камера с

водой и ее расходная полость снабжены системой повышения давления, клапанами наполнения и осушения (слива воды), а также системой уравнивания давления в расходной полости с камерой.

Подвижная перегородка, разделяющая камеру с водой и демпфирующую воздушную емкость, выполнена в виде поршня, взаимодействующего с сигнализатором, установленным в камере и фиксирующим начальное положение поршня.

### Коэффициент соответствия стенда

При создании ГДС важнейшим вопросом является оценка его влияния на работу испытываемого пускового устройства. Для оценки влияния ГДС на работу ПУ необходимо математическое описание как его работы, так и явлений, происходящих в ГДС при пуске ПА. Основным отличием математической модели работы транспортно – пускового контейнера в реальных условиях от математической модели его работы в условиях гидродинамического стенда является наличие в последней, вместо постоянного заборного давления, переменного давления  $P_v$  воздушной демпфирующей полости, с помощью которой создается давление в камере ГДС, а также силы трения подводного аппарата об установленные в ней направляющие дорожки и видоизмененное значение гидродинамического сопротивления.

Основные допущения, принятые при составлении математической модели работы демпфирующей полости:

- воздух находится в равновесном состоянии, т.е. параметры газа в любой точке объема полости одинаковы;
- ввиду кратковременности, процесс в полости адиабатический, без теплообмена с внешней средой;
- рабочее тело – идеальный газ;
- жидкость несжимаема, наличием поршня пренебрегаем;
- во всех точках объема ГДС давление жидкости одинаково.

Динамика изменения состояния газа в демпфирующей полости для адиабатического процесса определяется следующими уравнениями.

Текущий объем воздушной подушки:

$$\frac{dV_B}{dt} = -v_{и} \cdot f_{и} - f_{кз} \cdot v_{кз},$$

где  $v_{и}$  – скорость изделия;  $f_{и}$  – площадь поперечного сечения изделия;  $v_{кз}$  – скорость воды в кольцевом зазоре обтюрации ТПМ;  $f_{кз}$  – площадь поперечного сечения кольцевого зазора.

Начальный (установочный) объем  $V_{в0}$  воздушной полости зависит от ее конструктивного оформления. Для снижения стоимости стенда основной объем воздушной полости может быть сформирован путем включения в него стандартного баллона, выпускаемого промышленностью. В настоящей работе для иллюстрационных расчетов условно принято, что такие баллоны имеют объемы  $V_{61} = 80$  литров и  $V_{62} = 140$  литров. Считая дополнительный конструктивный объем воздушной полости равным 40 литрам, примем  $V_{в1} = 0,12 \text{ м}^3$  и  $V_{в2} = 0,18 \text{ м}^3$ .

Текущее давление в воздушной полости:

$$P_B = P_{в0} \cdot \left( \frac{V_{в0}}{V_B} \right)^k,$$

где  $P_{в0}$  – начальное (установочное) давление;  $k = 1,41$  – коэффициент адиабаты.

Для расчетного исследования был принят ТПМ [2] с пневмогидравлическим поршневым преобразователем пускового импульса для ПА (в дальнейшем – изделия) массой 20 кг, имеющего калиброванную часть диаметром 127 мм.

Для рассматриваемого случая сила трения о направляющие дорожки, расположенные внутри камеры ГДС, принималась постоянной после подхода изделия к началу направляющего аппарата стенда:

$$N_{и} = \begin{cases} 0, & \text{при } l_{и} < 0,13 \\ 50, & \text{при } l_{и} \geq 0,13, \end{cases}$$

где  $l_{и}$  – путь, пройденный изделием.

По традиции для учета влияния стенда на работу ПУ введем понятие коэффициента соответствия  $\delta$ . Для его оценки находилось начальное давление  $P_{нс}$  в имитационной полости стенда, соответствующее гидростатическому давлению  $P_h$  на исследуемой глубине  $h$ , при котором расчетная выходная скорость  $v_{вых}$  изделия, полученная в условиях ГДС, соответствовала бы расчетной выходной скорости в натуральных условиях. Считая, что  $P_{нс} = \delta \cdot P_h$ , оценка  $\delta$  выполнялась путем итерационного расчетного подбора  $P_{нс}$  для фиксированных глубин  $h$  (15, 100, 150, 200, 250 и 300 м).

Итерационные расчеты проводились до получения  $v_{\text{вых}}$ , соответствующей натурным условиям с расхождением  $\Delta$  не более 2%. Расчетные значения  $\delta_{\text{ор}}$  показаны на рис. 2 фиксированными точками.

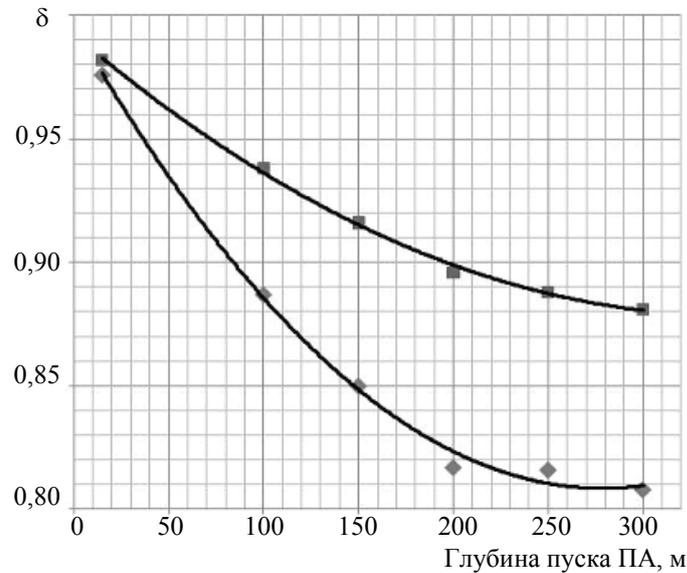


Рис. 2. Коэффициент соответствия ГДС:  $\blacklozenge$  – объем демпфирующей полости ГДС 0,12 м<sup>3</sup>;  $\blacksquare$  – объем демпфирующей полости ГДС 0,18 м<sup>3</sup>; — – аппроксимированные значения  $\delta_{\text{апп}}$  коэффициента соответствия ГДС

Так как пользоваться дискретными зависимостями при отработке пусковых устройств ПА затруднительно, полученные расчетные фиксированные значения  $\delta_{\text{ор}}$  коэффициента соответствия для объемов воздушной полости  $V_{\text{вы1}} = 0,12 \text{ м}^3$  и  $V_{\text{вы2}} = 0,18 \text{ м}^3$  были аппроксимированы квадратичными функциями  $\delta_{\text{апп}}$ , приведенными на рис. 2 в виде сплошных кривых. Проверка обоснованности такой аппроксимации значений  $\delta_{\text{ор}}$  выполнена путем расчетного сопоставления ожидаемых значений  $v_{\text{вых}}$  на стенде с расчетными значениями выходной скорости в натурных условиях (таблица).

$h_z$ , м	$V_{\text{вы}}$ , м <sup>3</sup>	$\delta_{\text{апп}}$	$P_{\text{НС2}}$ , Па	$v_{\text{вых2}}$ , м/с	$\Delta$ , %
15	0,12	0,976	$2,44 \cdot 10^5$	28,99	-1,2
100	0,12	0,887	$9,98 \cdot 10^5$	27,92	-3,6
150	0,12	0,850	$13,60 \cdot 10^5$	27,73	-2,6
200	0,12	0,817	$17,16 \cdot 10^5$	26,67	-0,6
250	0,12	0,816	$21,22 \cdot 10^5$	24,25	+0,6
300	0,12	0,808	$25,05 \cdot 10^5$	21,43	+3,4
15	0,18	0,982	$2,46 \cdot 10^5$	29,11	-0,8
100	0,18	0,938	$10,32 \cdot 10^5$	28,12	-2,9
150	0,18	0,916	$14,66 \cdot 10^5$	27,88	-2,1
200	0,18	0,896	$18,82 \cdot 10^5$	26,62	-0,8
250	0,18	0,888	$23,09 \cdot 10^5$	24,00	-0,4
300	0,18	0,881	$27,31 \cdot 10^5$	20,88	+0,8

Таблица. Сопоставление расчетной выходной скорости изделия в ГДС, полученной при использовании аппроксимированных значений коэффициента соответствия, с расчетной выходной скоростью аппарата в натурных условиях

### Тормозное устройство

Еще одной проблемой при создании гидродинамических стендов является торможение выпущенного из ПУ аппарата. В работе предлагается методика проектного обоснования гидродинамических характеристик тормозного устройства оригинальной, защищенной патентом РФ на полезную модель [3], конструкции, обеспечивающего торможение и остановку движущегося с большой скоростью ПА, корпус которого имеет калиброванную часть.

Конструктивная и расчетная схема тормозного устройства приведена на рис. 3. Рассматриваемое тормозное устройство использует движущееся изделие как плунжер и содержит тормозную трубу 1 с

передним 2 и задним 3 упорными элементами. Передний упорный элемент 2 имеет входное для плунжера отверстие диаметром  $d_1$ , а задний упорный элемент 3 фиксирует герметичную крышку 4, между которой и упорным элементом 2 установлены с помощью распорных втулок 9 сменные обтюрирующие кольца 6 и 7.

Особенностью предлагаемой конструкции является то, что в первом обтюрирующем кольце 6 выполнены отверстие диаметром  $d_2$  с заходной фаской и по торцу сквозные дросселирующие отверстия (количеством  $n_1$ ) диаметром  $d_T$ .

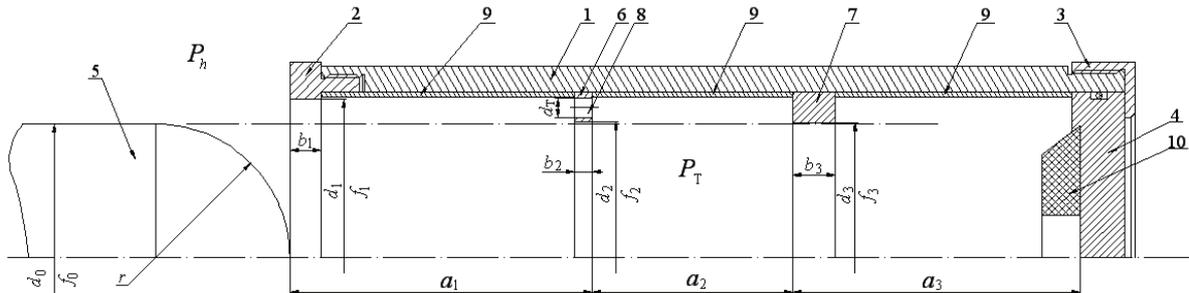


Рис. 3. Конструктивная схема и расчетные величины тормозного устройства:

- 1 – тормозная труба; 2 – передний упор; 3 – задний упор; 4 – крышка; 5 – изделие – плунжер;
- 6 – первое кольцо обтюрации; 7 – второе кольцо обтюрации; 8 – дросселирующие отверстия;
- 9 – распорные втулки; 10 – противоударный амортизатор

Второе кольцо 7 обтюрации имеет проходное для плунжера отверстие диаметром  $d_3$ . Для расчетной идеализации принято, что в тормозной трубе (ТТ) установлены только два кольца обтюрации, а изделие – плунжер 5 имеет в длину больше длины ТТ калиброванную часть диаметром  $d_0$  (поперечное сечение  $f_0$ ) и сферический оголовок радиусом  $r$ .

При вхождении по инерции с начальной скоростью  $v_{н0}$  на величину  $l_n$  плунжера массой  $m_n$  в тормозную трубу в замыкаемой жидкости возникает тормозящее изделие давление  $P_T$ , избыточное по отношению к внешнему гидростатическому  $P_h$ , вследствие чего вытесняемая плунжером жидкость будет дросселироваться через сечения в обтюрации, дросселирующие отверстия  $d_T$  и кольцевой зазор между передним упорным элементом 2 и изделием – плунжером 5.

В качестве исходного ПА для расчетного примера была принята болванка массой 20 кг, имеющая калиброванный корпус диаметром 127 мм.

Основные аналитические соотношения включают следующие уравнения.

1. Уравнение движения изделия, которое может быть записано в виде

$$\frac{dv_n}{dt} = \frac{1}{m_n + m_b} \cdot (P_h \cdot f_0 - F_T - N_H - R_{гд}), \quad (1)$$

где  $\frac{dv_n}{dt}$  – ускорение изделия;  $m_n$  – масса изделия;  $m_b$  – приведенная масса вовлекаемой в движение воды;

$F_T$  – усилие торможения;  $N_H$  – сила трения изделия о направляющие;  $R_{гд}$  – гидродинамическое сопротивление движению изделия.

2. Уравнение неразрывности потока жидкости в кольцевых сечениях тормозной тубы, представленное в виде  $v_i \cdot f_i = v_n \cdot f_0$ , с учетом которого скорость воды в любом сечении тракта выразится как

$$v_i = \frac{f_0}{f_i} \cdot v_n. \quad (2)$$

Продифференцировав это выражение, получим

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{f_0}{f_i} \cdot \frac{dv_n}{dt}.$$

3. Уравнение Бернулли для неустановившегося потока жидкости между сечениями передней части изделия и входным отверстием тормозной трубы:

$$P_T + \frac{\rho}{2} \cdot (v_n)^2 = P_h + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{f_0}{f_1 - f_r}\right)^2 \cdot (v_n)^2 + \xi_\Sigma \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (v_n)^2 + \rho \cdot L_\Sigma \cdot \frac{dv_n}{dt}, \quad (3)$$

где  $\xi_\Sigma$  и  $L_\Sigma$  – соответственно приведенные к сечению  $f_0$  суммарные коэффициенты гидравлического сопротивления тракта движущейся воды и его длины.

Подставив в уравнение (3) уравнения движения (1) и неразрывности (2), после алгебраических преобразований получим давление в тормозном устройстве:

$$P_T = \frac{1}{1 + \frac{\rho \cdot L_{\Sigma}}{m_n + m_b} \cdot f_T} \cdot \left[ P_h \cdot \left[ 1 + (f_0 - f_H) \cdot \frac{\rho \cdot L_{\Sigma}}{m_n + m_b} \right] + \frac{\rho}{2} \cdot \left[ \left( \frac{f_0}{f_1 - f_r} \right)^2 + \xi_{\Sigma} - 1 \right] \cdot (v_n)^2 - \dots \right. \\ \left. - \left( \frac{\rho \cdot L_{\Sigma}}{m_n + m_b} \right) \cdot (j_1 \cdot N_{T1} + j_2 \cdot N_{T2} + f_{12} \cdot P_{12} + f_{23} \cdot P_{23} + N_H + R_{гд}) \right],$$

где  $N_{T1} = \text{const}$ ;  $N_{T2} = \text{const}$  – механическое трение в кольцах 6 и 7 обтюрации;  $P_{1-2}$ ,  $P_{2-3}$  – давления, соответственно пройденному изделием пути  $l_n$ , возникающие в кольцевых зазорах между входным отверстием и первым кольцом 6 обтюрации и  $P_{2-3}$  между первым и вторым кольцами обтюрации;  $f_T$ ,  $f_H$ ,  $f_r$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{23}$ ,  $j_1$ ,  $j_2$  – функции пройденного изделием пути  $l_n$ .

На рис. 4 приведены результаты математического моделирования процесса торможения движущегося ПА с начальной (перед входом в тормозное устройство) скоростью 40 м/с.

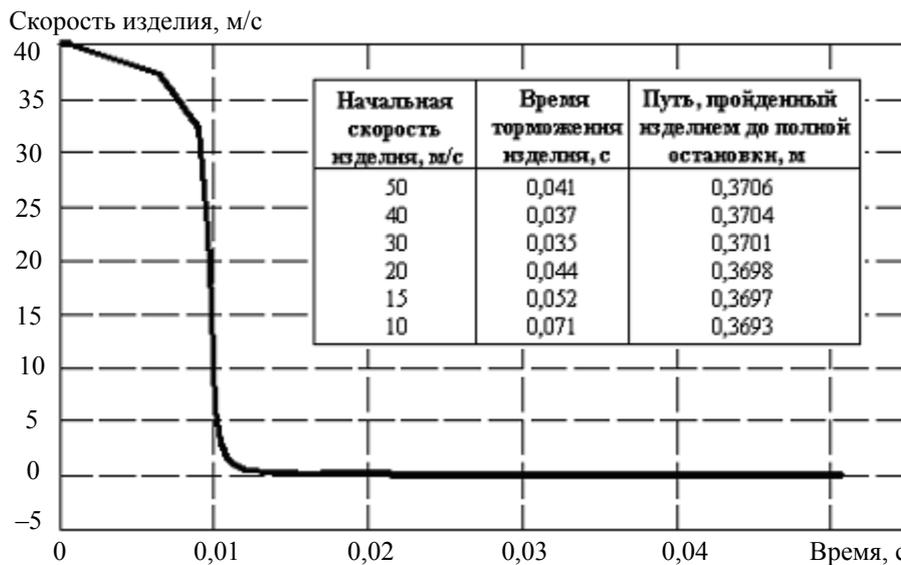


Рис. 4. Зависимость скорости изделия от времени при ее начальном значении 40 м/с

### Заключение

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что работа на стенде с введением аппроксимированных значений коэффициента соответствия  $\delta_{\text{апп}}$  позволяет производить наладочные испытания с получением фиксированной выходной скорости  $v_{\text{вых}}$ , близкой к натурным условиям.

Анализ расчетных величин времени торможения и пройденного изделием пути до полной его остановки в зависимости от его начальной скорости, приведенных в таблице на рис. 4, позволяет сделать вывод, что тормозное устройство предложенной схемы может эффективно использоваться для регулируемой остановки подводных аппаратов, имеющих начальные скорости до 50 м/с включительно и, таким образом, может быть успешно применено по основному назначению.

### Литература

1. Ефимов О.И., Красильников А.В., Красильников Р.В. Гидродинамический стенд. Заявка на изобретение № 2008147919, 2008. Положительное решение, 2010.
2. Ефимов О.И., Красильников А.В., Красильников Р.В. Транспортно-пусковой контейнер подводного аппарата. Полезная модель. Патент РФ № 87511, 2009.
3. Ефимов О.И., Красильников А.В., Красильников Р.В. Устройство торможения движущегося в жидкости тела. Полезная модель. Патент РФ № 87510, 2009.

**Валетов Вячеслав Алексеевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, valetov@tps.ifmo.ru

**Красильников Антон Валентинович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.v.krasilnikov@mail.ru

УДК 004.4'242

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТОВ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ  
СО СЛОЖНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ОБУЧАЮЩИХ ПРИМЕРОВ  
И СПЕЦИФИКАЦИИ**

К.В. Егоров, Ф.Н. Царев, А.А. Шалыто

Предлагается метод машинного обучения, основанный на совместном применении генетического программирования и верификации моделей для построения автоматов управления системами со сложным поведением на основе обучающих примеров. Приводится описание структуры хромосом, генетического алгоритма, операций мутации и скрещивания. Изложены результаты экспериментального исследования на задаче построения конечного автомата управления дверьми лифта.

**Ключевые слова:** генетическое программирование, машинное обучение, верификация моделей, автоматное программирование.

**Введение**

Автоматное программирование – это парадигма программирования, в рамках которой программы предлагается проектировать в виде совокупности взаимодействующих автоматизированных объектов управления [1]. В автоматных программах выделяют три типа объектов: поставщики событий, система управления и объекты управления. Система управления представляет собой конечный автомат или систему взаимодействующих конечных автоматов. Поставщики событий генерируют события, а система управления по каждому событию может совершить переход из рассматриваемого состояния, считывая значения входных переменных у объектов управления для проверки условия перехода, в другое состояние.

Для многих задач автоматы удается строить эвристически, однако существуют задачи, для которых такое построение затруднительно [2–4]. Одним из авторов настоящей работы был предложен метод построения автоматов с помощью генетического программирования на основе тестов (обучающих примеров) [5]. Однако, как известно, тесты не могут полностью описывать поведение программы, а их выполнимость не является критерием ее корректности.

Цель настоящей работы – расширение возможностей указанного метода построения автоматных программ за счет использования обучающих примеров и верификации в процессе работы алгоритма генетического программирования.

**Верификация автоматных программ**

Для описания спецификации управляющего конечного автомата будем применять язык логики линейного времени LTL (Linear Temporal Logic). Алгоритм верификации основан на проверке пустоты языка, задаваемого пересечением рассматриваемого конечного автомата и автомата Бюхи, соответствующего отрицанию LTL-формулы, представляющей требование к автомату [6, 7]. Эта проверка осуществляется с помощью алгоритма двойного обхода в глубину.

Верификатор получает на вход модель автоматной программы и LTL-формулу [8]. После проверки модели верификатор либо сообщает, что формула выполняется, либо приводит контрпример – путь в модели, опровергающий утверждение [9].

**Построение управляющих конечных автоматов на основе обучающих примеров с помощью генетического программирования**

При использовании метода построения управляющих конечных автоматов на основе обучающих примеров, каждый из них содержит последовательность входных событий (входная последовательность, соответствующая  $i$ -ому тесту, будет обозначаться как  $Input[i]$ ) и соответствующую ей последовательность выходных воздействий (в дальнейшем будет обозначаться, как  $Answer[i]$ ). Отметим, что в настоящей работе в обучающих примерах не используются входные переменные.

Функция приспособленности основана на редакционном расстоянии [10]. Для этой функции выполняются следующие действия: на вход автомату подается каждая из последовательностей  $Input[i]$ .

Обозначим последовательность выходных воздействий, которую сгенерировал автомат на входе  $\text{Input}[i]$  как  $\text{Output}[i]$ . После этого вычисляется функция  $\text{FF}_1$  вида:

$$\text{FF}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\text{ED}(\text{Output}[i], \text{Answer}[i])}{\max(|\text{Output}[i]|, |\text{Answer}[i]|)}\right)}{n}.$$

Здесь  $\text{ED}(A, B)$  – редакционное расстояние между строками  $A$  и  $B$ , а  $\text{Answer}[i]$  – эталонная выходная последовательность, которую должен генерировать автомат на входе  $\text{Input}[i]$ . Отметим, что значения этой функции лежат в пределах от 0 до 1. При этом чем «лучше» автомат соответствует тестам, тем больше значение функции приспособленности.

Функция приспособленности должна зависеть не только от того, насколько «хорошо» автомат работает на тестах, но и числа переходов, которые он содержит. Предлагается ее вычислять по формуле

$$\text{FF}_2 = \text{FF}_1 + \frac{1}{M} \cdot (M - \text{cnt}),$$

где  $\text{cnt}$  – число переходов в рассматриваемом конечном автомате, а  $M$  – некоторое число, большее максимально возможного числа переходов в автомате с заданным числом состояний. При этом отметим, что все рассматриваемые в процессе работы алгоритма генетического программирования автоматы имеют одинаковое наперед заданное число состояний.

Функция приспособленности построена так, что при одинаковом значении функции  $\text{FF}_1$ , учитывающей «прохождение» тестов автоматом, преимущество имеет автомат, содержащий меньшее число переходов. Учет числа переходов в функции приспособленности необходим, так как минимизация их числа приводит к тому, что в результирующем автомате отсутствуют переходы, неиспользуемые в тестах.

### **Совместное применение генетического программирования и верификации**

Предлагается при вычислении функции приспособленности учитывать как поведение автомата при обработке тестов, так и число выполняемых (верных) для автомата LTL-формул, составляющих спецификацию. При этом, чем больше число выполняемых формул и успешно пройденных тестов, тем больше значение функции приспособленности.

Для вычисления функции приспособленности конечный автомат, задаваемый рассматриваемой особью, запускается на всех тестах и проверяется на соответствие всем темпоральным формулам, составляющим спецификацию. Для учета указанных особенностей необходимо изменить введенную выше функцию приспособленности:

$$\text{FF} = \text{FF}_1 \cdot \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right) + \frac{1}{M} \cdot (M - \text{cnt}).$$

Здесь  $n_2$  – общее число темпоральных формул в спецификации, а  $n_1$  – число формул, которые выполняются для рассматриваемого конечного автомата.

### **Структура хромосомы в алгоритме генетического программирования**

Конечный автомат в алгоритме генетического программирования представляется в виде объекта, который содержит описания переходов для каждого состояния и номер начального состояния. Для каждого состояния хранится список переходов. В свою очередь, каждый переход описывается событием, при поступлении которого этот переход выполняется, и числом выходных воздействий, которые должны быть сгенерированы при выборе этого перехода. Таким образом, в особи кодируется только «скелет» управляющего конечного автомата, а конкретные выходные воздействия, вырабатываемые на переходах, определяются с помощью алгоритма расстановки пометок, который аналогичен предложенному в работе [11].

Идея алгоритма расстановки пометок состоит в том, что пометки на переходах (вырабатываемые на них выходные воздействия) расставляются на основе тестов. При этом расстановка пометок происходит таким образом, чтобы получившийся в результате автомат достаточно хорошо соответствовал тестам.

Опишем более формально алгоритм расстановки пометок на переходах, применяемый в настоящей работе. Подадим на вход конечному автомату последовательность событий, соответствующую одному из тестов, и будем наблюдать за тем, какие переходы выполняет автомат. Зная эти переходы и информацию о том, сколько выходных воздействий должно быть сгенерировано на каждом переходе, можно определить, какие выходные воздействия должны вырабатываться на переходах, использовавшихся при обработке входной последовательности (рис. 1).

На рис. 1 буквами А, Н, М и Т обозначены события, поступающие на вход конечного автомата, а как z3, z4 и z5 обозначены выходные воздействия.

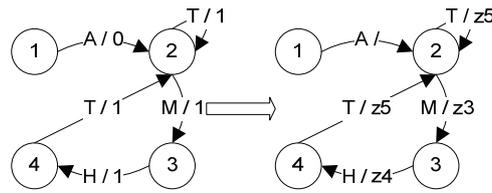


Рис. 1. Применение алгоритма расстановки пометок

Для случая нескольких тестов этот принцип можно обобщить следующим образом. Для каждого перехода  $T_i$  и каждой последовательности выходных воздействий  $z_s$  вычисляется величина  $C[Tr][z_s]$  – число раз, когда при обработке входной последовательности, соответствующей одному из тестов, на переходе  $T_i$  должны быть выработаны выходные воздействия, образующие последовательность  $z_s$ . Далее, каждый переход помечается той последовательностью  $z_{s_0}$ , для которой величина  $C[Tr][z_{s_0}]$  максимальна.

### Операции мутации и скрещивания

Операция мутации может выполняться двумя способами – традиционным и учитывающим результат верификации. Традиционный способ используется в методе построения управляющих автоматов на основе обучающих примеров [5].

Операция скрещивания может быть осуществлена тремя способами – традиционным, с учетом тестов и с учетом результата верификации. Первые два способа также описаны в работе [5].

Опишем методы мутации и скрещивания, учитывающие верификацию. Как отмечалось выше, алгоритм верификации основан на двойном обходе в глубину автомата, задаваемого особью, и автомата Бюхи, построенного по отрицанию LTL-формулы. При использовании такого алгоритма, та часть модели, которая была помещена в процессе первого обхода в глубину, удовлетворяет LTL-формуле и может быть использована в процессе скрещивания точно так же, как в методе скрещивания с учетом тестов (помеченные переходы копируются в новые особи напрямую). Иными словами, подграф переходов, которые обошел верификатор в процессе верификации, может перейти без изменений в новую особь.

В то же время, должна быть обеспечена возможность не только сохранять часть модели, на которой выполняется темпоральное свойство, но и удалять те переходы, которые входят в контрпример, возвращаемый верификатором. Такой контрпример представляет собой путь в модели. Поэтому при мутации можно либо удалить переход из этого пути, либо изменить его конечное состояние, число генерируемых выходных воздействий или событие, инициирующее переход.

### Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование предлагаемого метода машинного обучения проводилось на задаче построения автомата управления дверьми лифта. Эта система содержит пять входных событий ( $e_{11}$  – нажата кнопка «Открыть двери»;  $e_{12}$  – нажата кнопка «Закрыть двери»;  $e_2$  – открытие или закрытие дверей успешно завершено;  $e_3$  – препятствие мешает закрыть дверь;  $e_4$  – дверь сломалась) и три выходные воздействия ( $z_1$  – начать открытие дверей;  $z_2$  – начать закрытие дверей;  $z_3$  – позвонить в аварийную службу).

При построении управляющего автомата использовались девять тестов (табл. 1).

Входная последовательность	Выходная последовательность
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_2$	$z_1, z_2$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_2, e_{11}, e_2, e_{12}, e_2$	$z_1, z_2, z_1, z_2$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_3, e_2, e_{12}, e_2$	$z_1, z_2, z_1, z_2$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_2, e_{11}, e_2, e_{12}, e_3, e_2, e_{12}, e_2$	$z_1, z_2, z_1, z_2, z_1, z_2$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_3, e_2, e_{12}, e_3, e_2, e_{12}, e_2$	$z_1, z_2, z_1, z_2, z_1, z_2$
$e_{11}, e_4$	$z_1, z_3$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_4$	$z_1, z_2, z_3$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_2, e_{11}, e_4$	$z_1, z_2, z_1, z_3$
$e_{11}, e_2, e_{12}, e_3, e_4$	$z_1, z_2, z_1, z_3$

Таблица 1. Тесты для системы управления дверьми лифта

Спецификация управляющего автомата содержит 11 темпоральных свойств (табл. 2).

Формула	Комментарий
$G(\text{wasEvent}(ep.e11) \Rightarrow \text{wasAction}(co.z1))$	Если было событие e11, то было вызвано действие z1
$G(\text{wasEvent}(ep.e12) \Leftrightarrow \text{wasAction}(co.z2))$	Событие e12 обрабатывается тогда и только тогда, когда вызывается z2
$G(\text{wasEvent}(ep.e4) \Leftrightarrow \text{wasAction}(co.z3))$	Событие e4 обрабатывается тогда и только тогда, когда вызывается z3
$G(\text{wasEvent}(ep.e3) \Rightarrow \text{wasAction}(co.z1))$	Если было событие e3, то было вызвано действие z1
$G(\text{wasEvent}(ep.e2) \Rightarrow X(\text{wasEvent}(ep.e11) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e12)))$	Если было событие e2, то следующим обработанным событием будет e11 или e12
$G(\text{wasEvent}(ep.e11) \Rightarrow X(\text{wasEvent}(ep.e4) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e2)))$	Если было событие e11, то следующим обработанным событием будет e4 или e2
$G(\text{wasAction}(co.z1) \Rightarrow X(\text{wasEvent}(ep.e2) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e4)))$	Если было вызвано действие z1, то следующим обработанным событием будет e2 или e4
$G(\text{wasEvent}(ep.e12) \Rightarrow X(\text{wasEvent}(ep.e2) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e3) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e4)))$	Если было событие e12, то следующим обработанным событием будет e2, или e3, или e4
$G(\text{wasAction}(co.z1) \Rightarrow X(U(!\text{wasAction}(co.z1), \text{wasAction}(co.z2) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e4))))$	Если было вызвано действие z1, то оно не будет больше вызвано, пока не будет вызвано z2 или обработано событие e4
$G(\text{wasAction}(co.z2) \Rightarrow X(U(!\text{wasAction}(co.z2), \text{wasAction}(co.z1) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e4))))$	Если было вызвано действие z2, то оно не будет больше вызвано, пока не будет вызвано z1 или обработано событие e4
$!F(\text{wasEvent}(ep.e4) \text{ and } X(F(\text{wasEvent}(ep.e11) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e12) \text{ or } \text{wasEvent}(ep.e2) \text{    } \text{wasEvent}(ep.e3))))$	Не верно, что в будущем будет после события e4 когда либо будут обработаны e11, e12, e2 или e3 (лифт не может самостоятельно починиться)

Таблица 2. Темпоральные свойства, составляющие спецификацию системы управления дверьми лифта

Целью экспериментального исследования было сравнение метода построения управляющих конечных автоматов на основе тестов с предлагаемым в настоящей работе методом, использующим верификацию моделей на различных стадиях работы алгоритма генетического программирования (вычисление функции приспособленности, скрещивание и мутация). Для оценки трудоемкости сравниваемых методов было проведено по 1000 экспериментов, и для каждого эксперимента записывалось число вычислений функции приспособленности. Эксперименты показали, что при построении автоматов только на основе тестов, очень редко (всего в девяти случаях из 1000) результатом являлся автомат, который полностью удовлетворяет спецификации. Пример автомата, построенного только на основе тестов, приведен на рис. 2.

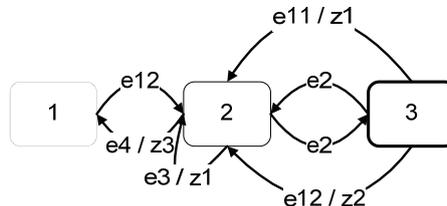


Рис. 2. Автомат управления дверьми лифта, построенный только на основе обучающих примеров

Это автомат обладает тем недостатком, что может отдать команду на закрытие дверей после того, как они сломаются или же начать открывать (закрывать) двери, когда они уже открыты (закрыты). Отметим, что некоторые из построенных в этом эксперименте автоматов обладали и другими недостатками.

При использовании предлагаемого метода (с применением верификации моделей) построение автомата (рис. 3) занимало больше времени, но построенный автомат удовлетворял всем требованиям спецификации.

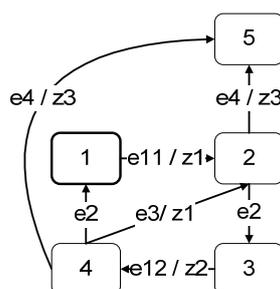


Рис. 3. Автомат управления дверьми лифта, построенный с использованием верификации

При построении конечного автомата управления дверьми лифта только на основе тестов, среднее значение вычислений функции приспособленности оказалось равным  $7,479 \cdot 10^4$  (минимальное число вычислений –  $2,184 \cdot 10^4$ , максимальное –  $2,999 \cdot 10^5$ , среднеквадратичное отклонение –  $2,54 \cdot 10^4$ ).

При использовании верификации моделей совместно с тестами, среднее значение числа вычислений функции приспособленности оказалось равным  $7,246 \cdot 10^5$  (минимальное число вычислений –  $7,054 \cdot 10^4$ , максимальное –  $5,492 \cdot 10^6$ , среднеквадратичное отклонение –  $7,729 \cdot 10^5$ ).

Таким образом, использование верификации хоть и замедляет процесс построения управляющего конечного автомата примерно в десять раз, но если принять во внимание то, что при построении только на основе тестов процент правильно построенных автоматов меньше 1%, то применение предлагаемого в настоящей работе метода оправдывает себя.

### Заключение

Предложен метод машинного обучения для построения управляющих конечных автоматов на основе обучающих примеров. Предложенный метод основан на совместном применении генетического программирования и верификации моделей программ. Применение верификации в процессе работы алгоритма генетического программирования позволяет говорить об автоматизированном построении автоматов с гарантированным поведением.

Исследование проводится в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», а также финансируется по гранту РФФИ № 10-01-00654а.

### Литература

1. Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009.
2. Angeline P.J., Pollack J. Evolutionary Module Acquisition // Proceedings of the Second Annual Conference on Evolutionary Programming. 1993. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.demo.cs.brandeis.edu/papers/ep93.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.06.2010).
3. Jefferson D., Collins R., Cooper C., Dyer M., Flowers M., Korf R., Taylor C., Wang A. The Genesys System. 1992. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cs.ucla.edu/~dyer/Papers/AlifeTracker/Alife91Jefferson.html>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 17.06.2010).
4. Chambers L. Practical Handbook of Genetic Algorithms. Complex Coding Systems // CRC Press, 1999. – V. III. – P. 659.
5. Царев Ф.Н. Метод построения автоматов управления системами со сложным поведением на основе тестов с помощью генетического программирования // Материалы международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии». – Саратов: СГУ, 2009. – С. 216–219.
6. Кларк Э., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программ: Model Checking. – М.: МЦНМО, 2002.
7. Gerth R., Peled D., Vardi M.Y., Wolper P. Simple On-the-fly Automatic Verification of Linear Temporal Logic // Proc. of the 15th Workshop on Protocol Specification, Testing, and Verification, Warsaw. – 1995. – P. 3–18.
8. Разработка технологии верификации управляющих программ со сложным поведением, построенных на основе автоматного подхода. Второй этап. СПбГУ ИТМО, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/verification/\\_2007\\_02\\_report-verification.pdf](http://is.ifmo.ru/verification/_2007_02_report-verification.pdf), свободный. – Яз. рус. (дата обращения 17.06.2010).
9. Егоров К.В., Шалыто А.А. Методика верификации автоматных программ // Информационно-управляющие системы. – 2008. – № 5. – С. 15–21.

10. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Доклады Академии наук СССР. – 1963. – № 4. – С. 845–848.
11. Lucas S., Reynolds T. Learning Finite State Transducers: Evolution versus Heuristic State Merging // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2007, June. – V. 11. – Is. 3. – P. 308–325.

**Егоров Кирилл Викторович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр прикладной математики и информатики, kegofov@gmail.com

**Царев Федор Николаевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, fedor.tsarev@gmail.com

**Шалыто Анатолий Абрамович**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, shalyto@mail.ifmo.ru

УДК 004.021

## **АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЛИЦА ПО ФОТОГРАФИИ**

**А.В. Шлянников**

Предложен метод построения трехмерной модели лица на основе одной входной фотографии. Алгоритм основывается на выделении контрольных точек и характерных особенностей на представленном изображении и переносе их на модель. Для получения характерных особенностей фотографии применяется специальное wavelet-преобразование, выделяющее наиболее информативные признаки. Полученная модель может быть использована в дальнейшем в задачах визуализации и распознавания образов.

**Ключевые слова:** распознавание лица, 3D-моделирование, wavelet-обработка.

### **Введение**

Задача построения трехмерных моделей лица в настоящее время широко востребована в задачах визуализации трехмерных объектов и в системах распознавания и контроля доступа, поэтому ей посвящено большое количество работ. Однако решенной данную проблему считать нельзя.

Известно несколько подходов для решения поставленной задачи. Наиболее точными являются методы, при которых модель лица строится при помощи специального оборудования. В работе [1] предложен алгоритм обработки информации, полученной с лазерного сканера, для построения моделей и идентификации лиц. Данный подход дает наибольшую эффективность в решении проблемы, однако сужает область применения за счет необходимости использования специального оборудования.

В данной работе применяется подход, основанный на обработке только одного монокулярного изображения, что уменьшает идентичность модели и реального лица на фотографии, но позволяет расширить область применения алгоритма.

В работе [2] предложен метод идентификации лиц по характерным признакам, присутствующим на лице. В текущей работе этот метод был использован для выделения характерных признаков лица на фотографии и построения модели по этим признакам.

Задача формально описывается следующим образом: дается некоторое изображение лица, и требуется построить приближенную пространственную фигуру, отражающую лицо на фотографии. На формат входного изображения накладываются следующие ограничения: фотография содержит только одно лицо и должна быть сделана в анфас. Результатом работы алгоритма является набор точек/полигонов в пространстве, представляющий собой модель лица на фотографии, что и является решением задачи.

### **Описание алгоритма**

Алгоритм решения задачи строится по итеративному принципу. В качестве исходной итерации выбирается некоторая усредненная модель головы человека, и производится пошаговое ее улучшение. На каждом шаге процесса итеративной модификации выполняются следующие действия.

1. Генерируется изображение модели, которое затем используется для сравнения с входным изображением.
2. На входной фотографии и на сгенерированном изображении модели в автоматическом режиме выделяются контрольные точки, содержащие данные о точном положении лица на фотографии, его общей форме и о точных координатах конкретных черт лица на фотографии.
3. Используя координаты контрольных точек, производится аппроксимация конкретных регионов на обоих изображениях с помощью шаблонов, находящихся в специальном словаре.

4. Полученные данные аппроксимации используются для определения отличий характерных черт лица на строящейся модели и на входной фотографии.
5. Производится модификация строящейся модели с устранением выделенных отличий от входной фотографии.

### **Выделение контрольных точек на изображении**

Для выделения контрольных точек на изображении был использован алгоритм Active Shape Model (ASM) в реализации Stasm library [3]. Результатом работы данной реализации алгоритма является упорядоченный набор из 68 точек, выделяемый в автоматическом режиме на фотографии лица. Каждая точка соответствует конкретной позиции на лице (углы рта, глаз, центр носа и т.д.) (рис. 1).

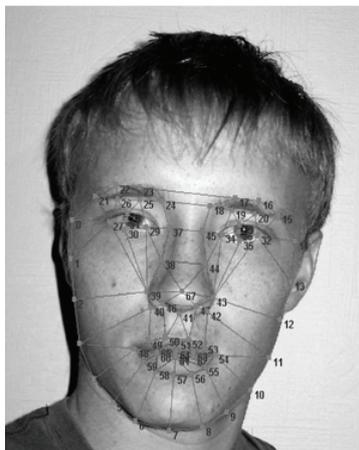


Рис. 1. Пример работы алгоритма ASM

Однако, несмотря на точность выделения позиций на лице процедурой Stasm, только этих данных недостаточно, чтобы сформировать достаточно полное формальное описание лица. Поэтому в данной работе контрольные точки, определяемые с помощью Stasm, используются только для позиционирования характерных черт лица на фотографии.

### **Описание областей изображения с помощью двумерного wavelet-преобразования**

Для описания каждой характерной черты на выделенных регионах изображения используется неортогональное wavelet-преобразование на основе шаблонов специального вида, предложенное в работе [4]. В качестве базисных функций преобразования используются изображения колоколообразной формы, для построения которых используются матрицы ранга 1. Использование неортогонального базиса в данном случае позволяет применить технику вычисления на основе быстрого преобразования Фурье для ускорения обработки (рис. 2).

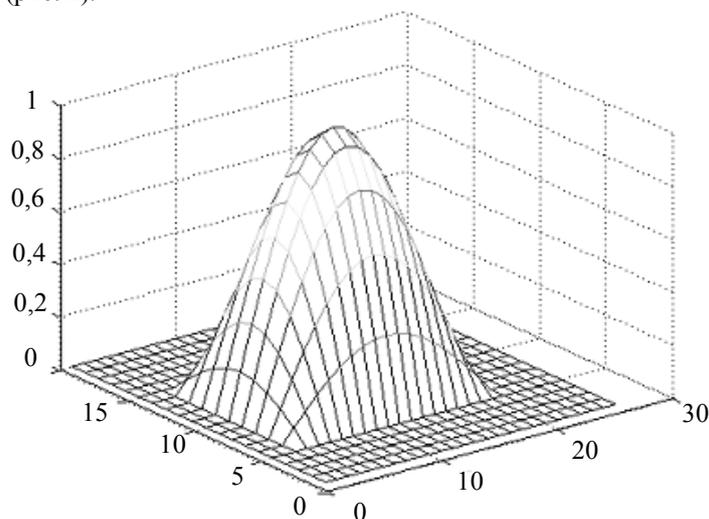


Рис. 2. Базисные функции неортогонального wavelet-преобразования

При обработке изображение интерпретируется как поверхность в трехмерном пространстве, которая затем аппроксимируется суммой из фиксированного количества поверхностей колоколообразной формы. Алгоритм также допускает параметры аппроксимирующих поверхностей, такие, как вытянутость вдоль одной из осей координат и поворот на произвольный угол. Так как при аппроксимации каждой характерной черты в процессе алгоритма уже известен ее тип, то это позволяет зафиксировать параметры шаблонов, с помощью которых можно достичь наиболее точного приближения (например, при обработке рта и бровей на фотографии выбираются семейства шаблонов, вытянутых по горизонтали) (рис. 3).



Рис. 3. Пример аппроксимации всего лица на фотографии

### Процедура сравнения характерных регионов

Выделенные на исходной фотографии и на сгенерированной контрольные точки группируются по характерным чертам лица (глаза, рот, нос и т.д.), в результате чего каждая группа контрольных точек ограничивает соответствующую область на фотографии. Области аппроксимируются описанным выше способом с применением неортогонального wavelet-преобразования, и производится попарное сравнение данных аппроксимации на обеих фотографиях. Целью процедуры сравнения является выявление параметров отличий соответствующих черт лица на фотографиях для последующей модификации строящейся модели с устранением этих отличий.

Разработанная процедура сравнения позволяет определять следующие отличия характерных областей на фотографии:

1. поворот одной области относительно другой;
2. смещение одной области относительно другой по обеим осям координат;
3. растяжение по обеим осям координат.

**Определение поворота изображения.** Метод определения угла поворота одного изображения относительно другого состоит в использовании преобразования Фурье, выраженного в полярных координатах. Представим данные аппроксимации как множества точек на плоскости и положим  $f(x_j, y_j)$  – коэффициент интенсивности,  $(x_j, y_j)$  – координаты центра  $j$ -й аппроксимирующей поверхности. Введем функцию  $F(a, b)$  – дискретное преобразование Фурье от данного множества векторов.

В работе [2] показано, что если  $F'(r, \varphi)$  – преобразование Фурье в полярных координатах для повернутого изображения, а  $F(r, \varphi)$  – для исходного, то имеет место соотношение:

$$F'(r, \varphi) = F(r, \varphi - \alpha). \quad (1)$$

Но данное соотношение имеет место только в том случае, если все точки множества были повернуты на одну и ту же величину. В реальном же случае такое предположение может и не выполняться (например, если человек на фотографии наклонил голову). Поэтому для определения таких искажений использовался следующий метод.

Фиксируется дискретный набор значений  $r_k, k = 1, \dots, K: r_0 = 0, r_k = \frac{s}{2}$ , где  $s$  – максимум из высоты и ширины изображения;  $\varphi_l, l = 1, \dots, L: \varphi_0 = 0, \varphi_k = 2\pi$  и вычисляется значение функции  $F(r_k, \varphi_l)$  по всем  $k = 1, \dots, K$  и  $l = 1, \dots, L$  для обоих сравниваемых изображений. Обозначим полученные матрицы  $M_{k,l} = |F(r_k, \varphi_l)|$  – для первого изображения и  $M''_{k,l} = |F'(r_k, \varphi_l)|$  – для второго. Далее построчно подсчитывается корреляция между векторами-строками обеих матриц. Значениями итогового вектора корреляции считается среднее значение корреляции в столбце. Затем находится наибольшее значение корреляции в полученном векторе: пусть  $corr(j) = \max_{l=1, \dots, L}(corr(l))$ . В силу соотношения (1) считается, что второе

изображение получено из первого поворотом на угол  $\varphi_j$ .

**Определение смещения и растяжения характерных областей.** После определения возможного поворота одной области относительно другой, вычисляется их взаимное смещение и растяжение по следующему принципу.

Координаты центров шаблонов в аппроксимациях соответствующих областей фиксируются как множества точек на плоскости. Первоначально для обоих множеств точек находится их центр как центр медиан. Для каждого множества вычисляется среднеквадратическое отклонение точек от центра. Второе множество преобразуется растяжением относительно вычисленного центра таким образом, чтобы значения отклонений у обоих множеств были равны.

Второе множество перемещается таким образом, чтобы его центр медиан совпал с центром первого. Находится первоначальное значение некоторой метрики, означающей расстояние между сравниваемыми множествами точек. Далее множество точек второй области растягивается или сжимается на зафиксированную малую величину и снова вычисляется метрика. Если полученное значение меньше предыдущего, то преобразование второго изображения сохраняется, и вычисленное значение метрики становится текущим. Затем осуществляется сдвиг всех точек второго множества на малую величину и вычисляется метрика. Аналогично, если значение метрики меньше предыдущего, то преобразование и значение метрики сохраняются. Подобный процесс продолжается до тех пор, пока данные преобразования позволяют улучшить (т.е. уменьшить) значение метрики или пока не будет достигнут критерий остановки по числу итераций.

В качестве такой метрики была выбрана метрика Хаусдорфа: если  $A, B$  – два множества точек, соответствующие первой и второй областям, то для каждой точки  $a \in A$  находится расстояние от  $a$  до  $B$ , а затем подсчитывается  $A(B) = \sup_A d(a, B)$ . После этого множества меняются местами и подсчитывается

аналогичная величина. Метрикой считается значение  $d(A, B) = \max(A(B), B(A))$ .

Аппроксимация изображения проводилась в несколько этапов. Возможные значения размеров шаблонов упорядочивались по уменьшению размера. На каждом этапе выбиралось одно значение размера шаблонов из зафиксированного порядка, и каждый последующий этап выполнялся по изображению с вычтенным значением аппроксимации на предыдущем этапе. Такой подход повышает информативность аппроксимации за счет того, что сначала убираются наиболее яркие крупные области на изображении, соответствующие наиболее освещенным участкам, а затем, с помощью более мелких шаблонов, определяется положение характерных деталей (рис. 4, 5).



Рис. 4. Область на фотографии

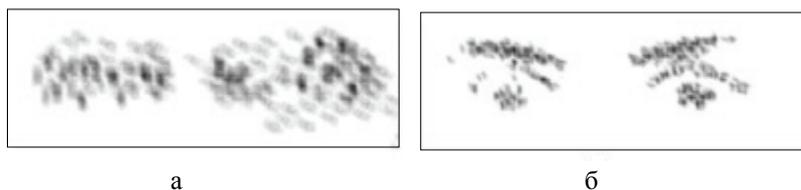


Рис. 5. Варианты аппроксимации: а – аппроксимация крупными шаблонами; б – аппроксимация мелких деталей

#### Выбор оптимального изменения модели на шаге работы алгоритма

Для построения трехмерной модели головы был использован программный пакет FaceGen.

Каждая модель как набор полигонов однозначно определяется в пакете FaceGen набором параметров (биометрических признаков) построения. Однако модификация этих параметров имеет следующую особенность: при изменении некоторого параметра модели  $p(i) := p(i) + c$ , все остальные параметры также изменяются на некоторую величину:  $p(i) := p(i) + c(i)$ . Например, при увеличении параметра «расстояние между зрачками», параметры расстояний между концами бровей также увеличиваются. Такая особенность гарантирует корректность строящейся модели при любом изменении параметров.

Поэтому выбор оптимального изменения модели на каждой итерации выполняется по следующему принципу.

1. Для каждого параметра модели  $p(i)$  находится его оптимальное изменение  $p^*(i)$  через сопоставление с найденными отличиями характерных областей на изображении. При этом фиксируется вектор изменения остальных параметров:  $P'(i) = p'(i), j = 1, \dots, n$ .

2. Составляется вектор оптимальных изменений всех параметров по отдельности:  $P^* = p^*(i), i = 1, \dots, n$ .
3. Вычисляется расстояние между каждым из векторов  $P(i), i = 1, \dots, n$  и вектором  $P^*$ . Векторы упорядочиваются по возрастанию расстояния.
4. К модели применяется  $k$  изменений параметров, соответствующих первым упорядоченным  $k$  векторам  $P'(i), i = 1, \dots, n$ .

В результате данного принципа выбора изменяемого параметра, будет произведена модификация, приводящая к улучшению соответствия максимального числа параметров модели.

### Результаты

На рис. 6 представлены результаты тестирования: приведены тестовые изображения лиц и построенные по ним модели.

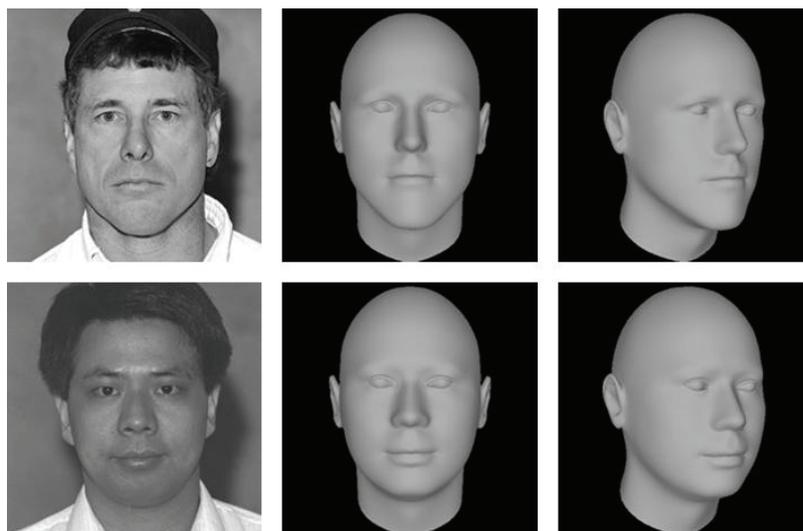


Рис. 6. Тестирование работы алгоритма

Как видно из построенных моделей, алгоритм не учитывает детали изображения, расположенные выше уровня бровей. Этот факт обусловлен тем, что пошаговая модификация усредненной модели ведется с использованием контрольных точек ASM, которые, в свою очередь, также не располагаются выше указанной линии. Однако этот факт приемлем в силу предполагаемой области применения разработанного алгоритма: при распознавании лиц по фотографиям, детали лица, находящиеся выше уровня бровей (прическа, головной убор) легко поддаются сильным изменениям и потому могут быть проигнорированы.

### Литература

1. Kakadiaris I. Three-Dimensional Face Recognition in the Presence of Facial Expressions: An Annotated Deformable Model Approach / I. Kakadiaris, G. Passalis, G. Toderici, M. Murtuza, Yu. Lu, N. Karampatziakis, T. Theoharis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2007. – V. 29. – № 4. – P. 640–649.
2. Столов Е.Л., Шлянников А.В. Распознавание лиц на фотографии путем анализа характерных областей // Ученые записки Казанского Государственного Университета. – 2007. – Т. 149. – № 2. – С. 138–145.
3. Milborrow S., Nicolls F. Locating Facial Features with an Extended Active Shape Model // Lecture Notes in Computer Science. – 2008. – V. 5305. – P. 504–513.
4. Столов Е.Л. Параллельный алгоритм для отыскания водяных знаков в изображении // Вестник Казанского государственного технического университета. – 2006. – № 3. – С. 37–42.

*Шлянников Александр Валериевич* – Казанский государственный университет, аспирант, a.shlyannikov@gmail.com

УДК 004.4'242

## ПРИМЕНЕНИЕ ШАБЛОНОВ ТРЕБОВАНИЙ К ФОРМАЛЬНОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ АВТОМАТНЫХ ПРОГРАММ

А.А. Клебанов, О.Г. Степанов, А.А. Шалыто

Верификация на модели (*model checking*) является глубоко проработанной технологией проверки корректности программного обеспечения, однако при этом она недостаточно широко используется на практике. Одной из причин является сложность составления формальных требований на языке темпоральных логик. В настоящей работе описывается подход для записи верифицируемых требований на подмножестве естественного языка в контексте автоматного программирования. В частности, приводится анализ применимости шаблонов требований к формальной спецификации автоматных программ, а также описывается грамматика для вывода требований.

**Ключевые слова:** автоматное программирование, верификация на модели, темпоральные логики.

### Введение

Автоматное программирование [1] – это метод разработки программного обеспечения (ПО), основанный на расширенной модели конечного автомата. В рамках данного подхода программы представляются системой автоматизированных объектов управления, логика поведения которых задается системой взаимодействующих управляющих автоматов.

В ряде работ [2, 3] показано, что к автоматным программам хорошо применима верификация на модели (*Model Checking*) [4]. Суть такой верификации состоит в проверке соответствия модели с конечным числом состояний (*структуры Крипке*) формальной спецификации, заданной в виде набора формул темпоральной логики. При верификации преимуществом автоматного подхода перед традиционными подходами к разработке ПО является высокая степень автоматизации, так как в автоматных программах модель поведения задается априори. Разработаны методы [5–7], позволяющие автоматически преобразовывать как управляющие автоматы в модель, пригодную для верификации, так и построенный верификатором контрпример в автоматную модель. Однако, как при верификации автоматных программ, так и при верификации программ общего вида, существует следующая проблема – необходимость записи формальных требований в виде формул темпоральных логик, работа с которыми достаточно трудоемка и требует значительной математической подготовки.

В работе [8] эта проблема частично решается использованием контрактов [9]. Хотя контракты являются более простым формализмом (и, как следствие, ошибки в подобной формальной спецификации менее вероятны), рассматриваемый подход имеет несколько недостатков. Во-первых, контракты значительно уступают темпоральным логикам в выразительных возможностях. К записи требований они применимы только в том случае, когда необходимо специфицировать свойства инвариантности, предусловия или постусловия. Во-вторых, специфицирование требований, распространяющихся на группу состояний, может быть достаточно трудоемким процессом, поскольку для каждого состояния из группы потребуется разработать свою спецификацию. Таким образом, описанную выше проблему нельзя считать полностью решенной.

В настоящей работе описывается подход к записи требований, скрывающий сложность темпоральных логик. Предлагается записывать требования на подмножестве естественного языка, заданного приводимой ниже формальной грамматикой. Грамматика основывается на наборе шаблонов требований [10, 11] – обобщенном описании (формальном и на естественном языке) часто встречающихся ограничений на допустимые последовательности состояний в модели системы с конечным числом состояний. Таким образом, для каждого полученного требования существует эквивалентная формальная запись, позволяющая осуществить верификацию.

Актуальность применения шаблонов требований в контексте автоматного программирования отмечается в работе [2]: «... важным является вопрос о шаблонах (структуре) темпоральных свойств, наиболее применимых и адекватных для верификации автоматных программ. Наличие таких шаблонов позволяло бы говорить о классах темпоральных свойств автоматных моделей, что, несомненно, облегчало бы построение технологической схемы проверки автоматных программ на корректность относительно спецификации». Однако в указанной работе выделяется только одно требование, являющееся частным случаем существующего шаблона, и дальше этот вопрос никак не прорабатывается.

В начале настоящей работы кратко описываются шаблоны требований, затем приводится анализ их применимости к спецификации автоматных программ, и, наконец, вводится формальная грамматика для записи требований. В заключении сделаны выводы по работе.

### Шаблоны требований

В работах [10, 11] предлагается система шаблонов требований, разработанная на основе спецификаций для программ общего вида. Шаблоны можно классифицировать в соответствии с иерархической структурой, основанной на их семантике. В настоящее время выделено восемь основных шаблонов («Отсутствие», «Существование», «Всеобщность», «Ограниченное существование», «Предшествование»,

«Ответ», «Цепное предшествование», «Цепной ответ»), которые делятся на две группы – «Наличие» и «Порядок». В группу «Наличие» входят шаблоны, описывающие наличие или отсутствие состояний, в которых выполняется заданное требование. В группу «Порядок» – описывающие порядок состояний.

Описание шаблона состоит из его имени (или списка имен), цели, записи на различных формализмах (LTL, CTL и т.п.), примера использования и связи с другими шаблонами.

Каждое требование имеет *ограничение* – ту часть пути исполнения, на котором это требование должно выполняться. Всего выделены пять видов ограничений.

1. Глобально – на всем пути исполнения.
2. До – на пути до заданного состояния.
3. После – на пути после заданного состояния.
4. Между – на пути между двумя заданными состояниями.
5. После-до – аналогично ограничению «Между», однако наличие правой границы интервала не является обязательным.

Отметим, что стандартно для формализмов, ориентированных на состояние, интервал, на котором должно выполняться требование, замкнут на левом конце и открыт на правом.

В табл. 1 приведен пример шаблона «Всеобщность». Оригинальный пример использования, предложенный в работе [10], заменен примером более применимым в контексте автоматного программирования. В этом состоит задача адаптации системы шаблонов для автоматного программирования.

Цель		Используется для описания части пути исполнения системы, в которой содержится <i>только те</i> состояния, в которых выполняется необходимое требование. Известен также как «Впредь» и «Всегда».	
Запись	LTL	Ограничение	Запись
		Глобально	$\Box(P)$
		До R	$\Diamond R \rightarrow (P \cup R)$
		После Q	$\Box(Q \rightarrow \Box(P))$
		Между Q и R	$\Box((Q \& !R \& \Diamond R) \rightarrow (P \cup R))$
		После Q до R	$\Box(Q \& !R \rightarrow (P \cup W R))$
	CTL	Ограничение	Запись
		Глобально	$AG(P)$
		До R	$A[(P \mid AG(!R)) \cup W R]$
		После Q	$AG(Q \rightarrow AG(P))$
		Между Q и R	$AG(Q \& !R \rightarrow A[(P \mid AG(!R)) \cup W R])$
		После Q до R	$AG(Q \& !R \rightarrow A[P \cup W R])$
Пример использования		Этот шаблон может быть применен для описания общих свойств модели в целом или отдельной группы состояний. Например, в том случае, когда необходимо выразить свойство вида: «Если автомат находится в состоянии s, то верно свойство P». При использовании ограничения «Глобально» подстановка темпоральных выражений $\langle \Diamond f$ или $AF(f)$ в качестве параметра P позволяет выразить свойство справедливости.	
Связь с другими шаблонами		Этот шаблон тесно связан с шаблонами «Отсутствие» и «Существование». Наличие состояния, в котором выполняется требование, может рассматриваться как отрицание его отсутствия.	

Таблица 1. Шаблон «Всеобщность»

### Применимость шаблонов требований к спецификации автоматных программ

Рассмотрим вопрос применимости шаблонов требований к формальной спецификации автоматных программ. Для этого проанализируем требования к различным программам, разработанным в СПбГУ ИТМО, Ярославском государственном университете, ОАО «Концерн «НПО «АВРОРА» и доступным на сайте [12], и проверим, как они выражаются при помощи шаблонов. Пример организации промежуточных результатов анализа приводится в табл. 2. В столбцах «Требование» и «Исходная формальная запись» приводятся оригинальные требования из источника (столбец «Источник»), записанные на естественном языке и одном из формализмов соответственно. В столбце «Шаблон, Ограничение» приводится запись шаблона, подстановка необходимых утверждений в который, даст эквивалентную исходной формальной записи. В случае необходимости приводится формальное доказательство эквивалентности.

Требование	Исходная формальная запись	Шаблон, Ограничение	Источник
Если произошла поломка нагревателя или одного из клапанов, то кофеварка (основной автомат $A_0$ ) обязательно перейдет в состояние 5.	$AG(y_{31} = 4 \mid y_{32} = 4 \mid y_2 = 4) \ \& \ y_0 = 2 \rightarrow A(y_0 = 2 \cup y_0 = 5)$	Ответ (ограниченный), Глобально $AG(P \rightarrow A(S))$ , P: $(y_{31} = 4 \mid y_{32} = 4 \mid y_2 = 4) \ \& \ y_0 = 2$ , S: $y_0 = 2 \cup y_0 = 5$	2

Таблица 2. Анализ применимости шаблонов требований к спецификации автоматных программ

Всего было рассмотрено 118 требований и их вариантов из 20 источников. Установлено, что 85% требований покрывается пятью шаблонами. Оставшиеся 15% не удастся записать при помощи шаблонов из-за ряда причин, таких как ограниченность системы шаблонов и некоторых особенностей конкретной автоматной модели рассматриваемого приложения. Процентное соотношение между использованными шаблонами приведено на рис. 1, а между использованными ограничениями – на рис. 2.

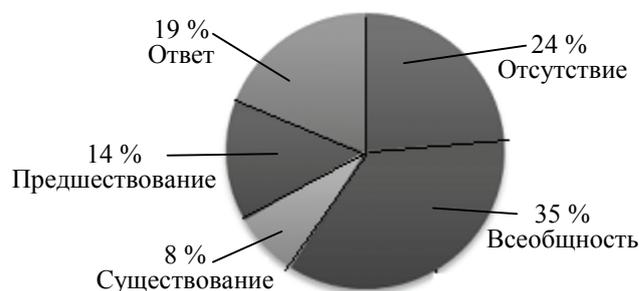


Рис. 1. Процентное соотношение между использованными шаблонами

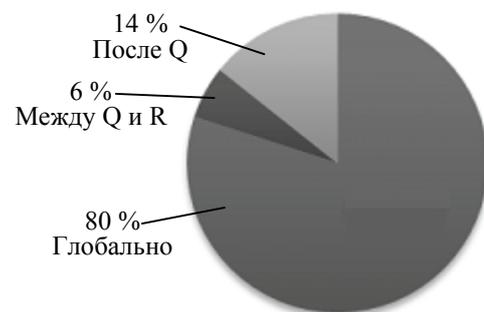


Рис. 2. Процентное соотношение между использованными ограничениями

### Метод записи верифицируемых требований на естественном языке

Существуют различные подходы к выделению формальных (верифицируемых) требований из спецификаций, записанных на естественном языке. Отметим два основных направления [13] – синтаксический разбор текстов и использование формальных грамматик, ограничивающих естественный язык.

В настоящей работе предлагается использовать формальную грамматику, которая приводится в табл. 3. Как отмечалось выше, грамматика основывается на основных шаблонах требований и их вариантах. Это позволяет иметь запись требования, как на естественном языке, так и на любом из формализмов, запись на которых разработана для шаблонов. Моноширинным шрифтом выделены указатели места заполнения шаблона реальными требованиями.

<требование>	::= <ограничение> <шаблон>
<ограничение>	::= «Для любого состояния верно, что»   «До состояния, в котором Q, верно что»   «После состояния, в котором Q, верно что»   «Между состоянием, в котором Q, до состояния, в котором R, верно что»   «После состояния, в котором Q, до состояния, в котором R, верно что»
<шаблон>	::= <отсутствие>   <всеобщность>   <существование>   <предшествование>   <ответ>   <ответ на следующем шаге>
<отсутствие>	::= «никогда не выполняется P»
<всеобщность>	::= «всегда выполняется P»
<существование>	::= «когда-нибудь выполнится P»
<предшествование>	::= «всегда верно, что если выполнено P, то до этого было выполнено S»
<ответ>	::= «всегда верно, что если выполнится P, то когда-нибудь выполнится S»
<ответ на следующем шаге>	::= «всегда верно, что если выполнится P, то в следующем состоянии выполнится S»

Таблица 3. Грамматика верифицируемых требований на подмножестве русского языка

В качестве примера рассмотрим реальное требование к системе управления кофеваркой, которое приводится в работе [3]: «Система управления кофеваркой никогда не попадет в такое состояние, в котором она не реагирует ни на события системного таймера, ни на нажатие кнопок «ОК» и «С». В автомат-

ной модели кофеварки требованию «Никак не реагирует ни на события системного таймера, ни на нажатие кнопок «ОК» и «С» соответствует предикат  $act = end$ . Наречие «никогда» подсказывает, что должен быть использован шаблон «Отсутствие» с ограничением «Глобально».

Выполним порождение:

$\langle \text{требование} \rangle \rightarrow \langle \text{ограничение} \rangle \langle \text{шаблон} \rangle \rightarrow$  Для любого состояния верно, что  $\langle \text{шаблон} \rangle \rightarrow$  Для любого состояния верно, что  $\langle \text{отсутствие} \rangle \rightarrow$  Для любого состояния верно, что никогда не выполняется Р

Подставив вместо Р реальное требование, получим искомое формальное требования на естественном языке: «Для любого состояния верно, что никогда не выполняется  $act = end$ ». Этому требованию на языках CTL и LTL соответствуют выражения  $AG(! act = end)$  и  $\square(! act = end)$ . Эти выражения совместно с автоматной моделью системы подаются на вход инструментальному средству, осуществляющему проверку на модели.

### Заключение

Запись требований в виде формул темпоральной логики является неотъемлемой частью верификации на модели. В настоящей работе в рамках автоматного программирования предложен подход, который, во-первых, значительно упрощает этот процесс, а во-вторых, минимизирует число потенциальных ошибок в самой спецификации.

В качестве приоритетного направления дальнейших исследований можно выделить инструментальную поддержку предложенного подхода. В работе [8] показывается, как система метапрограммирования *JetBrains MPS* [14] может быть использована как для разработки, так и для верификации автоматных программ. На текущий момент требования записываются в виде формул темпоральных логик, что может быть улучшено на основе описанного выше решения. Аналогично работам [13, 15, 16] может быть реализован помощник для интерактивного выбора необходимого ограничения и шаблона. Наконец, остается открытым ряд теоретических вопросов, таких как расширение набора шаблонов или запись существующих шаблонов на новом формализме.

Исследование проводится в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

### Литература

1. Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009. – 176 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/books/\\_book.pdf](http://is.ifmo.ru/books/_book.pdf), своб.
2. Васильева К.А., Кузьмин Е.В. Верификация автоматных программ с использованием LTL // Моделирование и анализ информационных систем. – 2007. – Т. 14. – № 1. – С. 3–14.
3. Кузьмин Е.В., Соколов В.А. Моделирование, спецификация и верификация «автоматных» программ // Программирование. – 2008. – № 1. – С. 38–60.
4. Кларк Э., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программ. Model Checking. – М.: Изд-во МЦНМО, 2002. – 416 с.
5. Гуров В.С., Яминов Б.Р. Технология верификации автоматных моделей программ без их трансляции во входной язык верификатора // Тезисы научно-технической конференции «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях». – СПбГУ ПУ, 2008. – С. 36–40 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/download/2008-02-24\\_jaminov\\_verifikazija.pdf](http://is.ifmo.ru/download/2008-02-24_jaminov_verifikazija.pdf), своб.
6. Лукин М.А., Шалыто А.А. Автоматизация верификации визуальных автоматных программ / Материалы XV Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке». – СПбГПУ, 2008. – С. 296–297 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/download/2008-02-25\\_politech\\_tezis.pdf](http://is.ifmo.ru/download/2008-02-25_politech_tezis.pdf), своб.
7. Kurbatsky E. Verification of Automata-Based Programs // Proceedings of the Second Spring Young Researchers Colloquium on Software Engineering. – 2008. – V. 2. – P. 15–17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/verification/\\_kurbatsky\\_syrcse.pdf](http://is.ifmo.ru/verification/_kurbatsky_syrcse.pdf), своб.
8. Степанов О.Г. Методы реализации автоматных объектно-ориентированных программ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПбГУ ИТМО, 2009. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/disser/stepanov\\_disser.pdf](http://is.ifmo.ru/disser/stepanov_disser.pdf), своб.
9. Мейер Б. Объектно-ориентированное конструирование программных систем. – М.: Русская редакция, 2005. – 1204 с.
10. Dwyer M.B., Avrunin G.S., Corbett J.C. Property Specification Patterns for Finite-state Verification // Proceedings of the 2nd Workshop on Formal Methods in Software Practice. – 1998.
11. Dwyer M.B., Avrunin G.S., Corbett J.C. Patterns in Property Specifications for Finite-state Verification // Proceedings of the 21st International Conference on Software Engineering. – 1999.

12. Веб-сайт кафедры «Технологии программирования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://is.ifmo.ru/>, своб.
13. Konrad S., Cheng B.H.C. Facilitating the Construction of Specification Pattern-based Properties // Proceedings of the IEEE International Requirements Engineering Conference. – 2005.
14. JetBrains Meta Programming System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jetbrains.com/mps/index.html>, своб.
15. Smith R.L., Avrunin G.S., Clarke L.A., Osterweil L.J. PROPEL: An Approach Supporting Property Elucidation // Proceedings of the 24th Int'l. Conference on Software Engineering. – 2002.
16. Mondragon O., Gates A.Q., Roach S. Prospec: Support for Elicitation and Formal Specification of Software Properties // Proceedings of Run-time Verification Workshop. – 2004.

- Клебанов Андрей Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, [klebanov.andrey@gmail.com](mailto:klebanov.andrey@gmail.com)
- Степанов Олег Георгиевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, [oleg.stepanov@gmail.com](mailto:oleg.stepanov@gmail.com)
- Шалыто Анатолий Абрамович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, [shalyto@mail.ifmo.ru](mailto:shalyto@mail.ifmo.ru)

УДК 519.863:336.714

## **ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММАХ НА ЯЗЫКЕ С НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНИВАНИЯ ОПЦИОНОВ ЕВРОПЕЙСКОГО ТИПА**

**С.И. Бастраков, Р.В. Донченко, И.Б. Мееров, А.Н. Половинкин**

Рассматриваются вопросы оптимизации вычислений в прикладных расчетных программах на языке С. Основной целью оптимизации в данном случае является эффективная утилизация имеющихся вычислительных ресурсов. Изложение проводится на примере решения задачи определения справедливой цены опциона европейского типа. Эффективность предложенного подхода подтверждена вычислительными экспериментами.

**Ключевые слова:** оптимизация вычислений, многоядерные архитектуры, финансовая математика.

### **Введение**

Оптимизация вычислений для уменьшения времени работы прикладных программ расчетного характера – актуальная задача современной науки и техники. Решением этой задачи активно занимаются ученые и инженеры по всему миру [1–3]. Существенной проблемой является то, что прикладные программисты часто не вполне владеют приемами оптимизации ПО, а системные программисты плохо разбираются в предметных областях, что затрудняет процесс оптимизации. В настоящей работе авторы ставят целью продемонстрировать методику уменьшения времени вычислений, не выходя за рамки многоядерных архитектур и языка программирования высокого уровня, оставаясь в пределах доступного исследователю программно-аппаратного окружения. Изложение ведется на примере языка С, подавляющая часть описанных приемов с тем же успехом может быть применена к программам на языке Fortran (чаще всего именно С или Fortran используются при реализации численных методов). Для иллюстрации приемов оптимизации рассматривается задача из области финансовой математики – определение справедливой цены опциона европейского типа. Процесс оптимизации вычислений иллюстрируется фрагментами программного кода, полученный результат подтверждается вычислительными экспериментами.

### **Постановка задачи и метод решения**

Цена европейского опциона, основанного на облигации, может быть вычислена по следующим формулам [4, 5]:

$$C(t, s) = E(e^{-\int_t^s r(u)du} \max\{P(s, T) - K, 0\}), \quad 0 \leq t \leq s \leq T \quad (1)$$

где  $t$  – текущий момент времени;  $s$  – срок исполнения опциона;  $P(s, T)$  – цена в момент времени  $s$  облигации со сроком погашения  $T$ ;  $K$  – цена исполнения опциона;  $r(t)$  – краткосрочная безрисковая ставка в момент времени  $t$ . Искомая величина – цена опциона  $C = C(0, s)$ . (Дополнительная информация об использованных понятиях может быть получена из работы [4]). Математическая постановка задачи, метод решения и вычислительная схема подробно описаны в [5]. Приведем краткое описание схемы проведения вычислений на концептуальном уровне.

Задача решается методом Монте-Карло.

*Шаг 1. Инициализация параметров начальными значениями.*

*Шаг 2. Вычисления для определения цены опциона методом Монте-Карло.*

В цикле от 0 до количества повторений в методе Монте-Карло выполнить:

*Шаг 2.1.* Пусть  $k$  – число шагов в разностной схеме решения стохастического дифференциального уравнения (СДУ), описывающего поведение ставки  $r(t)$  от момента заключения опционного контракта ( $t = 0$ ) до истечения срока его исполнения ( $t = s$ ). На данном шаге генерируется  $k$  нормально распределенных псевдослучайных чисел.

*Шаг 2.2.* Решение СДУ методом Эйлера. Используются результаты шага 2.1. Вычисляются  $k$  значений процентной ставки  $r(t)$  на рассматриваемом интервале времени.

*Шаг 2.3.* Определение цены облигации  $P(s, T)$ .

*Шаг 3. Усреднение полученных данных: вычисление цены опциона  $C = C(0, s)$  по формуле (1).*

### Программная реализация и оптимизация

В рамках данной работы для демонстрации приемов оптимизации по скорости создано несколько версий ПО. Каждая следующая версия улучшает предыдущую, сокращая время работы. Реализация выполнена на языке программирования ANSI C. Кроме того, разработана отдельная версия с использованием NVidia CUDA, оптимизированная под графические процессоры NVidia.

**Параметры задачи и окружение.** В тестовой задаче выполнялось определение цены 30 опционов с разным значением цены исполнения, использовалось 50000 повторений в методе Монте-Карло и вещественная арифметика двойной точности. Количество опционов было выбрано из тех соображений, чтобы время работы базовой версии составляло порядка 300 секунд. Вычислительный эксперимент производился с использованием следующего программно-аппаратного окружения: 2x INTEL XEON e5520 (4 ядра, 2,27 ГГц), 16 Гб ОЗУ, NVIDIA TESLA c1060 (240 ядер, 1,30 гГц), OPENSUSE LINUX 11.1 (x86\_64), kernel 2.6.27.29-0.1-default, glibc 2.9, gcc 4.3.2, INTEL C++ compiler for linux 11, intel math kernel library 10.2.2, nvidia cuda toolkit 2.2.

**Базовая версия – элементы реализации.** Базовая версия представляет собой неоптимизированную реализацию описанной ранее вычислительной схемы. Для генерации псевдослучайных чисел на шаге 2.1 применяется второй вариант преобразования Бокса–Мюллера [6]; равномерно распределенные на  $(0,1)$  числа получаются при помощи генератора MCG59 (реализован по описанию в [7]). Общее время работы исходной версии составляет 327 с.

**Базовая версия – профилировка и оптимизирующий компилятор.** Первоначальным этапом оптимизации отлаженного работоспособного программного кода является его профилировка. В данной работе использовалась консольная версия Intel VTune Performance Analyzer. Рассмотрим результаты профилирования базовой версии (компилятор gcc, ключ оптимизации – O2).

В таблицах приведены наиболее требовательные к вычислительным ресурсам функции, количество тактов процессора (NT) и относительное время работы функций в процентах от общего времени работы программы (SelfTime). Время, потраченное на вызов других функций из анализируемых функций, не учитывается.

Описание функции	Имя функции	NT	SelfTime
Моделирование $r(t)$ (Шаг 2.2)	pow	442 342	85,80%
Генерация псевдослучайных чисел (Шаг 2.1)	log	18 541	3,60%
	generateGaussian	11 985	2,32%
	sincos	3 900	0,76%
Вспомогательные вычисления	run	17 459	3,39%

Из результатов профилирования видно, что основную вычислительную нагрузку составляют моделирование процентной ставки (~86%) и генерация псевдослучайных чисел (~7%). Прежде чем приступить к программной оптимизации, попробуем добиться прироста производительности при помощи использования оптимизирующих компиляторов. В рамках данной работы используется один из лучших компиляторов C/C++ – Intel C++ Compiler for Linux 11.

Без каких-либо изменений кода программы общее время работы составляет 99,08 с, что в 3,3 раза меньше, чем для версии, скомпилированной gcc.

**Оптимизированная версия – предварительные вычисления.** Выполним профилировку базовой версии, откомпилированной при помощи Intel C++ Compiler.

Описание функции	Имя функции	NT (gcc)	NT (Intel)	SelfTime
Моделирование $r(t)$ (Шаг 2.2)	pow.L	442 342	114 993	73,40%
Генерация псевдослучайных чисел (Шаг 2.1)	log.L	18 541	8 496	5,42%
	libm_sse2_sincos	3 900	4 167	2,66%
Вспомогательные вычисления	run	17 459 + 11 985	26 869	17,15%

Как видно из профиля, время, затраченное на вычисление pow, уменьшилось почти в 4 раза, время вычисления log также уменьшилось почти в 2 раза. Можно заметить, что из списка «исчезла» функция generateGaussian, при этом увеличилось время работы функции run. Это вызвано тем, что функция generateGaussian была встроена компилятором, что привело к уменьшению времени работы (17 459 + 11 985 > 26 869).

Рассмотрим фрагмент кода, выполнение которого занимает 73,4% времени работы программы.

```
r[0] = f0t; phi1 = 0; phi2 = 0; chil = 0;
for (i = 0; i < numSteps; i++) {
    dr = (kappa * (f0t - r[i]) + phi1 + phi2 + kappa * chil) * dt +
        sigma1 * pow(r[i], alpha) * z1[i] + sigma2 * pow(r[i], beta) * z2[i];
    dphi1 = sigma1 * sigma1 * pow(r[i], 2 * alpha) * dt;
    dphi2 = (sigma2 * sigma2 * pow(r[i], 2 * beta) - 2 * kappa * phi2) * dt;
    dchil = phi1 * dt + sigma1 * pow(r[i], alpha) * z1[i];
    r[i + 1] = r[i] + dr; phi1 += dphi1; phi2 += dphi2; chil += dchil;
}
```

Несложный анализ приведенного фрагмента показывает, что количество вызовов «тяжеловесной» функции pow избыточно: достаточно вычислить величины pow(r[i], alpha), pow(r[i], beta) один раз и затем использовать вычисленные значения, а также их квадраты вместо pow(r[i], 2\*alpha), pow(r[i], 2\*beta). Кроме того, во всех вхождении значения pow(r[i], alpha) умножается на sigma1, а pow(r[i], beta) – на sigma2, поэтому целесообразно вычислить данные произведения заранее. Ниже приведен усовершенствованный участок кода:

```
r[0] = f0t; phi1 = 0; phi2 = 0; chil = 0;
for (i = 0; i < numSteps; i++) {
    double c0, c1;
    c0 = sigma1 * pow(r[i], alpha); c1 = sigma2 * pow(r[i], beta);
    r[i+1] = r[i] + (kappa * (f0t - r[i]) + phi1 + phi2 + kappa * chil) * dt +
        c0 * z1[i] + c1 * z2[i];
    chil += phi1 * dt + c0 * z1[i];
    phi1 += c0 * c0 * dt; phi2 += (c1 * c1 - 2 * kappa * phi2) * dt;
}
```

Общее время работы составляет 64,86 с, что в 1,5 раза быстрее предыдущей версии.

**Оптимизированная версия – использование инструкций SIMD.** Выполним профилирование разработанной версии программной реализации (столбец Intel+) для поиска путей дальнейшей оптимизации.

Описание функции	Имя функции	NT (Intel)	NT (Intel+)	SelfTime
Моделирование $r(t)$ (Шаг 2.2)	pow.L	114 993	67 360	65,58%
Генерация псевдослучайных чисел (Шаг 2.1)	log.L	8 496	8 442	8,22%
	generateGaussian	встроена	8 813	8,58%
	libm_sse2_sincos	4 167	4 318	4,20%
Вспомогательные вычисления	run	26 869	12 273	11,95%

В результате уменьшения количества вычислений суммарное время работы pow (NT Intel+) уменьшилось почти в 2 раза по сравнению с предыдущей версией (NT Intel). Время работы остальных функций практически не изменилось, существенное ускорение функции run является мнимым – компилятор решил не встраивать функцию generateGaussian. Исходя из результатов анализа текущей версии кода, на следующем этапе оптимизации было решено использовать векторизацию. Необходимо отметить, что многие циклы векторизуются компилятором Intel автоматически при включении опции -O2. При этом эвристика компилятора предсказывает, ожидается ли выигрыш от векторизации. Для устранения возможных ошибок прогноза существует директива #pragma vector always, действующая для ближайшего цикла.

Рассмотрим приведенный выше фрагмент кода. Очевидно, что цикл не может быть векторизован из-за большого количества зависимостей внутри итерации и между итерациями. Тем не менее, возможности для оптимизации все еще остаются.

Попробуем «вручную» векторизовать вызовы row – самой трудоемкой функции в данной программе. Для этого создадим массивы из двух элементов и цикл из двух итераций. Иногда компилятор откажется от векторизации такого короткого цикла, поэтому воспользуемся директивой **#pragma vector always**. Ответ на вопрос о том, был ли векторизован цикл, можно получить из отчета компилятора о векторизации.

```
r[0] = f0t; phi1 = 0; phi2 = 0; chi1 = 0;
for (i = 0; i < numSteps; i++) {
    double c[2], sigma[2] = {sigma1, sigma2}, power[2] = {alpha, beta};
    int k;
    #pragma vector always
    for (k = 0; k < 2; k++)
        c[k] = sigma[k] * pow(r[i], power[k]);
    ...
}
```

В результате изменений время работы данной версии (Intel++) составляет 54,8 с, что на 20% меньше, чем время работы предыдущей версии.

**Оптимизированная версия – использование библиотек.** Выполним профилировку для поиска возможностей дальнейшей оптимизации.

Описание функции	Имя функции	NT (Intel+)	NT (Intel++)	SelfTime
Моделирование $r(t)$ (Шаг 2.2)	__svml_pow2.A	67 360	53 082	61,20%
Генерация псевдослучайных чисел (Шаг 2.1)	log.L	8 442	8 555	10,06%
	generateGaussian	8 813	8 726	9,86%
	libm_sse2_sincos	4 318	4 313	4,22%
Вспомогательные вычисления	run	12 273	11 131	12,83%

Как видно из профиля, используется векторная функция вычисления степени *\_\_svml\_pow2.A*, ее время работы почти на 20% меньше, чем в предыдущей версии.

Практически все предыдущие оптимизации были направлены на уменьшение времени работы функции возведения в степень row. В итоге генерация случайных чисел стала занимать существенное время от общего – около 25%, что является поводом для оптимизации и этого этапа вычислений, для чего используется оптимизированная под процессоры Intel библиотека Intel Math Kernel Library (MKL), в состав которой, в частности, входят генераторы псевдослучайных чисел. Так, для генерации нормально распределенных псевдослучайных чисел может быть использована функция *vdRngGaussian*. Рассмотрим профиль приложения после изменений.

Описание функции	Имя функции	NT (Intel+)	NT (Intel_MKL)	SelfTime
Моделирование $r(t)$ (Шаг 2.2)	__svml_pow2.A	53 082	53 736	70,59%
Генерация псевдослучайных чисел (Шаг 2.1)	_vmlSinCos_26	21 594	10 420	13,69%
	vdRngGaussianBoxMuller2			
	vmlLn_26			
	vmlSqrt_26			
	vsldBRngMCG59			
Вспомогательные вычисления	run	11 131	10 829	14,23%

Как видно из профиля, время генерации случайных чисел уменьшилось примерно в 2 раза. Общее время работы составляет 48,35 с, что на 13% меньше, чем ранее.

**Оптимизированная версия – параллельные вычисления.** В заключение попробуем распараллелить наши вычисления для систем с общей памятью. Одним из наиболее простых подходов является применение технологии OpenMP, где для реализации параллельности необходимо лишь использовать дополнительные директивы компилятора. Рассматриваемое приложение выполняет расчет цен нескольких независимых опционов. На практике количество таких опционов может достигать нескольких тысяч,

при этом время расчета цены одного контракта одинаково, не зависит от цены исполнения. Поэтому распараллеливание произведено на уровне задач, как показано ниже.

```
#pragma omp parallel for
for (i = 0; i < numOptions; i++) {
    ...
    getAveragePrice_MKL(&data_MKL_openMP[i]);
}
```

Время работы программы на 8 вычислительных ядрах составило 6,98 с, что в 46,87 раз меньше, чем в базовой версии.

Ниже приведены диаграммы, иллюстрирующие ускорение для параллельной версии (рис. 1) и результаты оптимизации (рис. 2).

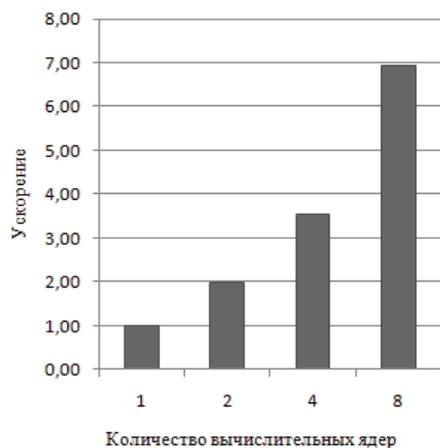


Рис. 1. Ускорение параллельной версии

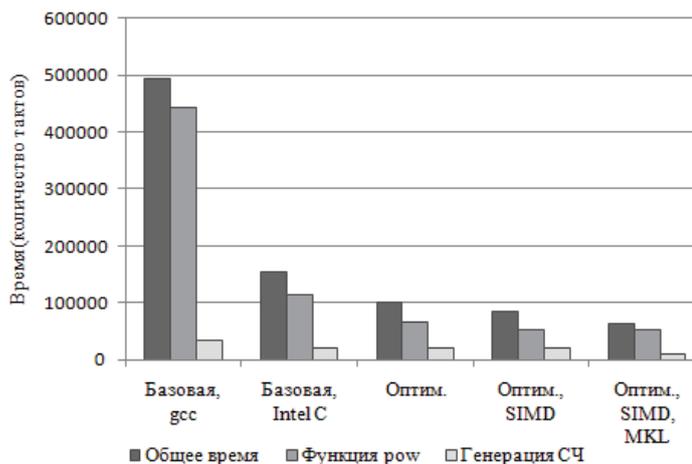


Рис. 2. Результаты оптимизации

**Реализация на графическом процессоре.** В настоящий момент в научной и научно-популярной литературе большое внимание уделяется программированию на графических процессорах (GPU). Основной акцент в таких публикациях часто делается на пиковую производительность GPU, многократно превосходящую пиковую производительность центрального процессора (CPU). При этом решаемые задачи чаще всего характеризуются большим количеством однотипных вычислений над однотипными данными. При таких условиях (идеальное распараллеливание) GPU, как правило, демонстрируют свою эффективность. В данной работе мы попробовали перенести имеющийся (достаточно хорошо распараллеливаемый) код на GPU с использованием NVidia CUDA, уделяя основное внимание производительности.

В выполненной реализации каждому опциону соответствует блок потоков (каждый из которых назначается на свой мультипроцессор): при этом каждый поток внутри блока выполняет свою часть итераций метода Монте-Карло. Такое распределение работы позволяет разместить необходимые для вычисления опциона общие данные в так называемой разделяемой (общей) памяти, имеющей низкую латентность. Роль центрального процессора в данном случае ограничивается подбором конфигурации запуска вычислительного ядра и копированием входных данных в память GPU, а выходных – обратно. Как и в случае реализации для CPU, использовались вычисления двойной точности. Время работы приложения на GPU составило 6,43 с, что сопоставимо с временем работы на CPU – 6,98 с (в обоих случаях рассмотрены параллельные реализации).

Конечно, одной задачи недостаточно, чтобы делать далеко идущие выводы. Однако идея переноса расчетных программ на GPU как способ быстрого и «бесплатного» увеличения их производительности представляется как минимум дискуссионной из-за следующих проблем. Оптимизация по скорости на GPU требует существенного опыта подобной работы и дополнительной подготовки: написание программ, которые эффективно используют преимущества архитектуры графического процессора без глубокого знания данной архитектуры является на сегодняшний день трудновыполнимым. Так, при наличии навыков работы с NVidia CUDA и работающего на CPU исходного кода перенос сравнительно несложного приложения (около 740 строк, включая исходные и заголовочные файлы с функциями вычислений, тестирования, ввода-вывода, подробными комментариями) потребовал времени, сравнимого со временем написания данного кода с нуля. Дополнительно положение осложняется отсутствием возможностей для полноценной отладки (в настоящий момент компания NVidia выпустила отладчик с ограниченной функциональностью). Архитектура GPU накладывает серьезные ограничения на схему распараллеливания; кроме того, чем больше сложность вычислительной части, тем менее эффективно удается использовать

вычислительную мощь устройства из-за относительной нехватки регистров и общей памяти. Таким образом, представляется, что эффективное использование GPU+Nvidia CUDA возможно далеко не во всех задачах и требует наличия в коллективе опытных системных программистов.

### **Заключение**

В работе на примере конкретной задачи исследуются вопросы оптимизации времени работы прикладного ПО для современных вычислительных систем с общей памятью. Суть предлагаемого подхода состоит в эффективном использовании алгоритмической, компиляторной, программной оптимизации, а также специализированных средств – оптимизирующих компиляторов, профилировщиков, математических библиотек. В результате применения рассмотренных методов и средств оптимизации время работы последовательной версии программы сократилось в 6,77 раза, а после распараллеливания – в 46,87 раза при выполнении на 8 вычислительных ядрах.

Работа выполнена в лаборатории «Информационные технологии» (ITLab) ВМК ННГУ.

### **Литература**

1. Gerber R., Bik A., Smith K., Tian X. The Software Optimization Cookbook Second Edition. High Performance Recipes for IA 32 Platforms // Intel Press, 2005.
2. Fog A. Optimizing software in C++: An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms. – 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.agner.org/optimize/optimizing\\_cpp.pdf](http://www.agner.org/optimize/optimizing_cpp.pdf), своб.
3. Касперски К. Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти. – СПб: BHV, 2003. – 464 с.
4. Халл Дж. Опционы, фьючерсы и другие производные финансовые инструменты. – М.: Вильямс, 2007. – 1056 с.
5. Inui K., Kijima M. A Markovian framework in multi-factor HJM models // Journal of financial and quantitative analysis. – 1998. – V. 33. – № 3. – P. 423–440.
6. Box G.E.P. and M.E. Muller. A Note on the Generation of Random Normal Deviates // Ann. Math. Stat. – 1958. – V. 28. – P. 610–611.
7. Intel MKL. Vector Statistical Library Notes, revision -019, section 8.4.4.

- Бастраков Сергей Иванович** – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, студент, [sergey.bastrakov@gmail.com](mailto:sergey.bastrakov@gmail.com)
- Донченко Роман Владимирович** – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, студент, [ss.donchenko@itlab.unn.ru](mailto:ss.donchenko@itlab.unn.ru)
- Мееров Иосиф Борисович** – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, кандидат технических наук, доцент, [mib@uic.nnov.ru](mailto:mib@uic.nnov.ru)
- Половинкин Алексей Николаевич** – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, аспирант, [alexey.polovinkin@gmail.com](mailto:alexey.polovinkin@gmail.com)

УДК 543.456+52-17

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ НАНОПОРИСТЫХ СТЕКОЛ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ МЕТОДОМ КОНФОКАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ МИКРОСКОПИИ**

И.В. Кухтевич, А.А. Евстапов

Получены изображения наноструктурированных пористых стекол методом конфокальной сканирующей лазерной микроскопии. Изображения свидетельствуют о наличии неоднородной структуры с разными оптическими свойствами. Осуществлена фильтрация изображений и построены гистограммы распределения интенсивности по оттенкам серого для отфильтрованных изображений. Проведен анализ зависимости высоты максимума гистограмм от времени термообработки стекол. Обсуждаются процессы, происходящие в стеклах при термической обработке.

**Ключевые слова:** наноструктуры, пористые стекла, конфокальная сканирующая лазерная микроскопия, фильтрация.

**Введение**

Перспективность применения наноструктурированных пористых стекол (НПС) в качестве функциональных элементов микрофлюидных устройств в аналитическом приборостроении [1, 2] вызывает необходимость оптимизации их состава и параметров структуры порового пространства.

Известно, что создание НПС базируется на явлении жидкостного фазового разделения (ликвации) в стеклообразующих оксидных щелочноборосиликатных (ЩБС) системах и процессе химического травления стекол с двухкаркасной структурой (двухфазных стекол), в результате которого получают высококремнеземные НПС со сквозными наноразмерными порами [3].

Для получения информации о характеристиках НПС, способствующей созданию стекол с оптимальным составом и требуемой структурой, применен метод конфокальной сканирующей лазерной микроскопии (КСЛМ). Этот метод является неразрушающим методом измерений, что дает возможность проводить многократные исследования на одних и тех же образцах НПС, а так же изучать пространственную структуру оптически прозрачных образцов (структуру в приповерхностном объеме) [4]. Разрешение метода КСЛМ составляет 0,2 мкм, что не позволяет непосредственно исследовать тонкую структуру НПС, но позволяет наблюдать отражение и рассеяние от структурных неоднородностей (т.е. изучать оптические свойства образцов) [5]. В работе показано, что подобный подход может быть использован для характеристики структуры НПС и изучения процессов, происходящих в стеклах при термической обработке.

В работе исследовались НПС НФФ-МАП, изготовленные из двухфазных стекол на основе стекла 8/70 (состав (мол. %)  $7,6 \text{ Na}_2\text{O} - 20,4 \text{ B}_2\text{O}_3 - 71,9 \text{ SiO}_2 - 0,1 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ), модифицированного путем добавки оксида фосфора и фторид-ионов, прошедших тепловую обработку при  $550^\circ\text{C}$  в течение разного времени [6].

**Экспериментальные исследования: получение КСЛМ изображений**

На микроскопе Leica TCS SL (Leica, Germany) были получены изображения приповерхностного слоя образцов НПС НФФ-МАП с разным временем термообработки (выдержки образцов исходных двухфазных стекол при температуре  $550^\circ\text{C}$ ), которые представлены на рис. 1. На изображениях не визуализируется непосредственно структура образца, а наблюдается картина, связанная с эффектами отражения и рассеяния на структурных неоднородностях. Отчетливо прослеживается изменение оптических свойств образцов в зависимости от времени термообработки исходного двухфазного стекла. По данным, полученным методом просвечивающей электронной микроскопии, термическая обработка стекол приводит к укрупнению фазовых неоднородностей структуры [6]. Полученные результаты подтверждают эти данные.

**Построение гистограмм КСЛМ изображений**

Чтобы охарактеризовать полученные изображения НПС НФФ-МАП, было решено построить гистограммы распределения пикселей на изображениях по оттенкам серого. Для построения гистограмм изображений, первоначально была проведена фильтрация методом свертки [7], т.е. усреднение каждой точки изображения по окрестности при помощи ядра свертки с целью удаления случайных шумов на

изображениях, и как следствие, для устранения резких пиков (выбросов) на получаемых гистограммах. В данном случае применялось ядро свертки вида  $[010; 101; 010]$ . Затем были построены гистограммы отфильтрованных изображений и произведена их отцентровка по максимумам, т.е. градация серого, обладающая самой большой интенсивностью (числом пикселей), устанавливалась в нуль по оси абсцисс (производилось смещение всей гистограммы на разность между нулевой градацией и градацией с максимальной интенсивностью). После проведения этих процедур были получены гистограммы, представленные на рис. 2.

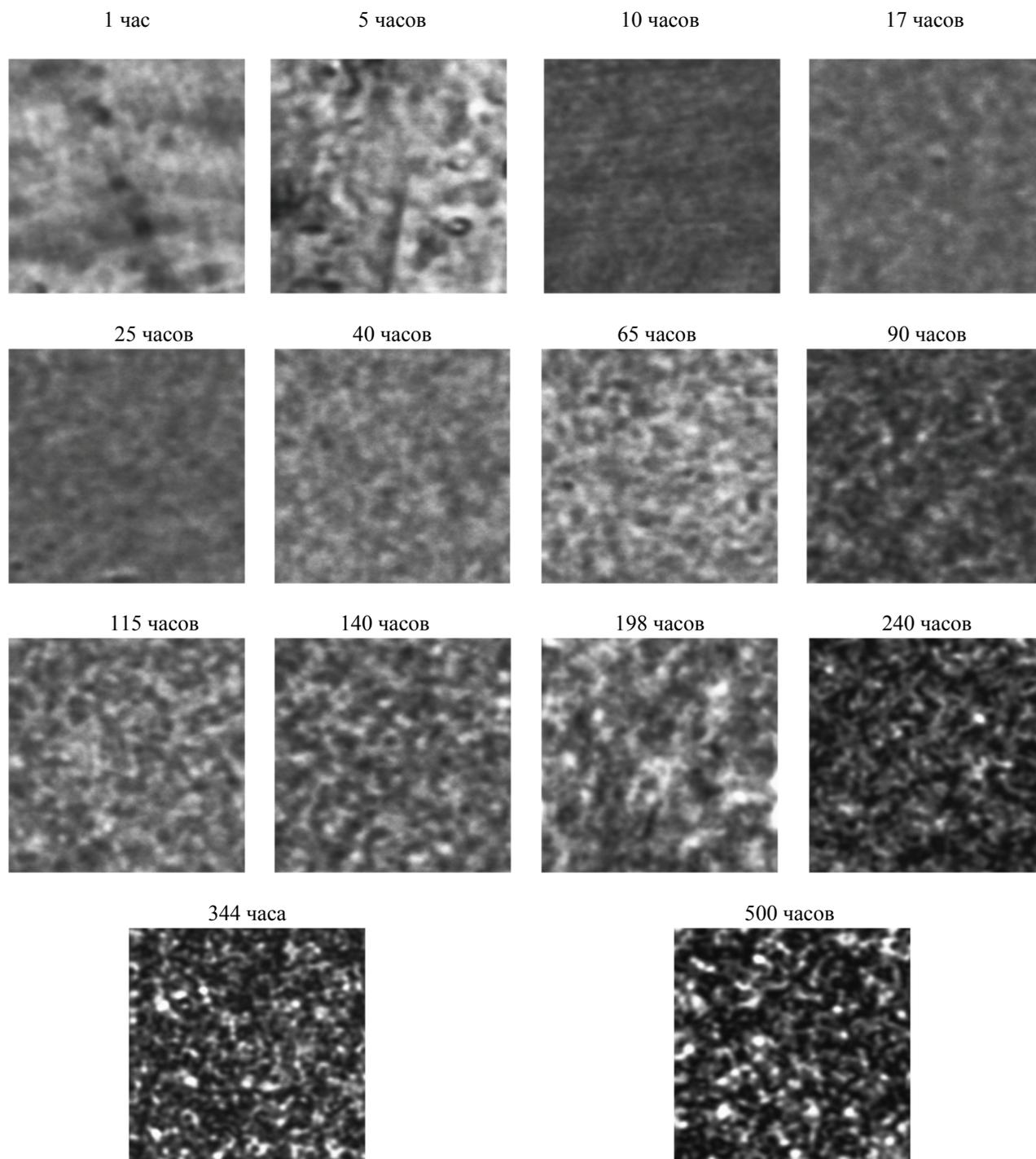
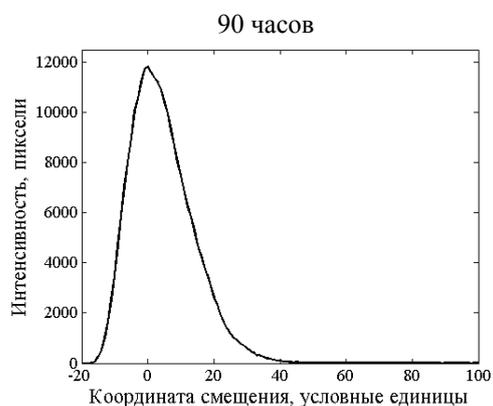
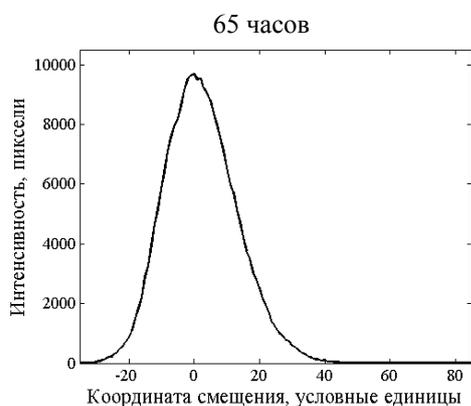
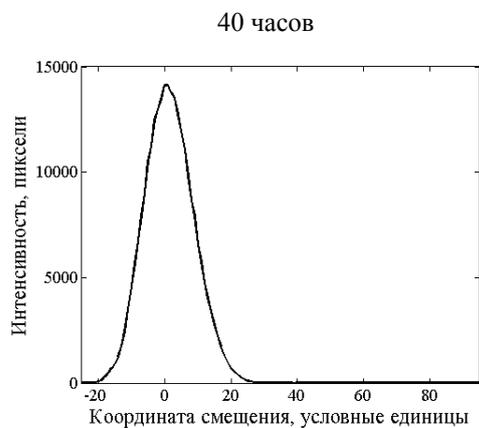
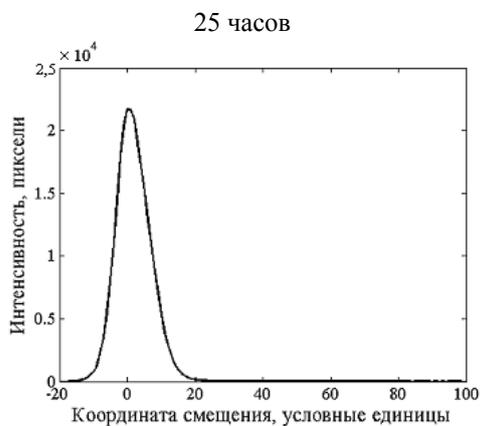
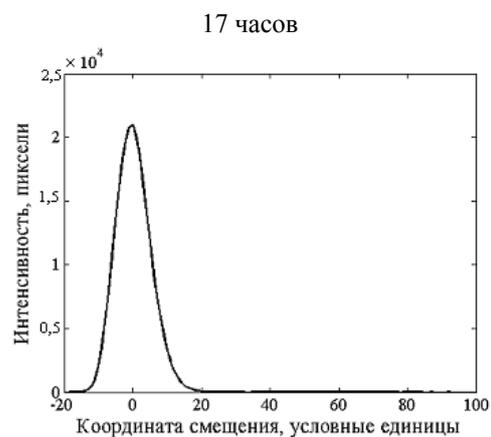
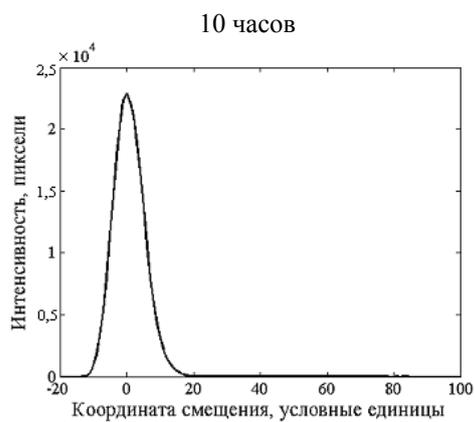
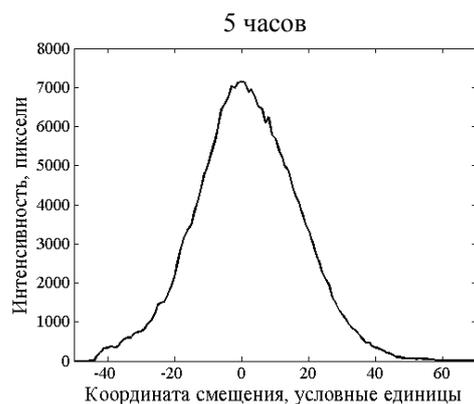
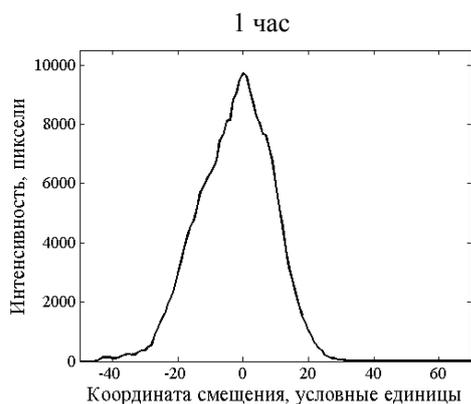


Рис. 1. Изображения НПС НФФ-МАП для разных времен тепловой обработки при 550°C, полученные на КСЛМ Leica TCS SL. Изображения имеют размер 15×15 мкм и разрешение 512×512 пикселей



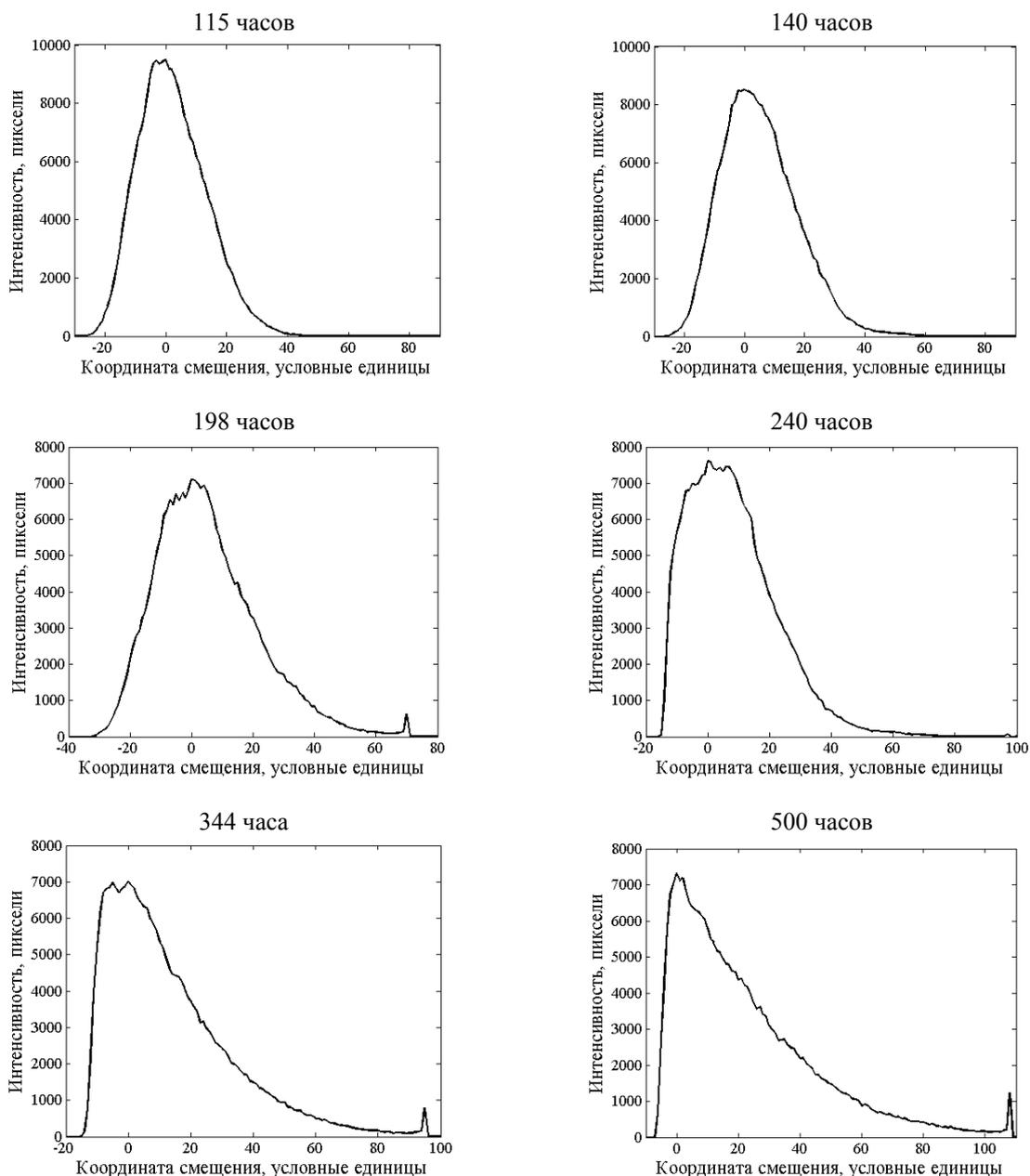


Рис. 2. Гистограммы отфильтрованных КСЛМ изображений НПС НФФ-МАП для разных времен тепловой обработки при 550°C. У всех гистограмм максимум находится в нуле по оси абсцисс (ось в условных единицах, так как было произведено смещение гистограммы по градациям серого). По оси ординат откладывается интенсивность (количество пикселей)

Отметим, что маленькие пики интенсивности, расположенные справа от максимума (в интервале от 60 до 110 по оси абсцисс) на гистограммах для отфильтрованных изображений НПС НФФ-МАП с временем термообработки 198, 240, 344 и 500 часов, свидетельствуют о том, что на изображениях имеются небольшие области засветки, вероятно, образованные вследствие сильного светорассеяния образцов.

### Зависимость интенсивности максимума гистограмм от времени термообработки

При анализе гистограмм отфильтрованных КСЛМ изображений НПС НФФ-МАП, было обнаружено, что с изменением времени термообработки значительно изменяется интенсивность их максимумов. На рис. 3 приведена зависимость максимумов интенсивности гистограмм от времени термообработки образцов, на которой наблюдается максимум в интервале 10–25 часов термообработки, в области 65 часов – минимум, затем в районе 90 часов термообработки наблюдается еще один максимум, а со 198 часов термообработки наблюдается плавный переход на постоянный уровень.

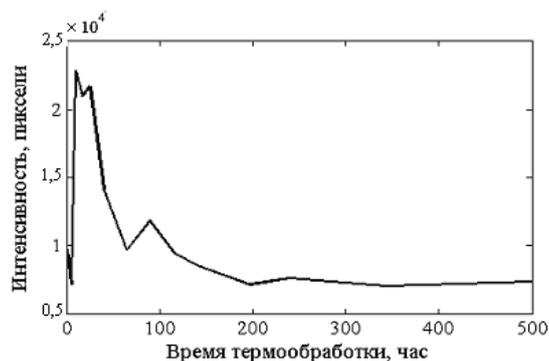


Рис. 3. Зависимость максимумов гистограмм отфильтрованных КСЛМ изображений НПС НФФ-МАП от времени термообработки

### Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы и предположения.

1. Изображения НПС НФФ-МАП, полученные методом КСЛМ, показывают наличие изменений, которые происходят со структурой стекла при изменении времени термообработки (изображения НПС на рис. 1 претерпевают изменения от нечетких изображений до изображений с ярко выраженной пространственно-объемной структурой, что свидетельствует об изменении оптических свойств, происходящих вследствие структурных изменений).
2. Можно предположить, что максимумы и минимумы зависимости на рис. 3 свидетельствуют о фазовых трансформациях, происходящих при термической обработке в НПС [6]. Так, по-видимому, в районе 65 часов термообработки исходного двухфазного стекла наблюдается переход между двумя процессами: процессом фазового разделения (образование зародышей новой фазы, формирование двухкаркасной структуры) и процессом переконденсации, т.е. укрупнением фаз [8]. Об этом также можно судить по изображениям на рис. 1, на которых видно, как происходит формирование и укрупнение своеобразной структуры, а также по гистограммам (рис. 2), на которых после 65 часов термообработки проявляются отклонения от нормального закона распределения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-08-00733а) и отделения химии и наук о материалах РАН (проект ПФИ ОХНМ-02 РАН).

Авторы благодарят научного сотрудника лаборатории физической химии стекла Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН И.Н. Анфимову за изготовление образцов стекол.

### Литература

1. Yao S., Santiago J.G. Porous glass electroosmotic pumps: theory // J. Colloid and Interface Science. – 2003. – V. 268. – № 2. – P. 133–142.
2. Евстрапов А.А., Есикова Н.А., Рудницкая Г.Е., Антропова Т.В. Application of porous glasses in microfluidic devices // Optica Applicata. – 2008. – V. 38. – № 1. – P. 31–38.
3. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. – Л.: Наука, 1991. – С. 222–227.
4. Кларк Эшли Р., Эберхардт Колин Н. Микроскопические методы исследования материалов. – М.: Техносфера, 2007. – С. 211–218.
5. Евстрапов А.А., Есикова Н.А., Клоков М. В., Кухтевич И.В., Антропова Т.В. Исследование пористых стекол методами конфокальной лазерной сканирующей микроскопии и оптической микроскопии ближнего поля // Научное приборостроение. – 2009. – Т. 19. – № 2. – С. 52–65.
6. Antropova Tatiana, Drozdova Irina, Kukhtevich Igor, Evstrapov Anatolii, Esikova Nadia. Application of high resolution microscopy and optical spectroscopy for study of phase separation in phosphorus- and fluorine-containing sodium borosilicate glasses // Optica Applicata. – 2010. – V. 40. – № 2.
7. Кларк Эшли Р., Эберхардт Колин Н. Микроскопические методы исследования материалов. – М.: Техносфера. – 2007. – С. 134–143.
8. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. – Л.: Наука, 1991. – С. 29–36.

**Кухтевич Игорь Владимирович**

– Институт химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН, инженер, ba@inbox.ru

**Евстрапов Анатолий Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, an\_evs@mail.ru

УДК 536.62

**АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ  
ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ**

**К.В. Кириллов, Н.В. Пилипенко**

Исследовано применение различных модификаций цифрового фильтра Калмана (ФК) для решения граничных и коэффициентных обратных задач теплопроводности. Приведено описание как математических моделей теплопереноса и измерений, так и алгоритмов вычислительных подпрограмм. Представлены результаты тестирования разработанных программ.

**Ключевые слова:** дифференциально-разностные модели теплопереноса, граничные и коэффициентные обратные задачи теплопроводности, фильтр Калмана.

**Введение**

Одной из наиболее проблемных задач теплотрии при исследовании промышленных объектов и технологических процессов является определение нестационарных условий теплообмена с помощью приемников теплового потока (ППП) по измеренным в них температурам или их разностям в отдельных точках. Такие задачи относятся к нестационарным граничным обратным задачам теплопроводности (ОЗТ). Если теплофизические характеристики (ТФХ) ППП известны лишь приблизительно, то необходимо решать комбинированную ОЗТ: граничную ОЗТ – по восстановлению входящих тепловых потоков и коэффициентную ОЗТ – по идентификации соответствующих ТФХ.

**Решение прямой задачи теплопроводности**

В качестве математической модели для описания одномерного теплопереноса в ППП различных типов применяются дифференциально-разностные модели (ДРМ), подробно описанные в работах [1–3], которые в векторно-матричной форме для линейных стационарных систем обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) имеют вид:

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{T}(\tau) = F \cdot \mathbf{T}(\tau) + G \cdot \mathbf{U}(\tau),$$

где  $\mathbf{T}(\tau)$  и  $\mathbf{U}(\tau)$  – векторы состояния и управления;  $F$  и  $G$  – матрицы обратных связей и управления. Общее решение СОДУ (1) имеет следующий вид:

$$\mathbf{T}(\tau) = \Phi(\tau, \tau_0) \cdot \mathbf{T}(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} \Phi(\tau, \theta) \cdot G(\theta) \cdot \mathbf{U}(\theta) d\theta,$$

где  $\Phi(\tau, \tau_0) = \exp(F(\tau - \tau_0))$  – переходная матрица состояния (матрица Коши) системы;  $\tau_0$  – начальный момент времени. Для программной реализации решения (2) вводится дискретное время  $\tau_k = k\Delta\tau$ , а также дискретные векторы  $\mathbf{T}_k = \mathbf{T}(\tau_k)$  и  $\mathbf{U}_k = \mathbf{U}(\tau_k)$ . Тогда дискретная переходная матрица  $\Phi = \Phi_{k+1,k} = \Phi(\tau_{k+1}, \tau_k)$  может быть вычислена с требуемой точностью путем суммирования необходимого числа членов следующего бесконечного ряда:

$$\Phi = I + F\Delta\tau + \frac{1}{2!} F^2 \Delta\tau^2 + \dots + \frac{1}{m!} F^m \Delta\tau^m + \dots,$$

где  $I$  – единичная матрица. Решением прямой задачи теплопроводности (ПЗТ) в этом случае является последовательное применение для каждого момента времени следующей известной формуле расчета  $\mathbf{T}_{k+1}$  по значениям  $\Phi$  и  $\mathbf{T}_k$ :

$$\mathbf{T}_{k+1} = \Phi \cdot \mathbf{T}_k + \frac{1}{2} (I + \Phi) \cdot G \cdot \mathbf{U}_k \cdot \Delta\tau.$$

Для учета измерительной схемы ППП и сведений о характере и величинах случайных погрешностей в измерениях температуры используется следующая модель измерений:

$$\mathbf{Y}_k = H \cdot \mathbf{T}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k,$$

где  $\mathbf{Y}_k$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}_k$  – векторы измерений и случайных погрешностей;  $H$  – матрица измерений.

### Решение обратной задачи теплопроводности

В работах [1, 2] показана целесообразность использования метода параметрической идентификации для решения ОЗТ, так как последний удовлетворяет общепринятым требованиям устойчивости и сходимости вычислительных процедур, точности конечных результатов, универсальности, простоты программной реализации и др. Сущность же метода сводится к предварительной параметризации задачи и последующему нахождению оптимальной несмещенной оценки либо вектора состояния, либо вектора искомых параметров системы, дающей минимум нормы вектора невязки между измеренными в опыте температурами и прогнозами измерений температуры, рассчитанными по модели. Для получения оценок используется рекуррентная вычислительная процедура цифрового ФК. Рассмотрим подробнее два наиболее распространенных ФК: линейный ФК по расширенному вектору состояния системы и нелинейный ФК по вектору искомых параметров.

Под параметризацией ОЗТ понимается априорная кусочно-линейная аппроксимация подлежащего восстановлению теплового потока на всем интервале измерений, где в качестве системы базисных функций применяются  $B$ -сплайны 1-го порядка. Тогда на  $z$ -ом участке аппроксимации значение теплового потока находится по следующей формуле:

$$q_z = q_{az} \cdot Sp_{z-1}^{(1)} + q_{bz} \cdot Sp_z^{(1)},$$

где  $q_{az}$  и  $q_{bz}$  – значения теплового потока на левой и правой границах участка соответственно;  $Sp_{z-1}^{(1)}$  и  $Sp_z^{(1)}$  –  $B$ -сплайны. Линейный ФК по расширенному вектору состояния системы (ФК-1) основан на введении расширенного вектора состояния  $\mathbf{R}_{zk}$ :

$$\mathbf{R}_{zk} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{zk} \\ \mathbf{Q}_z \end{bmatrix} = [t_{1zk} \quad t_{2zk} \quad \dots \quad t_{nzk} \quad q_{az} \quad q_{bz}]^T,$$

где  $\mathbf{Q}_z = [q_{az} \quad q_{bz}]^T$  – вектор искомых параметров, а также на соответствующем расширении ДРМ за счет очевидных уравнений  $\dot{q}_{az} = 0$ ,  $\dot{q}_{bz} = 0$  и простейшей коррекции правой части модели измерений.

Алгоритм ФК-1 для одного участка сплайн-аппроксимации описывается следующими уравнениями:

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} \cdot \hat{\mathbf{R}}_k^+ + \frac{1}{2} (I + \Phi_{k+1,k}) \cdot G_R \cdot \mathbf{U}_k \cdot \Delta \tau;$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} \cdot P_k^+ \cdot \Phi_{k+1,k}^T;$$

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- \cdot H_R^T \cdot (H_R P_{k+1}^- H_R^T + N)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1}^+ = \mathbf{R}_{k+1}^- + K_{k+1} \cdot (\mathbf{Y}_{k+1} - H_R \hat{\mathbf{R}}_{k+1}^-);$$

$$P_{k+1}^+ = P_{k+1}^- - K_{k+1} H_R P_{k+1}^-;$$

где  $P$  – ковариационная матрица ошибок оценок;  $K$  – весовая матрица;  $N$  – ковариационная матрица случайных погрешностей измерений; индексы «-» и «+» обозначают априорные и апостериорные значения, соответственно. Алгоритм ФК-1 обеспечивает нахождение несмещенной оценки  $\hat{\mathbf{R}}_k$ , т.е.

$E\langle \hat{\mathbf{R}}_k \rangle = E\langle \mathbf{R}_k \rangle$ , дающей минимум дискретной квадратичной функции невязки:

$$\Phi(\mathbf{R}_k) = \sum_{k=1}^N (\mathbf{Y}_k - H_R \mathbf{R}_k)^T \cdot N^{-1} \cdot (\mathbf{Y}_k - H_R \mathbf{R}_k).$$

ФК-1 был реализован в виде программного комплекса «Heat Identification», который непосредственно восстанавливает как температуры, так и входящий тепловой поток, следовательно, его целесообразно использовать в тех случаях, когда начальное распределение температур по толщине ПТП известно лишь приблизительно.

Нелинейный ФК по вектору искомых параметров (ФК-2) основан на введении вектора  $\mathbf{Q}_z = [\mathbf{Q}_{az} \quad \mathbf{Q}_{bz}]^T = [q_{a,z} \quad q_{b,z} \quad \lambda_z]^T$ , для которого выполняется условие  $\mathbf{Q} = const$ . Тогда модель ПТП имеет следующий вид:

$$\dot{\mathbf{Q}} = 0, \tag{1}$$

а модель измерений

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{Y}_k(\mathbf{Q}_0) + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \tag{2}$$

где  $\mathbf{Y}_k(\mathbf{Q}_0)$  – модельный вектор измерений;  $\mathbf{Q}_0$  – истинное значение вектора искомых параметров.

К модели (1), (2) может быть применен алгоритм дискретного нелинейного ФК, позволяющий получать рекуррентные оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k+1}$  вектора искомых параметров  $\mathbf{Q}$  и ковариационную матрицу  $P_{k+1}$  их ошибок по найденным на предыдущем  $k$ -ом шаге  $\mathbf{Q}_k$ ,  $P_k$  и известному вектору измерений  $\mathbf{Y}_{k+1}$ . Алгоритм имеет следующий вид:

$$K_{k+1} = P_k \cdot \hat{H}_{k+1}^T \cdot (\hat{H}_{k+1} P_k \hat{H}_{k+1}^T + N)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_{k+1} = \hat{\mathbf{Q}}_k + K_{k+1} \cdot (\mathbf{Y}_{k+1} - \mathbf{Y}_{k+1}(\hat{\mathbf{Q}}_k));$$

$$P_{k+1} = P_k - K_{k+1} \hat{H}_{k+1} P_k,$$

где  $\hat{H}_{k+1}$  – матрица функций чувствительности;  $\mathbf{Y}_{k+1}(\hat{\mathbf{Q}}_k)$  – модельный вектор измерения, рассчитываемый по модели теплопереноса в ПТП для момента времени  $k+1$  с использованием предыдущей оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_k$  вектора  $\mathbf{Q}_k$ .

Матрица функций чувствительности  $\hat{H}_{k+1}$  имеет следующий вид:

$$\hat{H}_{k+1} = \left. \frac{\partial \mathbf{Y}_k(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}} \right|_{\mathbf{Q} = \hat{\mathbf{Q}}_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{1,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_a} & \frac{\partial y_{1,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_b} & \frac{\partial y_{1,k}(\mathbf{Q})}{\partial \lambda} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{m,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_a} & \frac{\partial y_{m,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_b} & \frac{\partial y_{m,k}(\mathbf{Q})}{\partial \lambda} \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\left. \frac{\partial y_{j,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_a} \right|_{\mathbf{Q} = \hat{\mathbf{Q}}_k}$ ,  $\left. \frac{\partial y_{j,k}(\mathbf{Q})}{\partial q_b} \right|_{\mathbf{Q} = \hat{\mathbf{Q}}_k}$  и  $\left. \frac{\partial y_{j,k}(\mathbf{Q})}{\partial \lambda} \right|_{\mathbf{Q} = \hat{\mathbf{Q}}_k}$  – функции чувствительности  $j$ -го

измерения к искомому параметру  $q_a$ ,  $q_b$  и  $\lambda$  в  $k+1$  момент времени.

Алгоритм ФК-2 обеспечивает нахождение несмещенной оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_k$ , т.е.  $E\langle \hat{\mathbf{Q}}_k \rangle = E\langle \mathbf{Q}_k \rangle$ , дающей минимум дискретной квадратичной функции невязки:

$$\Phi(\mathbf{Q}_k) = \sum_{k=1}^N (\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_k(\mathbf{Q}_k))^T \cdot N^{-1} \cdot (\mathbf{Y}_k - \mathbf{Y}_k(\mathbf{Q}_k)).$$

ФК-2 был реализован в виде программы «Heat Conduction», который непосредственно восстанавливает как тепловой поток, так и теплопроводность, следовательно, его целесообразно использовать в тех случаях, когда теплопроводность материала ПТП известна лишь приблизительно.

### Результаты имитационного моделирования

Ниже представлены результаты математического моделирования для градиентного однородного ПТП типа вспомогательной стенки толщиной  $h = 0,005$  м и со следующими ТФХ:  $\lambda = 15$  Вт/(м·К);  $c = 485$  Дж/(кг·К);  $\rho = 8000$  кг/м<sup>3</sup>. Входящий в ПТП тепловой поток изменялся по закону  $q_1(\tau) = [10000 \sin(0,1\tau) + 10000]$  Вт/м<sup>2</sup>, на тыльной стороне  $q_2(\tau) = 0$  Вт/м<sup>2</sup>. Задавались температуры поверхности  $t_1$  и второго блока  $t_2$  при уровне погрешностей в измерениях  $\sigma = 0,1^\circ\text{C}$ ; длине участка сплайн-аппроксимации  $\Delta_z = 10 \cdot \Delta\tau$  ( $\Delta\tau = 0,01$  с); начальном распределении  $\mathbf{T}_0 = [30 \ \dots \ 30]^T$  °C.

Результаты восстановления теплового потока и температурного поля по толщине тепломера с помощью ФК-1 представлены на рис. 1. Начальные оценки принимались вдвое меньше эталонных:  $\hat{\mathbf{R}}_0 = [15 \ \dots \ 15 \ 5000 \ 5000]^T$ , а начальное значение ковариационной матрицы  $P_0 = \text{diag}(100, \dots, 100, 10^{12}, 10^{12})$ .

Результаты восстановления теплового потока и уточнения теплопроводности материала ПТП с помощью ФК-2 представлены на рис. 2. Начальные оценки принимались, как и в предыдущем случае, в вдвое меньше эталонных:  $\hat{\mathbf{Q}}_0 = [5000 \ 5000 \ 7,5]^T$ , а начальное значение ковариационной матрицы:  $P_0 = \text{diag}(10^{12}, 10^{12}, 100)$ .

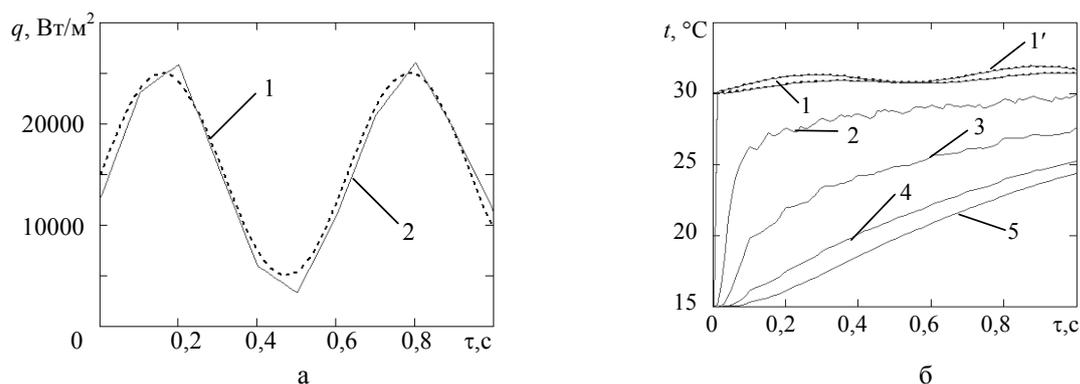


Рис. 1. Эталонный (1) и восстановленный (2) тепловые потоки (а); заданная на поверхности первого блока (1') и восстановленные на блоках 1–5 температуры ПТП (б)

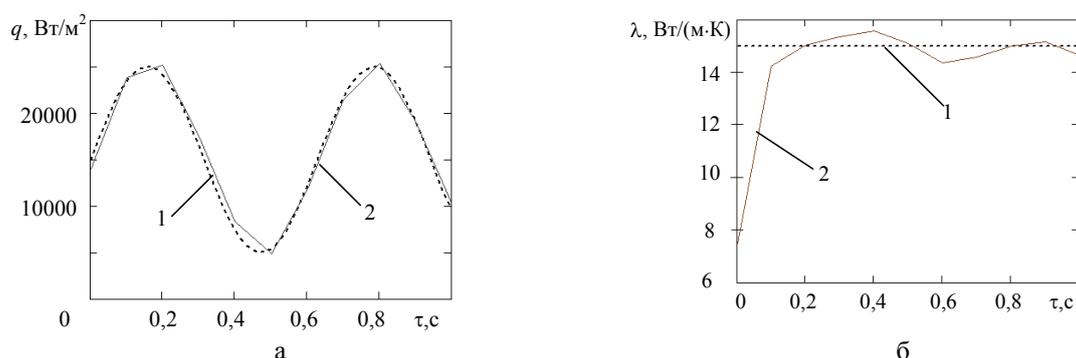


Рис. 2. Эталонные (1) и восстановленные (2) значения теплового потока (а) и теплопроводности ПТП (б)

### Заключение

В статье приведено описание математических моделей, как процесса теплопереноса, так и измерений в различных типах сенсоров нестационарного теплового потока; рассмотрены алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности. Для получения оценок значений теплового потока разработаны программы двух модификаций ФК, которые позволили оценить поток в реальном времени.

Приведены результаты математического моделирования по восстановлению теплового потока и уточнению теплопроводности материала, которые позволяют утверждать, что разработанные методики расчетов могут быть использованы в энергосберегающих технологиях, в частности, при определении тепловых потерь ограждающих конструкций зданий и сооружений в нестационарном режиме.

### Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 1) // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 8. – С. 50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 2) // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 10. – С. 67–71.
3. Pilipenko N. Parametrical Identification of Differential-difference Heat Transfer Models in Non-stationary Thermal Measurements // Heat Transfer Research. – 2008. – V. 39. – № 4. – P. 311–315.

**Кириллов Кирилл Валерьевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kirill.kirilov@gmail.com

**Пилипенко Николай Васильевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pilipenko38@mail.ru

УДК 535:621.373.826:539

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ  
И БИОМЕДИЦИНСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

А.В. Беликов, В.Ю. Храмов

Рассмотрены перспективные направления современной лазерной медицины и сформулированы цели, задачи и содержание инновационных направлений исследований в области лазерных систем и биомедицинских оптических технологий.

**Ключевые слова:** адаптивное управление, микропучки, микроимпульсы, программируемый эффект.

**Введение**

В современном мире лазерные источники достаточно широко применяются в медицинской практике для обработки мягких и твердых тканей. Наиболее успешно лазеры используются в офтальмологии, дерматологии и общей хирургии. К числу наиболее перспективных для применения лазерной техники областей медицины следует отнести стоматологию и фотодинамическую терапию. Каждая из вышеперечисленных областей медицины постоянно развивается, стимулируя создание новых лазерных медицинских приборов и технологий.

**Лазерные системы и биомедицинские оптические технологии**

Лазерное излучение обладает целым рядом уникальных свойств, к числу которых в первую очередь относятся высокая монохроматичность и направленность. От того, насколько та или иная лазерная технология реализует возможности этих уникальных свойств, и зависит ее перспективность и успех. В медицине последних лет лазерные системы с успехом используют для обработки биоткани, при этом луч лазера вызывает в биоткани либо незначительные изменения, либо при соответствующих условиях – гибель облучаемых живых структур и/или их абляцию. Механизм и параметры абляции (пороговые значения, энергетические характеристики, эффективность) определяются свойствами ткани, подлежащей абляции (соотношение жидкого и плотного компонентов, их химические и физические свойства, характер внутри- и межмолекулярных связей, термическая чувствительность клеток и макромолекул, кровоснабжение ткани и т.д.), характеристиками лазерного излучения (длина волны, непрерывный или импульсный режим облучения, мощность, энергия в импульсе, суммарная поглощенная энергия и т.д.), а также параметром, неразрывно связывающим свойства объекта и лазерного луча, – коэффициентом поглощения данного вида излучения в данном виде ткани или ее отдельных составляющих. Совокупность всех вышеописанных параметров является уникальной для успешного использования лазеров и определяется в первую очередь областью медицины, для которой предназначается та или иная лазерная технология.

**Лазерная хирургия. Новые среды и адаптивные лазерные системы**

Хирургия мягких тканей занимает наиболее важное место в медицинской практике. Поскольку мягкие ткани обильно снабжаются кровью, то одной из важнейших задач при хирургии является минимизация кровотечений. Обычный скальпель не может обеспечить бескровной обработки. Необходимо применять различные растворы и лекарственные средства, способствующие остановке кровотечений. Одним из решений данной проблемы может являться температурное воздействие на прилегающие сосуды в процессе лазерной хирургической манипуляции, которое приведет к денатурации белков крови и оболочки сосудов, обеспечит коагуляцию сосудов и, как следствие, отсутствие кровотечений.

Наиболее часто в качестве оконечного элемента лазерного хирургического прибора используется контактный лазерный наконечник, представляющий собой отрезок волокна, через который проходит лазерное излучение. Лазерное излучение с выхода оптического волокна может стимулировать ее разогрев до температур необходимых для денатурации, коагуляции, карбонизации или испарения, сильно поглощаясь либо тканью (первый механизм), либо в материале-посреднике (второй механизм). Таким образом, термическое воздействие может осуществляться двумя путями: за счет поглощения излучения лазера внутри ткани, либо за счет поверхностного нагрева ткани вследствие высокой температуры граней наконечника, соприкасающихся с тканью.

Первый механизм может быть осуществлен в случае «чистого» торца наконечника, т.е. ничем не загрязненного. В этом случае излучение будет беспрепятственно выходить из наконечника, и попадать в ткань, где в соответствии с оптическими параметрами ткани будет поглощаться, рассеиваться и в результате нагревать ткань.

Для разреза и коагуляции мягких биотканей непосредственно лазерным излучением наиболее часто используется газовый CO<sub>2</sub>-лазер (непрерывный или импульсный) с длиной волны генерации 10,6 мкм. Излучение данного лазера в режиме абляции интенсивно поглощается молекулами тканевой воды. Коэффициент поглощения излучения CO<sub>2</sub>-лазера водой составляет величину порядка 850 см<sup>-1</sup> (рисунок).

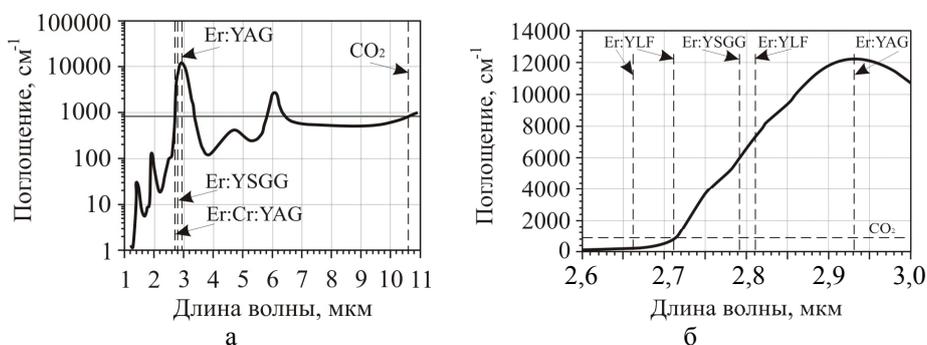


Рисунок. Спектр поглощения воды в диапазоне 1–11 мкм (а) и в диапазоне 2,6–3,0 мкм (б)

При воздействии излучения CO<sub>2</sub>-лазера имеет место очень быстрый разогрев воды, а от нее и неводных компонентов ткани. Следствием этого является стремительное (взрывное) испарение воды и извержение водяных паров вместе с фрагментами клеточных и тканевых структур за пределы ткани с формированием абляционного кратера. Вместе с извержением перегретого материала из ткани удаляется и большая часть тепловой энергии, а ее незначительная оставшаяся доля приводит лишь к минимальным термическим повреждениям на глубину лишь 50–100 мкм за пределами абляционного кратера. Существенный недостаток CO<sub>2</sub>-лазера состоит в необходимости периодической смены активной среды. В последнее время создан ряд твердотельных лазерных источников способных составить конкуренцию CO<sub>2</sub>-лазеру и не требующих замены активной среды. В первую очередь это относится к эрбиевым лазерам. Излучение этих лазеров эффективно поглощается водой, а излучение Er:YLF-лазера (рис. 1, б) имеет очень близкий к CO<sub>2</sub> коэффициент поглощения, что позволяет надеяться на схожий клинический результат.

Второй механизм нагрева ткани может быть осуществлен посредством нанесения на выходные грани наконечника какого-либо высокопоглощающего покрытия. В качестве такого материала-посредника возможен некий внешний материал, например, продукты сгорания дерева, сажа, краска, либо продукты горения непосредственно биоткани, вследствие поглощения тканью излучения, ее нагрева и карбонизации. В результате излучение лазера будет поглощаться покрытием, непосредственно на выходных гранях наконечника и будет происходить локальный нагрев находящегося на гранях материала. Нагрев же ткани в таком случае будет осуществляться за счет теплопроводности, вследствие поверхностного выделения мощности при контакте нагретых граней наконечника с тканью. Наиболее часто при работе с материалом-посредником в качестве источника используются диодные лазеры с длинами волн 0,810 мкм или 0,970 мкм. Необходимо отметить, что материал-посредник может быть разогрет до температур выше 800°C, при этом нагрев ткани кроме теплопроводности, может происходить также за счет теплового излучения от разогретого наконечника.

Сопровождающее лазерный нагрев биоткани тепловое излучение может быть использовано для контроля состояния наконечника и/или биоткани. Анализируя интенсивность и длину волны теплового излучения, можно получить информацию о температуре в зоне обработки и характере теплообмена. Эти параметры определяющим образом влияют на эффективность деструкции и коагуляции биоткани. Изменяя параметры лазерного излучения в соответствии с измеренными параметрами теплового сигнала, лазерные адаптивные системы способны наиболее адекватно воздействовать на биоткань, например, добиваться постоянной глубины коагуляции в независимости от скорости перемещения лазерного наконечника.

Наиболее часто встречающаяся задача лазерной хирургии – осуществить непосредственно разрез ткани и обеспечить коагуляцию ткани вокруг разреза. Для решения первой задачи (непосредственно разреза) необходимо, чтобы наконечник имел торец, позволяющий осуществлять разрез либо механически, либо за счет абляции ткани. Вторая задача, в случае абляции, решается автоматически, вследствие температурного воздействия, в первом же случае необходимо такое воздействие обеспечить [1, 2]. Таким образом, достаточно перспективными являются оптические лазерные наконечники специальной формы,

позволяющие совмещать механический разрез с тепловым воздействием не только за счет теплопроводности, но и за счет теплового или лазерного излучения.

### **Лазеры в дерматологии. Фракционная обработка**

Лазерная дерматология и косметология с успехом используют лазерное излучение. Есть косметические процедуры, которые выполняются только лазерным или световым излучением. К числу таковых следует отнести лазерную эпиляцию, фотоэпиляцию, удаление пигментных пятен, удаление татуировок, фотоомоложение кожи. Для этих целей применяется излучение рубинового, александритового, неодимового, диодного лазеров или излучение галогеновых ламп.

В последние несколько лет чрезвычайно широко в дерматологии используется фракционная лазерная методика обработки кожи. Фракционная методика заключается в облучении не всей, а только части (фракции) области биоткани, требующей лечения. В местах воздействия (фракциях) наблюдается локальная коагуляция и, как следствие, стимулируется рост новых клеток, при этом вся область, подвергшаяся обработке, не теряет своей анатомической функции. Данная технология впервые была применена в лазерной дерматологии для регенерации кожи человека. С этой целью кожа облучается последовательностью лазерных импульсов, при этом в коже формируются коагуляционные (или абляционные) колонки, имеющие диаметр порядка 400–500 мкм глубиной до 2 мм. Колонки отстоят друг от друга на величину сопоставимую с их диаметром. Таким образом, обрабатываемая область кожи делится на необлученную область (70%) и облученную (30%) лазерным излучением. Облученная область ткани спустя несколько дней после облучения замещается интактной тканью, которая содержит новый коллаген и лишена пигментов. Для фракционной обработки используют излучение твердотельных лазеров с длиной волны 1,4–1,6 мкм, а также излучение эрбиевых лазеров с длиной волны 2,94 мкм. Перспективными можно считать разработки лазерных систем с диодной накачкой и высокой частотой повторения импульсов.

### **Лазеры в стоматологии. Лазеры с высоким качеством излучения**

Современные лазерные стоматологические технологии, к сожалению, не могут составить достойную конкуренцию турбине и бору при обработке твердых тканей [3–5]. На наш взгляд, это не в последнюю очередь связано с тем, что эти технологии не используют уникальную способность лазерного излучения формировать световые пучки чрезвычайно малых размеров – микропучки. Чем меньше размер пучка, тем более локально и безопасно можно обрабатывать материал. С помощью микропучков можно формировать полости с высокой точностью. Немаловажным достоинством таких микропучков является их способность формировать на обрабатываемой поверхности рельеф любого профиля с микроскопическими размерами, сопоставимыми с размером этих микропучков. Еще одной особенностью лазерного излучения, не до конца востребованной в современной лазерной стоматологии, является способность лазеров формировать одиночные короткие пучки и их воспроизводимые последовательности – микроимпульсы. Управляя длительностью пучков, их скважностью в микроимпульсе, частотой следования микроимпульсов, можно существенно оптимизировать процесс лазерного удаления твердых тканей зуба. Оптимизация возможна за счет подачи лазерной энергии именно тогда, когда она может с минимальными потерями достигнуть обрабатываемого материала, а не ослабляться водой системы орошения или продуктами лазерного разрушения, не успевшими покинуть лазерную полость до прихода лазерной энергии. Одновременное использование микроимпульсов и микропучков позволяет формировать в твердых тканях зуба микроканалы с высоким аспектным соотношением. Микроканалы могут быть востребованы для доставки внутрь зуба лекарств или средств гигиены. При отбеливании зуба через микроканалы могут доставляться отбеливающие агенты. В настоящее время отбеливание является чрезвычайно востребованной стоматологической процедурой. Различают несколько технологий отбеливания, суть которых заключается в удалении либо внешних, либо внутренних красителей, определяющих цвет зуба. В традиционной стоматологии для удаления внутренних красителей зуб депульпируют и формируют в дентине полость значительных размеров для помещения в нее среды, содержащей перекись водорода. В связи с этим данная процедура является неприемлемой для здоровых зубов. Возможность замены крупных полостей на микроканалы позволяет использовать процедуру внутреннего отбеливания для здоровых зубов. В этом случае микроотверстия должны иметь диаметр близкий к размерам традиционных дефектов эмали (микротрещины, фиссуры и др.), а глубина этих отверстий должна быть немногим меньше расстояния от поверхности эмали до поверхности пульпы зуба. Для формирования таких отверстий нужно использовать лазерное излучение, которое эффективно поглощается твердыми тканями зуба. Для этой цели весьма перспективными являются эрбиевые лазеры [6].

Необходимо упомянуть перспективность использования фракционной методики лазерного воздействия в стоматологии. В стоматологии фракционная обработка может быть использована для регене-

рации слизистой полости рта и при лечении заболеваний пародонта. Для фракционной обработки необходимо создавать лазерные источники с контролируемым размером пятна и адаптивной функцией.

### **Лазеры для фотодинамической терапии**

Ряд злокачественных опухолей, например первичный рак различных отделов головного или спинного мозга, поджелудочной и щитовидной желез, метастазы рака печени, способны концентрировать молекулы некоторых введенных через кровеносные сосуды фоточувствительных соединений, например, фотофринов [7, 8]. При облучении последних интенсивным светом диодных лазеров с длиной волны в области 0,6–0,7 мкм происходит распад фотофринов с выделением токсичных для живых клеток продуктов распада (свободных радикалов). Этот принцип используется для фотодинамической терапии, в ходе которой больному сначала вводят соответствующий фотофрин, а затем, через световод производят облучение опухоли. В результате, из-за массивного выделения цитотоксических продуктов, клетки злокачественной опухоли погибают, а окружающие их здоровые клетки остаются живыми, так как на них фотофрины не адсорбируются. Этот метод интенсивно разрабатывается и внедряется в клиниках, стимулируя создание новых фоточувствительных соединений, лазеров и систем доставки, как фоточувствительных соединений, так и лазерного излучения.

### **Лазеры в офтальмологии**

Операции проводят по поводу опухолей глаза и тканей глазницы (энуклеация с последующим введением косметического протеза), по поводу гнойных воспалительных процессов в окологлазничном пространстве (дренаж), при развитии паразитов и попадании инородных тел в полости или оболочки глаза (удаление), при косоглазии (рассечение соответствующих мышц), глаукоме (создание фистулы между Шлеммовым каналом и задней камерой глаза), угрожающей слепотой, гипертрофии сосудистого сплетения в области дна глаза (частичная коагуляция сосудов) и частичной отслойке сетчатки («приваривание» отслоившейся части сетчатки к дну глаза), при помутнении хрусталика (удаление последнего с заменой на искусственный), при нарушении рефракции оптической системы за счет неадекватной формы роговицы (хирургическое исправление дефекта, кератопластика). Перспективными для офтальмологии следует считать диодные лазеры, твердотельные лазеры среднего ИК диапазона и эрбиевые лазеры с диодной накачкой [9, 10].

### **Заключение**

Таким образом, к числу наиболее перспективных инновационных направлений исследований в области лазерных систем и биомедицинских оптических технологий следует отнести развитие фундаментальных и прикладных исследований по взаимодействию лазерного и оптического излучения с биотканями, включая силовые, нелинейно-оптические, фототерапевтические и диагностические методы и технологии; поиск и оптимизация новых лазерных сред; создание лазерных систем нового поколения для инновационных медицинских комплексов; создание микролазеров с высоким КПД, в том числе лазеров с диодной накачкой; создание лазеров с высоким качеством излучения для прецизионной лазерной обработки биологических материалов; разработку компьютерных моделей резонатора твердотельных лазеров; создание лазерных и оптических систем с адаптивным управлением, в том числе с применением интеллектуальных обратных связей; оптимизацию конечных элементов лазерных систем для формирования программируемого биологического эффекта.

Успешное развитие этих направлений требует разработки принципов многочастотной генерации лазеров; определения влияния параметров активных сред на процессы генерации; разработки и исследования компьютерных моделей твердотельных лазеров с диодной накачкой в режиме многочастотной генерации; исследования взаимодействия лазерного излучения с биотканями; экспериментальных и теоретических исследований, направленных на открытие новых и объяснение известных феноменов, сопровождающих взаимодействие лазерного излучения с биотканями; экспериментальное и теоретическое моделирование параметров лазерных систем для тех или иных медицинских применений.

### **Литература**

1. Rate Process Analysis Of Thermal Damage / J. Pearce et. al // Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue / Ed. by A.J. Welch and M.J.C. van Gemert. – New York, 1995.
2. Theoretical Analysis of Equivalency of High-Power Diode Laser (810 nm) and Nd:YAG Laser (1064 nm) for Coagulation of Tissue: Predictions for Prostate Coagulation / S. Rastegar, S.L. Jacques, M. Motamedi, B.-M. Kim // Proc. of SPIE. – 1992. – V. 1646. – P. 150–160.

3. Er: YAG laser ablation: 5–11 years prospective study / T. Dostalova, H. Jelikova, M. Nemes, J. Sulk, M. Myiagi // Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5687. – P. 63–68.
4. Pulsed laser beam effects on gingiva /S.I. Golti, M.A. Vilardi // J. Clin Periodontol. – 1994. – V. 21. – P. 391–396.
5. Factors Affecting Carbon Dioxide Laser Treatment for Oral Precancer: A Patient Cohort Study / O. Hamadah, P.J. Thomson // Lasers in Surgery and Medicine. – 2009. – V. 41. – P. 17–25.
6. Influence of the water content in dental enamel and dentin on ablation with erbium YAG and erbium YSGG lasers / J. Meister, R. Franzen, K. Forner, H. Grebe, S. Stanzel, F. Lampert, C. Apel // J. of Biomedical Optics. – 2006. – V. 11. – № 3. – P. 1–7.
7. Photoengineering of bone repair processes / A.L. Pinheiro, M.E. Gerbi // Photomed. Laser Surg. – 2006. – V. 24. – P. 169–178.
8. A phase III randomized double-blind placebo-controlled clinical trial to determine the efficacy of low level laser therapy for the prevention of oral mucositis in patients undergoing hematopoietic cell transplantation / M.M. Schubert, F.P. Eduardo, K.A. Guthrie et al. // Support. Care Cancer. – 2007. – V. 15. – P. 1145–1154.
9. Laser-Tissue-Interactions: Fundamentals and Applications / M. Niemz // Springer, Berlin. – 1996.
10. A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet / J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein // Appl. Phys. – 2005. – V. 80. – P. 315–320.

**Беликов Андрей Вячеславович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru

**Храмов Валерий Юрьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, khramov@grv.ifmo.ru

УДК 681.784.8

## МЕТОД ОПТИЧЕСКОЙ ДИФфуЗИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ *IN VIVO* ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОКСИГЕНАЦИИ ОПУХОЛИ

Г.Ю. Голубятников, А.В. Масленникова, А.Г. Орлова, Т.И. Пряникова

Продемонстрированы возможности метода оптической диффузионной спектроскопии (ОДС) для неинвазивной оценки динамики нескольких параметров, характеризующих степень оксигенации экспериментальной опухоли при ее искусственной модификации. На фоне действия препарата пентоксифиллина, повышающего микроциркуляторную перфузию, с помощью данного метода выявлены изменения содержания окисленной и восстановленной форм гемоглобина, а также уровня насыщения крови кислородом. Повышение содержания оксигемоглобина, характеризующего поступление кислорода в ткани наряду со снижением содержания дезоксигемоглобина, характеризующего его потребление, наблюдаемые после введения препарата, свидетельствуют о восстановлении уровня насыщения крови кислородом в зоне экспериментальной опухоли.

**Ключевые слова:** степень оксигенации опухоли, оптическая диффузионная спектроскопия, неинвазивная диагностика, коррекция кислородного статуса, пентоксифиллин, лимфосаркома Плисса.

### Введение

Состояние гипоксии (снижение парциального давления кислорода <10–15 мм рт. ст.) является характерной особенностью большинства солидных опухолей. К настоящему времени доказано, что гипоксия относится к ряду ключевых факторов опухолевой прогрессии и является источником резистентности к действию лучевой и химиотерапии [1]. Причиной возникновения гипоксии являются особенности микроциркуляторного русла опухоли. Оно характеризуется примитивностью и хаотичностью, в силу чего теряет способность удовлетворять потребности в кислороде быстро растущей опухолевой паренхимы [2]. Гипоксия обнаруживается в зонах, отдаленных от сосудов (150–200 мкм), или в таких зонах, где скорость потребления кислорода превышает скорость его поступления, а также вблизи сосудов с временным нарушением перфузии [3–5]. С целью преодоления проблемы резистентности опухоли к лечебному воздействию в настоящее время развивается ряд методов, направленных на улучшение уровня оксигенации опухолевой ткани. К таким агентам относятся радио- и химиомодификаторы, переносчики кислорода различной природы, электронно-акцепторные соединения, гипербарическая оксигенация, карбоген, гипертермическое воздействие [6–8]. Для оценки эффективности способов коррекции кислородного статуса опухоли необходима разработка новых подходов, позволяющих получать информацию о динамике ее оксигенации *in vivo*. Однако известные на сегодняшний день методы определения кислородного статуса [9, 10] имеют ряд ограничений в силу их инвазивности (полярография с микроэлектродами, вводимыми в

ткани), невозможности проведения повторного исследования (методы *ex vivo*), либо материальной и технической сложности (магнитно-резонансная томография и протонно-эмиссионная томография). В данной работе для оценки изменений степени оксигенации опухоли представлен метод ОДС, который основан на получении информации от многократно рассеянного света, способного проходить через ткани толщиной до нескольких сантиметров. Применение различных длин волн позволяет наблюдать тканевые составляющие, такие как окси- ( $\text{HbO}_2$ ), дезоксигемоглобин (Hb), вода, липиды, используя дисперсию показателя поглощения данных соединений. Метод дает возможность определять пространственное распределение концентраций окисленной и восстановленной форм гемоглобина, и, соответственно, оценивать степень насыщения крови кислородом ( $\text{StO}_2$ ) [11–13]. В качестве агента, оказывающего влияние на уровень оксигенации опухоли, был использован препарат, повышающий микроциркуляторную перфузию – пентоксифиллин.

### Материалы и методы

В работе использовалась ОДС-установка, сконструированная в Институте Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород (рис. 1) [13, 14]. В качестве источников излучения в установке используются полупроводниковые лазеры с волоконным выходом на трех длинах волн: 684 нм, соответствующей максимуму поглощения восстановленного гемоглобина; 850 нм, соответствующей максимуму поглощения оксигемоглобина; 794 нм, на которой коэффициенты поглощения окисленного и восстановленного гемоглобина совпадают. Диаметр поперечного сечения пучка лазерного излучения на объекте составляет 4 мм. В данной установке применяется высокочастотная (140 МГц) модуляция интенсивности лазерного излучения. Детектирование прошедшего через ткани излучения осуществляется с помощью фотоэлектронного умножителя.

Эксперименты проводились на белых нелинейных крысах с перевитой экспериментальной опухолью (лимфосаркома Плисса). Во время сканирования животные помещались в кювету с иммерсионной жидкостью с оптическими параметрами, близкими тканям животного. Сканирование выполнялось при синхронном пошаговом перемещении источника и детектора, расположенных с противоположных сторон исследуемого объекта с шагом 1–2 мм. Из полученных ОДС-изображений путем численной обработки проводилось восстановление двумерного распределения концентраций  $\text{HbO}_2$ , Hb и уровня  $\text{StO}_2$ . Для расчетов использовали табличные значения коэффициентов поглощения [15]. Уровень  $\text{StO}_2$  рассчитывали как  $[\text{HbO}_2]/([\text{Hb}] + [\text{HbO}_2])$ .

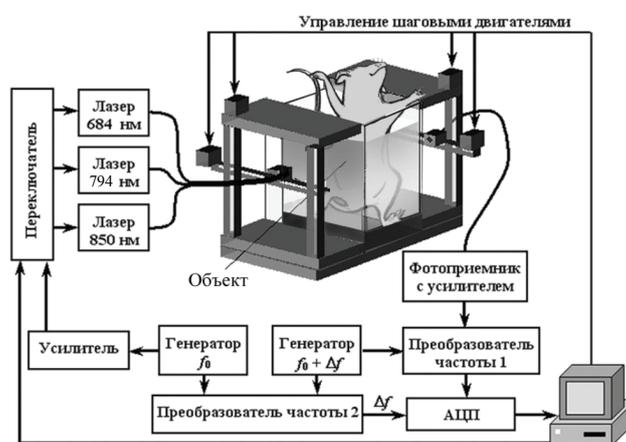


Рис. 1. Схема ОДС-установки

ОДС-исследование начинали на четвертый–шестой день после перевивки опухоли. Пентоксифиллин вводили внутривенно однократно в концентрации 50 мг/кг. Осуществляли сканирование интактной опухоли, затем проводили мониторинг через 15, 30, 60 минут и 4 часа после введения препарата.

### Результаты и обсуждение

Метод ОДС позволяет наблюдать динамику уровня оксигенации опухоли на фоне применения агента, модифицирующего кислородный статус. На рис. 2 приведен пример распределения концентраций Hb,  $\text{HbO}_2$  и уровня  $\text{StO}_2$  в проекции опухолевого узла до и после введения пентоксифиллина. На ОДС-изображениях интактного новообразования наблюдается повышенный, по сравнению с окружающими нормальными тканями, уровень восстановленного гемоглобина и сниженный уровень окисленного гемо-

глубина, что свидетельствует о нарушении баланса между поступлением и потреблением кислорода в опухоли. Низкое содержание  $\text{HbO}_2$ , характеризующего поступление  $\text{O}_2$  в ткани, а также высокое содержание  $\text{HHb}$ , характеризующего его потребление, формируют сниженный уровень насыщения крови кислородом. Полученные результаты соответствуют биологическим особенностям лимфосаркомы Плисса, для которой характерен быстрый рост, высокая клеточность, высокая митотическая активность и раннее образование некрозов [16]. Исходя из морфологических и физиологических черт данной опухоли, можно предположить низкий уровень ее оксигенации и наличие обширных зон гипоксии.

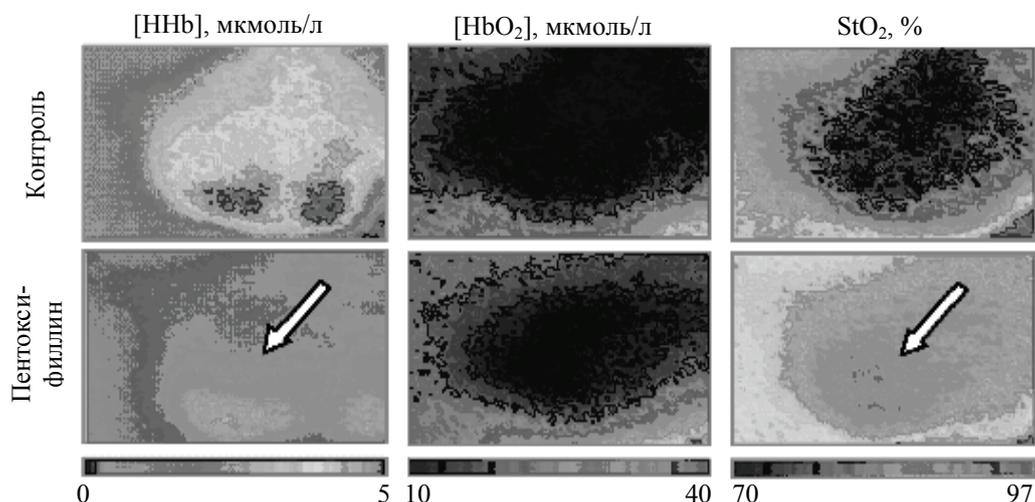


Рис. 2. Карты двумерного распределения концентраций восстановленного гемоглобина ( $\text{HHb}$ ), окисленного гемоглобина ( $\text{HbO}_2$ ) и уровня насыщения крови кислородом ( $\text{StO}_2$ ), полученные при ОДС-исследовании зоны лимфосаркомы Плисса до (контроль) и через 4 часа после введения пентоксифиллина. Стрелками указана зона опухоли

После введения пентоксифиллина на ОДС-изображениях наблюдается снижение концентрации дезоксигемоглобина (после введения препарата концентрация  $\text{HHb}$  в зоне опухоли была практически такой же, как и в окружающих здоровых тканях) и повышение содержания окисленной формы соединения. Такие изменения приводят к существенному росту уровня насыщения крови кислородом в проекции опухолевого узла и, вероятно, кислородного статуса опухоли. В работах [3–4, 17] показано, что введение пентоксифиллина повышает перфузию тканей благодаря вазоактивному влиянию, повышению скорости кровотока, росту эластичности клеток крови. Все перечисленные механизмы лежат в основе ускорения доставки кислорода к опухолевым клеткам с током крови и, соответственно, приводят к снижению степени гипоксии и повышению уровня оксигенации ткани.

### Заключение

Метод ОДС позволяет наблюдать динамику уровня оксигенации экспериментальных опухолей под воздействием препарата, повышающего микроциркуляторную перфузию тканей – пентоксифиллина. С использованием опухолевой модели лимфосаркомы Плисса показано, что данный препарат вызывает возрастание уровня насыщения крови кислородом в зоне новообразования. Указанное изменение обусловлено повышением содержания оксигемоглобина и снижением содержания дезоксигемоглобина в проекции опухолевого узла. Данный метод может быть использован для разработки и тестирования новых агентов, оказывающих влияние на кислородный статус тканей.

### Литература

1. Eriksen J.E., Horsman M.R. Tumor hypoxia – a characteristic feature with a complex molecular background // *Radiotherapy and Oncology*. – 2006. – V. 81. – № 2. – P. 119–121.
2. Brown J.M., Giaccia A.J. The unique physiology of solid tumors: opportunities (and problems) for cancer therapy // *Cancer Research*. – 1998. – V. 58. – P. 1408–1416.
3. Bennewith K.L., Durand R.E. Drug-induced alterations in tumour perfusion yield increases in tumour cell radiosensitivity // *British Journal of Cancer*. – 2001. – V. 85. – № 10. – P. 1577–1584.

4. Zywiets F., Bohm L., Sagowski C., Kehrl W. Pentoxifylline Enhances Tumor Oxygenation and Radiosensitivity in Rat Rhabdomyosarcomas during Continuous Hyperfractionated Irradiation // *Strahlenther Onkol.* – 2004. – V. 180. – P. 306–314.
5. Collingridge D.R. and S. Rockwell. Pentoxifylline improves the oxygenation and radiation response of BA1112 rat rhabdomyosarcomas and EMT6 mouse mammary carcinomas // *Int. J. Cancer (Radiat. Oncol. Invest).* – 2000. – V. 90. – P. 256–264.
6. Horsman M.R. Nicotinamide and other benzamide analogs as agents for overcoming hypoxic cell radiation resistance in tumours // *Acta Oncol.* – 1995. – V. 34. – № 5. – P. 571–587.
7. Song C.W., Park H., Griffin R.J. Improvement of Tumor Oxygenation by Mild Hyperthermia // *Radiation research.* – 2001. – V. 155. – P. 515–528.
8. Teicher B.A., Schwartz G.N., Alvarez Sotomayor E., Robinson M.F., Dupuis N.P., Menon K. Oxygenation of tumors by a hemoglobin solution // *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology.* – 1993. – V. 120. – P. 85–90.
9. Serganova I., Humm J., Ling C., Blasberg R. Tumor Hypoxia Imaging // *Clinical Cancer Research.* – 2006. – V. 12. – № 18. – P. 5260–5264.
10. Davda S., Bezabeh T. Advances in methods for assessing tumor hypoxia in vivo: implications for treatment planning // *Cancer and Metastasis Reviews.* – 2006. – V. 25. – № 3. – P. 469–480.
11. Cerussi A., Hsiang D., Shah N., Mehta R., Durkin A., Butler J. and B.J. Tromberg. Predicting response to breast cancer neoadjuvant chemotherapy using diffuse optical spectroscopy // *PNAS.* – 2007. – V. 104. – № 10. – P. 4014–4019.
12. Brown J.Q., Wilke L.G., Geradts J., Kennedy S.A., Palmer G.M. and N. Ramanujam. Quantitative Optical Spectroscopy: A Robust Tool for Direct Measurement of Breast Cancer Vascular Oxygenation and Total Hemoglobin Content In vivo // *Cancer Research.* – 2009. – V. 69. – № 7. – P. 2919–2926.
13. Orlova A.G., Turchin I.V., Plehanov V.I., Shakhova N.M., Fiks I.I., Kleshnin M.I., Konuchenko N.Yu., Kamensky V.A. Frequency-domain diffuse optical tomography with single source-detector pair for breast cancer detection // *Laser Physics Letters.* – 2008. – V. 5. – № 4. – P. 321–327.
14. Масленникова А.В., Голубятников Г.Ю., Орлова А.Г., Плеханов В.И., Артифексова А.А., Шахова Н.М., Каменский В.А., Турчин И.В. Неинвазивный оптический метод оценки кислородного статуса новообразований молочной железы // *Опухоли женской репродуктивной системы.* – 2010. – Т. 1. – С. 5–10.
15. Optical Absorption of Hemoglobin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://omlc.ogi.edu/spectra/hemoglobin/>, своб.
16. Плисс Б.Б. Онкологическая характеристика нового штамма ЛФС крыс // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* – 1961. – Т. 2. – С. 95–99.
17. Honess D.J., Andrews M.S., Ward R., Bleehe N.M. Nicotinamide and pentoxifylline increase human leucocyte filterability: a possible mechanism for reduction of acute hypoxia // *Acta Oncol.* – 1995. – V. 34. – P. 385–389.

- Голубятников Герман Юрьевич** – Институт прикладной физики РАН, кандидат физ.-мат. наук, [glb@ufp.appl.sci-nnov.ru](mailto:glb@ufp.appl.sci-nnov.ru)
- Масленникова Анна Владимировна** – Нижегородская государственная медицинская академия Росздрава, Институт прикладной физики РАН, доктор медицинских наук, профессор, [maslennikova.anna@gmail.com](mailto:maslennikova.anna@gmail.com)
- Орлова Анна Геннадьевна** – Институт прикладной физики РАН, кандидат биологических наук, [orlova@ufp.appl.sci-nnov.ru](mailto:orlova@ufp.appl.sci-nnov.ru)
- Пряникова Татьяна Игоревна** – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, студентка, [tatka-echo@mail.ru](mailto:tatka-echo@mail.ru)

УДК 004.434

## ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЯЗЫКИ В ОПИСАНИИ ЗАДАЧ НАУЧНЫХ СОРЕВНОВАНИЙ

М.С. Богданов, С.Е. Рукшин, Д.О. Степуленок

Разработана технология разработки предметно-ориентированных языков для представления задач математического характера в системах дистанционного обучения, которые для своей проверки не требуют ввода ответа методистом, т.е. обладают свойством «самопроверяемости».

**Ключевые слова:** предметно-ориентированные языки, представление математических задач, системы дистанционного обучения.

### Введение

Развитие дистанционного обучения (ДО) сделало актуальным автоматизацию поддержки ученика при решении им задач математического характера, что актуально для тех предметов, которые используют язык математики. В то же время системы дистанционного обучения оснащены этими возможностями в минимальной степени, а именно, они позволяют проверять ответы для небольшого числа форматов, таких как выбор ответа из нескольких предложенных, строковый формат, числовой формат и некоторых других, и принимать решения без их автоматической проверки в виде текста (гипертекста). Тем самым существующие дистанционные системы обучения предполагают достаточно большую работу методиста при подготовке задач:

- переформулировка задач в приемлемую для системы форму;
- решение задач;
- занесение ответов в систему;
- ручную проверку решений задач, решения которых представлены в «свободной» форме.

Кроме достаточно большой работы методиста на разных этапах подготовки учебных материалов, следует обратить внимание на дополнительные обстоятельства, такие как:

- необходимость проверки введенных ответов (поскольку сравнение с ними будет происходить автоматически);
- защиту введенных ответов от «взлома» с целью введения правильного ответа без попыток выполнить решение задачи (в существующих системах ДО проверяются не решения задачи, а только ответы).

Таким образом, актуальной является задача поиска таких средств для описания задач в системах ДО, которые были бы свободны от всех, либо, по крайней мере, от части отмеченных недостатков.

Авторы предлагают следующий путь решения этой задачи:

- разработать средства для формального описания задач, которые бы позволили вообще отказаться от ввода ответов методистами: задачи будут обладать свойством «самопроверяемости»;
- разработать интерфейсы для основных типов математических задач, которые позволят методистам использовать для описания задач предметно-ориентированные языки, имитирующие привычные языки и средства предметной области;
- разработать средства, обеспечивающие конструирование только математически корректных задач; это позволит использовать разработанные средства не только для создания учебных материалов для поддержки школьного курса или занятий кружкового характера и олимпиад, но и для постановки и исследования нерешенных задач.

В работах [1–3] показана эффективность такого подхода для работы с задачами по комбинаторике. В этой работе предложенные идеи обобщаются и иллюстрируются на примере создания системы для работы с геометрическими задачами на «геометрическом языке».

### Среда WiseTasks для поддержки «самопроверяемых» задач по комбинаторике

Для того чтобы сформулировать задачу в общем виде, рассмотрим особенности ее решения на одном примере: работе с комбинаторными задачами.

В описании комбинаторной задачи в системе выделяются две ее основные части. Первая предназначена для представления задачи в понятной человеку форме (например, словесное описание условия задачи), вторая представляет формализованное описание, понятное машине, вычислительной среде или интерпретатору, которые собственно и осуществляют проверку решения.

Формализованное описание в системе комбинаторной задачи в общем случае состоит из описания некоторого множества и определенного на нем предиката. Условием задачи может быть либо требование определить все элементы множества, удовлетворяющие данному предикату, либо привести первый удовлетворяющий элемент в соответствии с определенной нумерацией, либо, что встречается чаще всего, посчитать количество удовлетворяющих предикату элементов. Например, известная задача о количестве счастливых билетов может быть сформулирована как задача на множестве наборов из шести цифр, где предикатом является утверждение, что сумма первых трех цифр равна сумме последних трех цифр, а найти необходимо количество удовлетворяющих предикату элементов.

Рассмотрим описание задачи в системе на примере задачи о счастливых билетах. Внутренним представлением задачи для системы является XML-дерево, структурирующее данные об условии. Рассмотрим содержимое элемента `mathDescription`, содержащего формальное описание условия. Он состоит из двух подэлементов, `sourceSet` и `verifier`, содержащих, соответственно, описание множества и метода проверки ответа участника. Элемент `sourceSet` содержит в себе элемент `set`, имеющий атрибут `type` – тип множества, который может быть множеством перестановок, размещений, комбинаций, отрезком числовой прямой, а так же декартовым произведением, в последнем случае элемент `set` содержит в себе дочерние `set` элементы.

Элемент `verifier` описывает верификатор, он имеет атрибут `type`, определяющий один из описанных выше типов верификатора. Для задачи о счастливых билетах используется тип `SimpleVerifier`, соответствующий подсчету количества элементов множества, удовлетворяющих предикату. Сам предикат описывается в элементе `function`. Этот элемент соответствует композиции функций и может содержать дочерние `function` элементы. Конкретная используемая функция определяется по атрибуту `type`. Система предоставляет большой выбор функций, как простейших (логических и арифметических), так и более сложных.

На рис. 1 представлено формальное описание задачи, позволяющее осуществить самопроверку решения этой задачи системой. XML-элементы представлены в виде дерева и в читаемом варианте, в частности, элементы `function` записываются заглавной буквой `F` вместе с приписанным атрибутом типа. Отметим, что в системе учтена возможность параметризации условия, когда по одному такому описанию среда генерирует разные «клоны» исходной задачи. Эта часть мало зависит от способа формализации решения для компьютера и может состоять из перечисления параметров и их значений. Параметризация видна на приведенном примере в элементе `descriptions-params`.

Система допускает несколько режимов создания самопроверяемых задач:

1. описание задачи в формате XML, используя разработанный синтаксис языка (на практике не используется);
2. использование редактора общего назначения (изображен на рис. 1), помогающего соблюдать разработанный синтаксис (используется автором языка);
3. использование предметных сред-интерфейсов, в которых строится описание задач основных типов и которые затем автоматически конвертируются в разработанный формат XML (используется преподавателями и учениками).

### **Предметно-ориентированные языки программирования как средство описания задач**

Перейдем теперь к решению поставленной задачи в общем виде. Необходимо уменьшить разрыв между недоступным учителям универсальным редактором и редакторами узких классов задач. Для этого потребуется привлечь концепцию предметно-ориентированных языков программирования.

Предметно-ориентированные языки являются основой парадигмы языкоориентированного программирования. Его сутью является то, что при разработке программного обеспечения та часть, которая требует большего знания предметной области, чем особенности платформы, реализуется на специально созданном языке или языках. Язык исполняется в рамках предметно-ориентированной платформы. Предметно-ориентированный язык разрабатывается так, чтобы быть максимально доступным для специалистов предметной области, часто не являющихся программистами. В данной работе в качестве специалистов предметной области рассматриваются учителя или методисты, составляющие задачи для использования в олимпиадах или организации иной деятельности учащихся, связанной с решением задач.

В настоящее время наиболее развитой и перспективной средой для создания предметно-ориентированных языков программирования является система MPS, концепции которой и стали основой для создания нужного инструментария [4].

Система MPS позволяет создать предметно-ориентированный язык вместе со средством его редактирования. Создаваемый язык может быть расширением уже существующего, например, быть расширением языка Java, или же создаваться полностью с нуля, что более интересно для нас, потому что предполагаемыми пользователями языка являются преподаватели и методисты, незнакомые с Java. При создании языка описываются возможные узлы его абстрактного синтаксического дерева и способ их отображения на экране. При вводе текста на созданном языке вводится сразу же его дерево разбора, что позво-

ляет избежать стадии синтаксического анализа и навязывает пользователю правильный синтаксис, не позволяя вводить неверные конструкции. Редактор языка напоминает обычный текстовый редактор, но на каждой стадии ввода подсказывает, какую именно информацию и как необходимо ввести пользователю, при этом предоставляет возможные варианты дополнения текста. Хорошо разработанный предметно-ориентированный язык может использоваться без предварительного обучения потому, что уже после запуска редактора пользователь видит, какую именно информацию от него требуется ввести. Создаваемые редакторы имеют больше возможностей, чем оконные интерфейсы с визуальными элементами управления, потому что более динамичны и требуют меньшего пространства для большего количества информации. К сожалению, на данный момент система MPS не позволяет использовать созданные языки вне своего интерфейса и, хотя и распространяется бесплатно, является слишком громоздкой, чтобы предлагать учителям ее использовать. По этой причине при создании предметно-ориентированных языков для учителей приходится пользоваться собственными средствами.

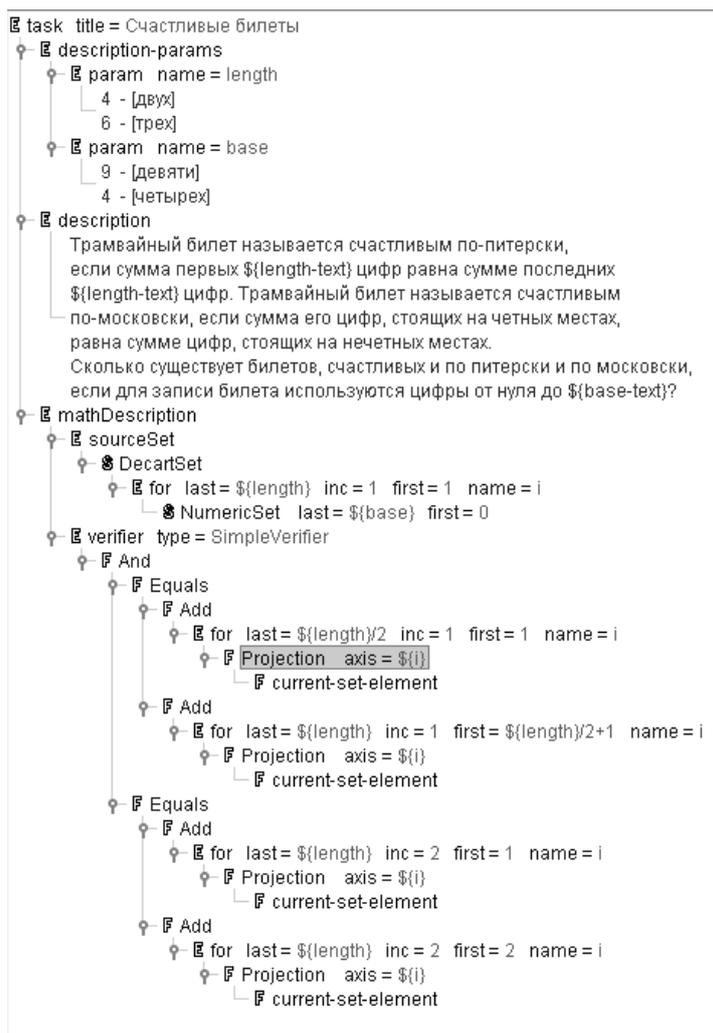


Рис. 1. Описание задачи о счастливых билетах в форме XML дерева

Сформулируем основные этапы разработки предметно-ориентированных языков для систем педагогического назначения.

1. Ограничение предметной области, т.е. сужение множества задач определенного раздела математики до рамок, в которых возможна автоматическая проверка решений по условию.
2. Выделение понятий предметной области, необходимых для описания задач и возможных отношений между понятиями.
3. Попытка описать задачи предметной области на языке понятий и связей между ними, добавление недостающих понятий и определение синтаксиса.
4. Создание объектной модели понятий и связей между ними.
5. Создание редактора предметно-ориентированного языка, т.е. описание редакторов для объектов модели, которые позволят переводить вводимые условия задач в данные объектной модели.
6. Реализация модуля проверки решений.

Создатель предметно-ориентированного языка для описания редакторов объектов модели может использовать понятие клеток, существующее в MPS. Редактор для объекта – это некоторое количество клеток, которые отображают информацию о редактируемом объекте. Например, объект «отрезок натуральных чисел» может иметь два поля, начальное и конечное число. Для настройки отображения объекта с помощью клеток необходимо добавить объекту описание, что его редактор состоит из четырех клеток: на первой написано слово «от», на второй, расположенной справа, написано значение соответствующего поля, далее, в клетке написано «до» и далее – значение другого поля объекта. Клетки могут быть вложены друг в друга, например, объект может содержать в себе подобъект, который редактируется с помощью клетки, состоящей из клеток подобъекта, тем самым клетки образуют иерархическую структуру.

В качестве примера рассмотрим применение предложенной технологии для создания среды, поддерживающей формулировку геометрических задач учителем, решение задач учеником, верификацию решений системой.

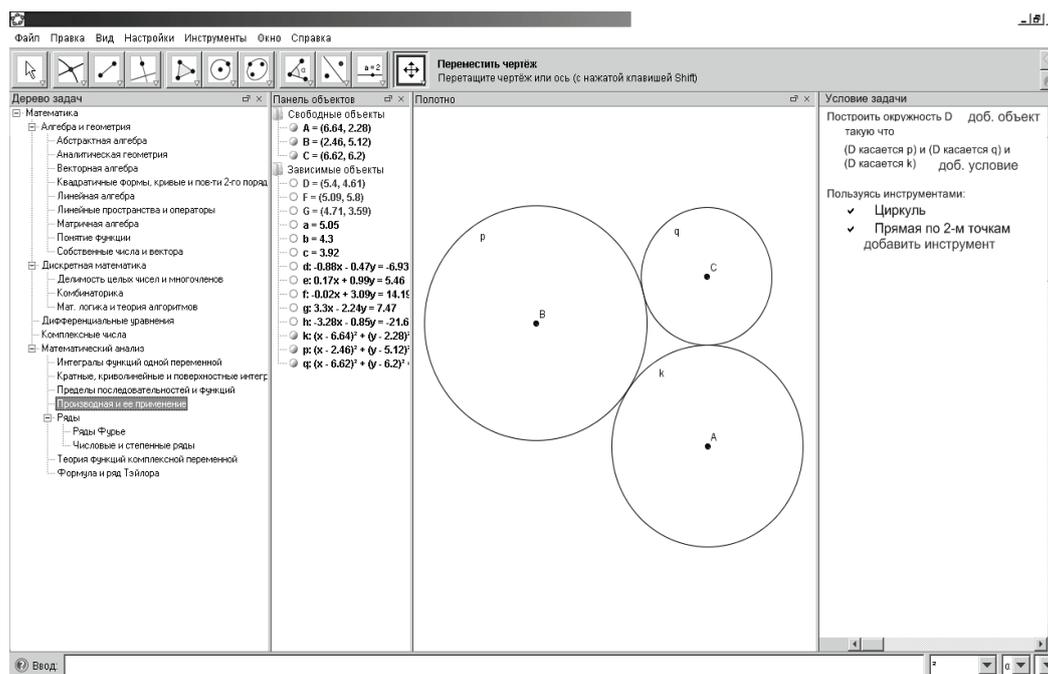


Рис. 2. Общий вид «учительского» интерфейса для геометрических задач

На рис. 2 изображен интерфейс учителя по созданию задачи. Левая панель содержит дерево задач, загруженных в систему. Средние две панели являются геометрическим редактором, правая содержит чертеж, а левая – список объектов чертежа. Самая правая панель – это редактор текста на предметно-ориентированном языке.

Для составления задачи на построение преподаватель рисует исходное построение для условия, которое будет показано ученику перед решением. Кроме того, он пишет в специальном редакторе условие задачи, пользуясь геометрическими обозначениями, например, символами параллельности и перпендикулярности. На рис. 2 приведен пример задачи: дано три окружности, касающиеся друг друга, постройте четвертую, касающуюся трех данных.

Для описания данной задачи в языке существует элемент *окружность*, а также предикат *касаться*. Тогда при начальном построении мы нарисуем три касающиеся друг друга окружности, а в качестве условия задачи укажем, что нужно построить еще одну окружность, которая будет касаться указанных трех. Допустим, исходные окружности обозначены буквами *A*, *B* и *C* (обозначения мы задаем в визуальном геометрическом редакторе), тогда условие выглядит так: Построить окружность *D*, такую что (*D* касается *A*) и (*D* касается *B*) и (*D* касается *C*). Эти предикаты, а также набор инструментов для построения, требуемый объект для построения и текст условия задачи, задаются в редакторе предметно-ориентированного языка. Итак, геометрические задачи на построение, описанные с помощью предложенного геометрического предметно-ориентированного языка, имеют схожую форму условия: Построить [перечисление объектов для построения] так, чтобы [Предикат] используя инструменты [Список инструментов]. Учителю необходимо лишь заполнить пропуски, при этом на каждом этапе ввода условия пользователь выбирает пропуск для заполнения и один из возможных вариантов заполнения. Расположение текстов и пропусков на экране задается разработчиком интерфейса с помощью описанного выше механизма клеток.

Интерфейс ученика отличается от интерфейса учителя тем, что вместо формального текста условия он видит условие на естественном языке и ему доступна кнопка «отправить решение на проверку».

### **Заключение**

Представленный в статье подход позволяет по-новому подойти к проблеме организации научных соревнований. Разработка адекватных задач средств ее представления в системе, языков описания таких задач, позволяет исключить этап предварительного решения задач перед размещением ее в системе дистанционного обучения. Задача, описанная на таком языке, обладает свойством «самопроверяемости», что позволяет перейти от задач с «известным ответом» к использованию исследовательских задач.

Например, расширение сред динамической геометрии с помощью таких языков, позволяют не только поддержать конструктивную деятельность ученика в среде, но позволить учителю или самому ученику ставить новые задачи, используя язык, аналогичный тому, который используется при описании решений задач.

### **Литература**

1. Богданов М.С. Автоматизация проверки решения задачи по формальному описанию ее условия // Компьютерные инструменты в образовании. – 2006. – № 4. – С. 51–57.
2. Pozdnyakov S., Bogdanov M., Pukhov A. Multiplicity of the knowledge representation forms as a base of using a computer for the studying of the discrete mathematics // The 9th International conference «Teaching Mathematics: Retrospective and Perspectives». Vilnius Pedagogical University. – 2008, 16–17 May.
3. Богданов М.С., Дубров С.Ю., Поздняков С.Н. Декларативная модель формального описания математических задач в системе проведения олимпиад WISETASKS и ее автоматическая проверка // Труды научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2009», 23–24 июня 2009. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2009. – С. 179–180.
4. Dmitriev Sergey. Language Oriented Programming: The Next Programming Paradigm. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.jetbrains.com/mps/docs/Language\\_Oriented\\_Programming.pdf](http://www.jetbrains.com/mps/docs/Language_Oriented_Programming.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 18.02.2010).

*Богданов Михаил Сергеевич* – AXIOM SL Inc., программист, [flown@mail.ru](mailto:flown@mail.ru)  
*Рукишин Сергей Евгеньевич* – Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, кандидат физ.-мат. наук доцент, [vliuser@gmail.com](mailto:vliuser@gmail.com)  
*Степуленок Денис Олегович* – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ассистент, [super.denis@gmail.com](mailto:super.denis@gmail.com)

УДК 044.588, 377.169.3

## **ИНТЕРАКТИВНЫЙ ТРЕНАЖЕРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ В.И. Яговкин, С.К. Стафеев**

Дано описание созданного интерактивного тренажерного комплекса для государственных образовательных учреждений. Предложен подход к созданию и рассмотрены различные сферы применения комплекса. Большое внимание уделено описанию пользовательского интерфейса и режимов работы с тренажерным комплексом.

**Ключевые слова:** интерактивный тренажерный комплекс, тренинг, контроль.

### **Введение**

Интерактивные средства обучения – средства, которые обеспечивают возникновение диалога, т.е. активные обмен сообщениями между пользователем и информационной системой в режиме реального времени. Появление интерактивных средств обучения обеспечивает такие новые виды учебной деятельности, как регистрация, сбор, накопление, хранение, обработка информации об изучаемых объектах, явлениях, процессах, передача достаточно больших объемов информации, представленных в различной форме, управление отображением на экране моделями различных объектов, явлений, процессов [1].

Современные компьютерные технологии достигли такого уровня развития, что возможность эмулирования реальных процессов с помощью вычислительных машин стала практически безграничной. Имитация последствий ядерного взрыва, наводнений, извержений вулканов, глобального потепления – все это уже давно применяется в ведущих лабораториях многих стран мира. Но, оборудование, на котором такое программное обеспечение будет выдавать необходимый результат, доступно далеко не всем

образовательным учреждениям. В случае с учреждениями начального и среднего профессионального образования ситуация выглядит хуже, чем где-либо. Так как такие специальности, как автомеханик, слесарь, электрогазосварщик, с каждым годом теряют свою привлекательность, финансирование учебных заведений, которые готовят таких специалистов, не позволяет закупить дорогостоящее оборудование, необходимое для установки интерактивных комплексов нового поколения. А востребованность специалистов данного профиля год от года не уменьшается.

Другой проблемой является то, что многие преподаватели учреждений начального и среднего профессионального образования плохо знакомы с компьютером и современным программным обеспечением, а курсы профессиональной переподготовки в этом направлении проводятся крайне редко [2].

Решение проблемы очевидно: необходимо создать такой интерактивный тренажерный комплекс, который был бы минимально требователен к системе, прост в освоении, как учениками, так, что не мало-важно, и самими преподавателями. И при этом смог бы максимально полно и интересно охватить необходимый комплекс практического обучения.

### **Подход к созданию интерактивного тренажерного комплекса**

Совместно с экспертной комиссией, состоящей из преподавателей учреждений начального и среднего профессионального образования, было выбрано оборудование, которое находится в эксплуатации в большинстве учебных заведений и, согласно плану практической подготовки учащихся, были сделаны профессиональные снимки данного оборудования в процессе эксплуатации. Съемка производилась из одной точки, чтобы учащийся не терял положение рабочей установки во время интерактивной работы с его моделью. Далее снимки прошли редактирование в пакете Adobe Photoshop CS3 и были загружены в интерактивную flash-среду [3], где, используя сценарии обучения, которые были созданы совместно с экспертной комиссией, были превращены в полноценный интерактивный тренажерный комплекс. Отказ от трехмерного моделирования оборудования произошел в связи с тем, что работа с такой моделью, если она создана с достаточной степенью детализации, требует огромных ресурсов. А вычислительные машины, которыми оборудовано большинство компьютерных классов учреждений начального и среднего профессионального образования, не обладают таковыми.

### **Пользовательский интерфейс интерактивного тренажерного комплекса**

Интерактивный тренажерный комплекс может функционировать как настольное приложение. Для этого достаточно иметь компьютер с установленной на него операционной системой Windows и flash-проигрывателем. Благодаря тому, что flash легко интегрируется в любой Internet-браузер, система может функционировать по технологии «клиент-сервер», последняя представляет собой наиболее удачную модель взаимодействия, так как пользователь может получить доступ к системе из любого места, где есть доступ в Интернет. Еще одним важным преимуществом данной модели является то, что учащиеся могут параллельно проходить обучение на данном тренажере, а что, еще важнее, аттестацию, результаты которой будут сохраняться на компьютере преподавателя.

Интерактивные тренажерные комплексы проектировались таким образом, чтобы они могли использоваться не только при самостоятельной работе студентом, но и в лекционном процессе.

Пользовательский интерфейс создан максимально дружелюбным, чтобы процесс обучения работы с системой занимал минимально возможное время. Главное окно тренажерного комплекса представлено на рис. 1. Каждый интерактивный тренажерный комплекс состоит в среднем из 3-х модулей, в зависимости от исходного практического курса (рис. 2):

- динамическая демонстрация;
- тренинг;
- контроль.

Режим «Динамическая демонстрация» представляет собой записанную последовательность правильных действий, комментируемую преподавателем. Ее можно использовать в лекционных целях. При этом – это может быть как видео-урок, когда учащиеся без помощи и пояснений преподавателя смотрят видеозапись с комментариями эксперта, так и полноценный урок, где преподаватель останавливает видеозапись в местах, требующих дополнительного пояснения, и комментирует важные моменты. Данный режим может использоваться даже как презентация на дне открытых дверей учебного заведения.

Режим «Тренинг» – это последовательное выполнение заданий изучаемого модуля по инструкции с подсказками на экране для правильного выполнения операций. Обязательными элементами пользовательского интерфейса при решении задачи интерактивности должны быть: всплывающие подсказки, возможность масштабирования, управляющие кнопки. В комплексах это все предусмотрено. Учащийся может сколько угодно раз пройти этот режим, для отработки правильной последовательности исполнения требуемой задачи. В конце он получит статистические данные о результатах прохождения (рис. 3). Опираясь на них, он может повторно пройти этот режим или перейти к следующему режиму «Контроль».

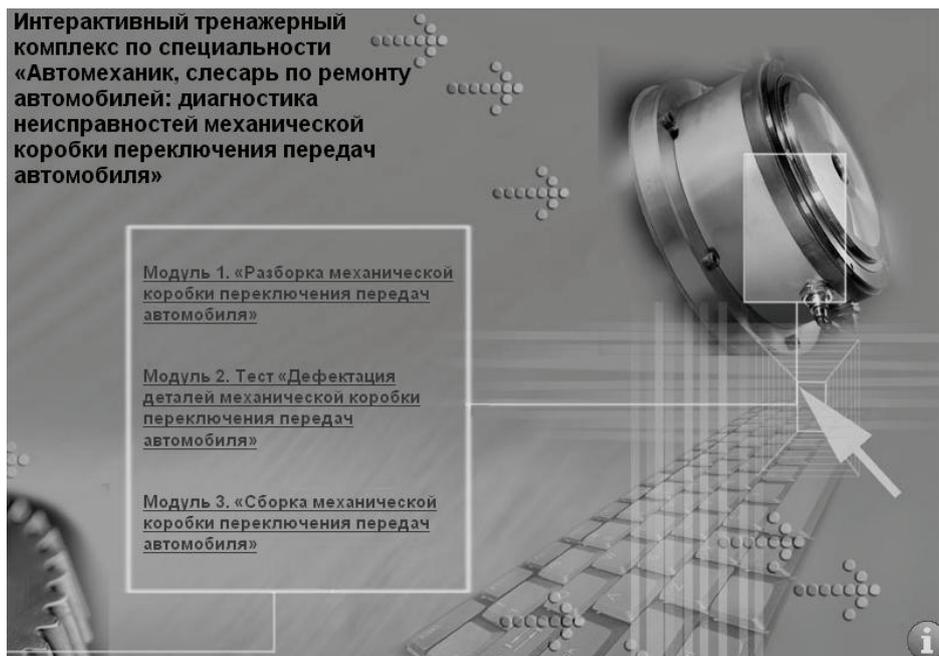


Рис. 1. Главное окно интерактивного тренажерного комплекса

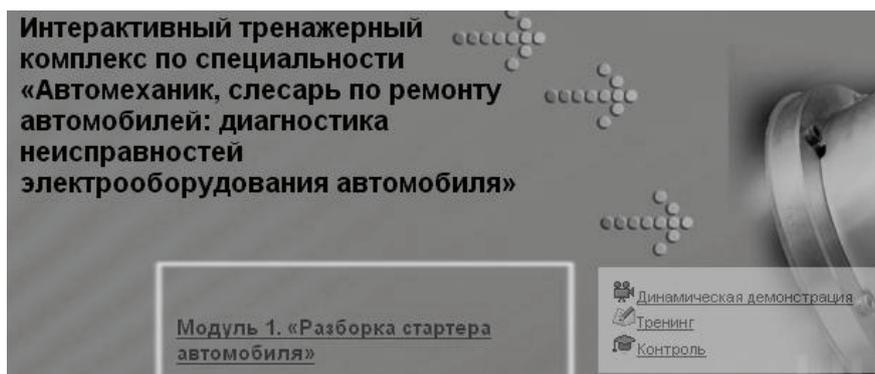


Рис. 2. Режимы интерактивного тренажерного комплекса

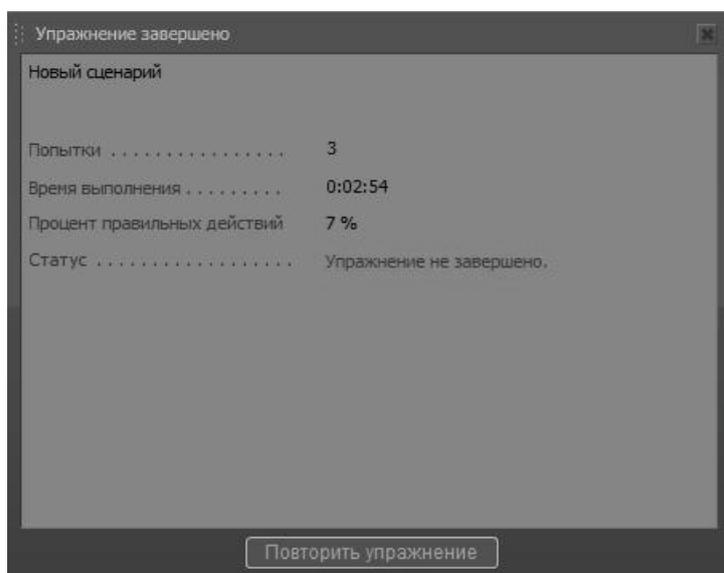


Рис. 3. Данные о результатах прохождения режима «Тренинг»

Режим «Контроль» – это выполнение задания с оценкой полученных результатов. Задание такое же, как и в режиме «Тренинг», но выполняется по инструкции без подсказок на экране. Для самоконтроля во время тренинга используются табло-указатели «время выполнения операции», «количество допущенных ошибок», «итоговый результат тренинга» (рис. 4). Преподаватель указывает время, отведенное им на прохождение данного режима, необходимое количество баллов или максимальное количество ошибок необходимое для успешного результата и количество попыток, предоставляемое учащемуся. Данные о результатах прохождения могут отправляться на компьютер преподавателя.



Рис. 4. Табло-указатели для самоконтроля

Визуальное представление прохождения режимов «Тренинг» и «Контроль» представлено на рис. 5.



Рис. 5. Визуальное представление прохождения режимов «Тренинг» и «Контроль»

### **Заключение**

Получен готовый продукт, который, благодаря своей интерактивности, большому количеству графического и аудиоматериала, дружелюбному пользовательскому интерфейсу и малым требованиям к ресурсам аппаратного обеспечения, получил отличные отзывы от экспертной комиссии и конечных пользователей.

Создано десять интерактивных тренажерных комплексов по массовым рабочим специальностям: автомеханик, оптик, электрогазосварщик и т.д. Интерактивные тренажерные комплексы уже внедрены во все учреждения начального и среднего профессионального образования, подведомственные Комитету по Образованию Санкт-Петербурга. Все комплексы успешно опробованы и используются в учебном процессе.

Ведутся работы по совершенствованию данных интерактивных тренажерных комплексов и разработке новых, с учетом пожеланий экспертной комиссии.

### **Литература**

1. Полат Е.С., Бухаркина М.Ю., Моисеева М.В., Петров А.Е. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 272 с.
2. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании: Учеб. пособие для студентов высших педагогических учебных заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 192 с.
3. Гурский Д.А. Flash MX 2004 и Action Script: Обучение на примерах. – М.: Издательский центр «Новое знание», 2003. – 448 с.

**Яговкин Вадим Игоревич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yagovkin@itc.vuztc.ru

**Стафеев Сергей Константинович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, stafeev@phd.ifmo.ru

УДК: 339.137.22

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ  
ТОРГОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ СЕРВИСНО-  
ОРИЕНТИРОВАННОЙ ЭКОНОМИКИ**

О.В. Чернышева

Представлены основные результаты исследования проблемы конкурентоспособности торговых предприятий в условиях сервисно-ориентированной экономики. Особое внимание уделено таким составляющим конкурентоспособности как цена, качество, персонал, сервис и финансы. Разработан комплекс мероприятий по реализации и повышению конкурентоспособности предприятия торговли.

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, цена, качество, сервис, персонал, финансы.

**Введение**

Задачей исследования является выявление и анализ системы факторов, оказывающих наибольшее влияние на эффективность деятельности и конкурентоспособность торгового предприятия, а также выработка предложений по совершенствованию технологии управления конкурентоспособностью предприятия отрасли торговли в условиях эволюционирующей рыночной среды.

В результате проведенных исследований среди основных составляющих, влияющих на конкурентоспособность торгового предприятия, можно выделить цену, систему управления персоналом, аспекты финансовой деятельности, качество товаров и услуг, а также сервис. Проведем анализ данных составляющих, а также рассмотрим разработанный нами комплекс мероприятий, направленный на повышение конкурентоспособности торгового предприятия.

**Цена товара как регулятор конкурентоспособности**

Цена является важной составляющей конкурентоспособности любого предприятия. В условиях современной экономики система ценообразования строится не по классическому принципу, когда цена состоит из закупочной цены, понесенных затрат и желаемой прибыли, а формируется с использованием рыночного подхода, когда отправной точкой является цена конкурентов, или среднерыночная цена. По этой причине предприятия, предлагающие товары по минимальным ценам, находятся в более выигрышном положении, так как имеют возможности повышения объемов реализации, увеличения показателей товарооборачиваемости, выручки, прибыли и пр. Поэтому одной из задач современного торгового предприятия является выработка политики, при которой цена товара будет конкурентоспособной, так как в противном случае предприятие будет вытеснено с рыночного пространства [1].

**Сервис и его влияние на конкурентоспособность торгового предприятия**

В современном мире особой составляющей конкурентоспособности является процесс привлечения покупателей и внимания целевой аудитории к товарам и услугам предприятия. Оформление витрин магазинов является одним из главных направлений деятельности организации. Витрина магазина – его визитная карточка, его лицо, которое позволяет повысить объемы сбыта продукции и лояльность потребителей. В нашей стране область оформления витрин малоразвита, нельзя сравнить стиль оформления витрин в России и в крупнейших городах Европы. В российских витринах по мнениям ряда экспертов отсутствует креативность, необычность, товары зачастую не способны привлечь внимание покупателя, заинтересовать его. Они малобюджетны и похожи одна на другую. Покупатель редко может воспроизвести в памяти, вспомнить оформление витрины какого-либо магазина или выделить на ней необычный фрагмент и запоминающийся элемент из-за отсутствия сюжета. Для привлечения внимания потребителя витрина должна отличаться оригинальностью. У покупателя должно возникнуть желание ознакомиться с ассортиментом магазина, даже при отсутствии финансовых возможностей для покупки в данный момент времени. Витрина предназначена не только для демонстрации товаров представленных в магазине. Витрина призвана отразить уровень магазина, его класс, показать его благополучие, имидж, положение на рынке, стабильность, соответствие современным требованиям, тенденциям. Витрина магазина должна быть выполнена таким образом, чтобы составлять единое целое со всем зданием, в котором расположен магазин. Если магазин занимается реализацией одежды, обуви, то именно манекен позволяет наиболее

эффектно преподнести вещь, дополнив ее другими предметами гардероба и хорошо сочетающимися аксессуарами. Оформление витрины, ее содержание должно привлекать и задерживать внимание потребителя, заинтересовывать, убеждать его в необходимости покупки, поражать своей индивидуальностью, неповторимостью, изысканностью, эксклюзивностью. Оформление витрины – целая наука, сочетающая в себе психоэмоциональные подходы, знания в области архитектуры, дизайнерские навыки, знания конъюнктуры рынка в данной области.

Немаловажную роль в привлечении внимания является и качество обслуживания потребителя. Потребитель должен получить такую консультационную помощь, которая в дальнейшем спровоцирует факт приобретения товара именно в данном магазине. Современный магазин должен предоставлять потребителю помимо возможности приобретения любого товара целый комплекс дополнительных услуг, включающий услуги по оплате мобильной связи, оплате коммунальных услуг, услуги по оформлению подарочной продукции, услуги флористов, химчистку и пр. Потребитель должен иметь возможность решения целого комплекса задач на территории одного торгового предприятия.

### **Качество отечественной продукции: проблемы и перспективы**

Сформированный рынок конкурентоспособной продукции позволяет предотвратить кризисные явления в экономике, а в случае их возникновения, снизить негативные последствия, повысить продовольственную безопасность государства. На отечественном рынке сложилось мнение о том, что импортные товары превышают по качественным характеристикам товары отечественного производителя. Во многом это заблуждение. Импортная продукция реализуется большими объемами по причинам связанным главным образом с правильно разработанной упаковкой, внедрением комплекса рекламных мероприятий, использованию различных методик сбыта, лояльности и устоявшихся предпочтений потребителей, но по органолептическим и физико-химическим показателям такая продукция во многом уступает российской. На сегодняшний день ситуация незначительно изменилась по сравнению с последними десятилетиями. Укрепили свои позиции на рынке товары легкой промышленности, мясная продукция, молочные товары, кондитерские изделия и пр.

Глобальный кризис выявил проблемы, существующие в экономике России. На протяжении многих десятилетий в российском автопроме, металлургической промышленности и ряде других отраслей отсутствовала корпоративная культура, не использовались инновационные подходы к развитию, существовали проблемы финансово-экономического характера, а также недостатки в сфере управления. В результате кризиса в России произошла дестабилизация работы большинства хозяйствующих субъектов, повысилась социальная напряженность в обществе, выросла безработица.

Мировой финансово-экономический кризис, проявившийся в России в 2008 году, выявил необходимость нахождения страны в состоянии постоянной готовности к изменениям, происходящим в окружающей среде, а также проведении профилактических антикризисных мер. Только сформированный рынок конкурентоспособных качественных товаров и услуг позволит в дальнейшем сопротивляться кризисным явлениям и адекватно реагировать на изменения, происходящие в эволюционирующей рыночной среде.

### **Влияние системы управления персоналом на основные результаты хозяйственной деятельности**

Правильно организованный управленческий процесс оказывает значительное влияние на эффективность деятельности предприятия. В целях организации грамотного процесса управления необходимо его четкое разделение на составляющие, что позволит реализовать цели и задачи организации при помощи наиболее опытных сотрудников, вследствие чего будет обеспечиваться высокое качество выполняемой работы, необходимый контроль, своевременное выявление недостатков и отклонений от установленных нормативов, а также безотлагательные попытки по устранению недостатков. Весь комплекс мероприятий необходим при осуществлении, например, торгово-технологического процесса, он позволяет наилучшим образом удовлетворить потребности конечного потребителя, повысить производительность труда и заинтересовать персонал в реализации глобальных планов организации. Руководству любой организации следует использовать научные подходы к управлению, адаптированные к эволюционирующим условиям рынка, и использовать апробированный опыт с целью оптимизации управленческого процесса [2].

Рационально организованный управленческий процесс позволяет избежать необоснованных процедур и операций, следовательно значительно снизить объем документооборота, сократить временные затраты, избежать дублирования должностей, трудовых функций, повысить производительность труда и в конечном итоге эффективность работы торгового предприятия. В результате разделения управленческого процесса можно наблюдать повышение внутренней организации, четкое понимание целей и задач персоналом организации, а, следовательно, качественное и своевременное выполнение задач организации.

Для эффективного управления на руководящие должности должны назначаться сотрудники с высоким уровнем профессиональных знаний, опытом, интуицией, навыками в области профессиональных интересов. Руководитель должен разбираться в психологии, с уважением относиться к подчиненным, отличаться самостоятельностью. Также необходимо четкое распределение обязанностей между руководителями структурных подразделений и их подчиненными во избежание дублирования исполнительских функций и соблюдения принципа единоначалия.

Для обеспечения конкурентоспособности необходимо применение адаптивных методик управления. Управленческий процесс, выстроенный на этапе зарождения организации, должен корректироваться, соотносясь с изменениями в рыночной среде с целью повышения его соответствия требованиям современности.

### **Управление дебиторской задолженностью как составляющая антикризисного управления торговым предприятием**

С финансовой точки зрения предприятию постоянно следует отслеживать динамику основных показателей хозяйственной деятельности. Особое внимание руководству предприятия торговли следует уделять такому показателю как дебиторская задолженность. У оптовых предприятий торговли в силу специфики деятельности может возникнуть безнадежная дебиторская задолженность в связи с неудовлетворительной платежной дисциплиной контрагентов. Таким образом, управление дебиторской задолженностью является неотъемлемым элементом антикризисного управления предприятием и составляющей конкурентоспособности [3].

Размер дебиторской задолженности, ее состав, структура могут меняться. Дебиторская задолженность может иметь тенденцию, как к росту, так и к снижению. При этом нельзя однозначно охарактеризовать каждую из динамик. Рост дебиторской задолженности может быть вызван положительной динамикой ее относительной доли в активах предприятия, пролонгированием сроков ее погашения, неудовлетворительной платежной дисциплиной клиентов, их неплатежеспособностью, снижением конкурентоспособности товаров и услуг, а может быть связан, наоборот, со стратегией развития предприятия (выдача долгосрочных кредитов, в том числе товарных, в целях расширения клиентской базы путем заключения договоров с отсрочкой платежа). Снижение дебиторской задолженности на первый взгляд является положительной тенденцией в деятельности предприятия, однако данная динамика может быть связана с потерей клиентов и выходом из дела партнеров по бизнесу, сокращением объемов продаж товаров и услуг. Таким образом, нельзя дать однозначную характеристику движению дебиторской задолженности, при оценке дебиторской задолженности важно для каждого из предприятий учитывать особенности отрасли, в которой оно осуществляет хозяйственную деятельность. Торговые предприятия (особенно оптовые) могут иметь достаточный объем дебиторской задолженности в связи с продажей товаров «под реализацию», в кредит. Поэтому коэффициент соотношения собственных и заемных средств может не соответствовать своим нормативным значениям, но это будет обусловлено всего лишь особенностями ведения хозяйственной деятельности предприятия отрасли.

Естественным является возникновение в процессе расчетов между хозяйствующими субъектами сумм дебиторской и кредиторской задолженности. Но для дальнейшего нормального хода деятельности предприятия необходимо четко отслеживать сроки их погашения и фактическое состояние предприятий-партнеров хозяйственного оборота. Необходимо своевременно анализировать структуру дебиторской задолженности с целью выявления безнадежной, просроченной дебиторской задолженности.

Можно выделить три модели поведения предпринимателей в области кредитной политики в зависимости от стратегии и тактики развития. Предложим их авторские названия.

Первая модель «Risk credit minimum» (RCMin). Менеджмент придерживается мнения о необходимости постоянного сокращения круга партнеров, которые достаточно часто нарушают платежную дисциплину, недостаточно кредитоспособны. Иногда к таким кредиторам применяются меры по минимизации сроков предоставления кредитных ресурсов.

Вторая модель «Risk credit medium» (RCMed). Предприниматели имеют в качестве ориентира средний уровень кредитного риска при продаже на условиях отсрочки платежа. Однако это может в конечном итоге привести к неожиданным ситуациям, так как достаточно сложной является адекватная оценка уровня кредитного риска.

Третья модель «Risk credit maximum» (RCMax). Предприниматели склоняются к мнению о том, что необходимо любыми силами и средствами привлечь новых покупателей и расширить сбыт своей продукции (как по общему объему, так и в территориальном разрезе). В этом случае к сотрудничеству допускаются участники рынка с очень высоким уровнем кредитного риска, а также практикуется продление срока отсрочки платежа. В этом случае распространенным явлением могут быть и достаточно низкие проценты по предоставляемой на длительный срок отсрочке платежа.

Каждое предприятие при выборе той или иной модели поведения на рынке должно руководствоваться рядом обстоятельств. Если предприятие не обладает достаточными средствами для того, чтобы оградить себя от угрозы кризиса и вполне возможного банкротства, то не следует выбирать тип политики, в основу которого положен захват рыночного пространства. Данное утверждение относится и к предприятиям присутствующим на рынке короткий период времени, так как они в недостаточной мере могут осознавать специфику и особенности ведения бизнеса в данной сфере. Крупные предприятия могут позволить себе роскошь работы с малоизвестными предприятиями, однако в этом случае возникает риск потери имиджа и положения на рынке данного предприятия.

Естественно при непогашении в срок задолженности можно взыскать соответствующие суммы за просрочку платежа, но возникает вопрос временного характера, ведь данное предприятие на момент выплаты ему причитающихся сумм может находиться уже в предкризисном состоянии близком к банкротству. Поэтому при осуществлении хозяйственной деятельности необходимо выстроить политику таким образом, чтобы балансировать на уверенности в финансовой устойчивости и развитии своего бизнеса.

### **Заключение**

В условиях современной сервисно-ориентированной экономики предприятию торговли следует адекватно отвечать требованиям внешней среды и обычаям делового оборота. Менеджменту организации следует проводить комплексный мониторинг текущего состояния в целях предотвращения попадания предприятия в кризисные ситуации, а также разрабатывать альтернативные пути развития с целью дальнейшего повышения конкурентоспособности предприятия.

### **Литература**

1. Засенко В.Е., Мокин В.Н., Ульянова И.К. Конкурентоспособность торговых сетей в условиях глобализации мировой экономики: методология, теория, практика. – СПб: Изд-во СПбТЭИ, 2006. – 201 с.
2. Базылев И.В. Вопросы карьерного роста персонала на малом предприятии // Менеджмент в России и за рубежом. – 2007. – № 2. – С. 132–134.
3. Броило Е.В. Построение эффективных параметров реорганизации кризисного предприятия // Менеджмент в России и за рубежом. – 2007. – № 2. – С. 96–104.

*Чернышева Ольга Владимировна* – Санкт-Петербургский торгово-экономический институт, старший преподаватель, ov49@mail.ru

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 004.031.42

ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ЗАДАЧИ В СИСТЕМЕ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ  
УДАЛЕННОЙ РАБОТЫ С ЗАДАЧАМИ

И.А. Посов, С.Е. Рукшин

Описываются проектные решения, принятые для добавления поддержки генерируемых задач в систему DCES, предназначенную для организации удаленной работы с задачами по математике и информатике.

**Ключевые слова:** генерируемые задачи, дистанционное обучение.

Система DCES предназначена для поддержки процесса дистанционного обучения (ДО) и используется для организации удаленной работы с задачами по математике и информатике при проведении занятий, тестирований, соревнований. Основной особенностью системы является расширяемость предоставляемых учащимся интерфейсов для ввода ответов и работы с задачами, а также модулей проверки решений. При решении задач учащиеся в зависимости от используемых модулей ввода могут вводить произвольные формулы, решать геометрические задачи с помощью средств динамической геометрии, вводить графы с помощью графического интерфейса и др. Проверка решений совершается с помощью модулей, расположенных на сервере, на котором запущена система.

При проведении контрольных принято выдавать учащимся разные варианты условий задач, это усложняет обмен решениями задач и повышает объективность результатов контрольной. В общем случае условия задач могут создаваться автоматически. Задачи, имеющие подобные условия, называются генерируемыми [1]. В этой работе рассматривается проблема подключения возможности генерирования условий задач в систему DCES.

При добавлении поддержки генерации задач необходимо определиться, где и в какой момент оно будет происходить. Для системы DCES основной критерий выбора технологии – это простота реализации дополнительных модулей ввода и проверки решений. Некоторые добавляемые в систему модули создаются не с нуля, а являются портированными вариантами уже существующих систем. Эти системы сами могут иметь поддержку генерации задач и, следовательно, не требуют поддержки генерации со стороны системы. Такой, например, является система WiseTasks [2] для решения комбинаторных задач. Модуль, работающий в системе, должен выдавать учащемуся одно и то же задание при каждом подключении к системе. Это может быть достигнуто без значительных изменений в реализации модулей, если заставить модуль использовать предоставляемые системой данные для инициализации генератора случайных чисел. В качестве таких данных подходит идентификационный номер ученика. Некоторые модули системы имеют общее назначение и не могут самостоятельно генерировать условия задач. Таким, например, является модуль, позволяющий вводить в качестве ответа произвольные формулы. В качестве условия он показывает текст и не участвует в его генерации. Следовательно, обязанность генерации должна быть возложена на систему, а генерация при этом должна происходить на сервере, чтобы быть уверенным, что генератору доступны все необходимые для генерации инструменты, необязательно установленные у пользователя. Одним из необходимых для генерации инструментов является TeX, с помощью которого создаются изображения формул, использующиеся в условиях математических задач.

Задачи, используемые в системе, имеют определенный формат, в нем задачи представлены как коллекции ресурсов, помеченных метками с метаинформацией, описывающей смысл ресурса для использующих задачу модулей. Из описания задачи саму систему интересует информация о модулях ввода и проверки ответов. Так как задача для целей проверки в общем случае может содержать ответ в открытом виде, одним из этапов работы системы при выдаче условий участникам является удаление из содержимого тех ресурсов, которые в соответствии с помечающими их метками не должны быть доступны участнику. Именно этап удаления лишних ресурсов перед посылкой задачи участнику и может быть обобщен, кроме удаления лишних ресурсов, могут быть созданы или изменены другие ресурсы, содержащие генерированные данные для условия или полностью само условие. Для реализации генерации в метаинформацию необходимо добавить ссылку на модуль генерации. Модуль генерации на основе идентификационного номера участника и файла с задачей выдает некоторое количество данных, это может быть условие, ответ к задаче и другая информация. Разную информацию генератор выдает в заранее определенных именованных каналах, на которые можно ссылаться при описании ресурсов задачи.

1. Посов И.А. Автоматическая генерация задач // Компьютерные инструменты в школе. – 2007. – № 1. – С. 54–62.
2. Богданов М.С. Автоматизация проверки решения задачи по формальному описанию ее условия // Компьютерные инструменты в образовании. – 2006. – № 4. – С. 51–57.

*Посов Илья Александрович* – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», ассистент, iposov@gmail.com

*Рукшин Сергей Евгеньевич* – Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, кандидат физ.-мат. наук, доцент, vliuser@gmail.com

УДК 621.315.592.621.382.002

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СИСТЕМЫ Si/SiO<sub>2</sub>, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

О.В. Кузнецова, Фам Куанг Тунг, Р.А. Халецкий

Приводятся результаты исследования влияния лазерного излучения на структурные свойства системы кремний-термический окисел с использованием методов просвечивающей электронной микроскопии и локальной катодоллюминесценции.

**Ключевые слова:** лазерное облучение, нанокластеры кремния, система Si/SiO<sub>2</sub>.

Изучение процессов дефектообразования в системе Si/SiO<sub>2</sub> при окислении и при различных внешних воздействиях является необходимым условием повышения качества пленок SiO<sub>2</sub> на кремнии. В работе рассматриваются результаты исследования влияния лазерного излучения на структурные свойства системы Si/SiO<sub>2</sub> с использованием методов локальной катодоллюминесценции (КЛ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

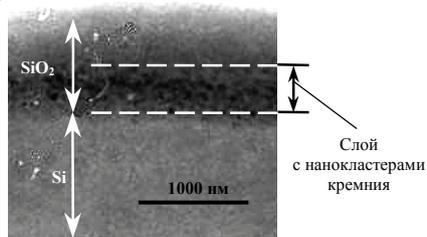


Рис. 1. Микрофотография границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>

На рис. 1 приведена микрофотография границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> после облучения окисленной кремниевой пластины волоконным YLP-лазером с длиной волны 1,07 мкм и длительностью импульса 80 нс, полученная на ПЭМ с увеличением 50000<sup>x</sup>. Микрофотография получена с участка пластины, находящейся в 2 мм от границы зоны расплавления, образованной после мощного лазерного воздействия. Видно, что на границе раздела сформировался слой толщиной около 0,3 мкм, состоящий из включений нанокластеров кремния в окисной матрице. Диаметр нанокластеров находится в пределах от нескольких единиц нанометра до 40 нм. В результате исследования структуры нанокластерного слоя в темном поле ПЭМ было обнаружено, что нанокластеры кремния в этом слое находятся в кристаллической фазе.

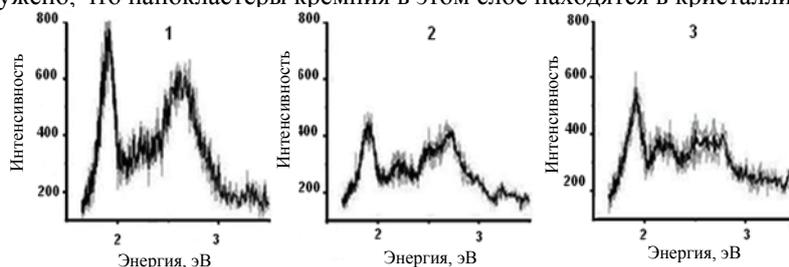


Рис. 2. Спектры КЛ, измеренные в 40 мм (1), в 10 мм (2), в 5 мм (3) от ЗР

На рис. 2 приведены спектры КЛ в видимом диапазоне, полученные на различных расстояниях от зоны расплавления (ЗР), сформированной на поверхности окисленной кремниевой пластины облучением второй гармоникой пикосекундного YAG-Nd-лазера с длиной волны 532 нм. Первый спектр соответствует типичному спектру термической двуокиси кремния с характерными пиками 1,9 эВ и 2,7 эВ, связанными с наличием на границе раздела собственных дефектов. Пик 1,9 эВ соответствует немостиковому атому кислорода, а пик 2,7 эВ – двухкоординированному атому кислорода [1]. По мере приближения к ЗР наблюдается модификация спектров КЛ. На расстоянии около 10 мм от ЗР появляется зеленая полоса с пиком 2,2–2,5 эВ, которая связывается с появлением в окисле избыточных связей типа кремний-кремний. Избыток подобных связей интерпретируется авторами [2] как наличие в окисле нанокластеров кремния, что хорошо согласуется с микрофотографией (рис. 1). При дальнейшем приближении к ЗР полоса в зеленой области спектра становится более выраженной относительно полос, связанных с собственными дефектами окисла. Такое перераспределение световой энергии в спектре КЛ может быть вызвано структурной трансформацией собственных дефектов двуокиси кремния.

1. Силинь А.Р., Трухин А.Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. – Рига: Зинатне, 1985. – 244 с.
2. Zamoryanskaya M.V., Sokolov V.I., Sitnikova A.A. and C.G. Konnikov. Cathodoluminescence study of defect distribution at different depths in films SiO<sub>2</sub>/Si // Sol. State Phen. – 1998. – V. 63–64. – P. 237–242.

Кузнецова Ольга Валерьевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, olunchik\_1989@mail.ru

Фам Куанг Тунг – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, quang\_tung@yahoo.com

Халецкий Роман Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат техн. наук, доцент, halecky@yandex.ru

УДК 681.382.2

## P-I-N СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.В. Жилияев, Д.И. Микулик, Т.А. Орлова, В.Н. Пантелеев, Н.К. Полетаев,  
С.А. Сныткина, Л.М. Федоров

Исследованы характеристики полупроводниковых эпитаксиальных p-i-n структур на основе GaAs, выращенных методом газовой эпитаксии. Разработаны новые условия эпитаксиального роста, позволяющие изготовить «толстые» слои чистого GaAs в рамках одного процесса.

**Ключевые слова:** p-i-n структуры, GaAs, ХГФЭ, детектор рентгеновского излучения.

В области энергий фотонов рентгеновского излучения 10–100 кэВ перспективно применение материала GaAs. Данная работа заключалась в изготовлении арсенид галлиевых p-i-n структур высокого качества, подходящих для дальнейшего производства на их основе детекторов рентгеновского излучения. Все полупроводниковые структуры были получены в кварцевом реакторе методом хлоридной газовой эпитаксии (ХГФЭ) стандартным образом. В экспериментах использовался горизонтальный реактор проточного типа с резистивной системой нагрева, позволяющей соблюдать требуемый температурный режим и в зоне источника (800°C), и в ростовой зоне (730–760°C). Источником мышьяка являлся материал AsCl<sub>3</sub>, переносимый в реактор потоком водорода. В зоне источника находилась лодочка с металлическим галлием.

Подложки «epi-ready» GaAs p<sup>+</sup>-типа, легированные Si, с концентрацией 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup> имели размер 5×10 см<sup>2</sup> и толщину 300 мкм. Процесс роста в реакторе включал в себя две стадии: 1) рост основного чистого толстого (до 200 мкм) n<sup>0</sup>-слоя GaAs с концентрацией основных носителей 10<sup>11</sup>–10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>; 2) рост p<sup>+</sup>-слоя GaAs, легированного Zn, толщиной 1–3 мкм и концентрацией на уровне 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. В качестве i-слоя детекторной структуры использовался слаболегированный n<sup>0</sup>-GaAs слой с максимально низкой концентрацией донорной примеси. В результате серии опытов были получены структуры с зеркально-гладкой поверхностью. Толщина активного n<sup>0</sup>-слоя варьировалась от 150 до 250 мкм в зависимости от задания условий роста, толщина p<sup>+</sup>-слоя GaAs составляла порядка 1 мкм.

Применение дополнительного потока AsCl<sub>3</sub> позволило практически полностью устранить продольный клин по толщине, появляющийся в горизонтальном реакторе. Неравномерность толщины в пределах подложки составила 10–20 мкм. Кроме этого, удалось достичь средней скорости роста GaAs 10 мкм/ч, а длительность ростового процесса увеличили до 20–25 часов.

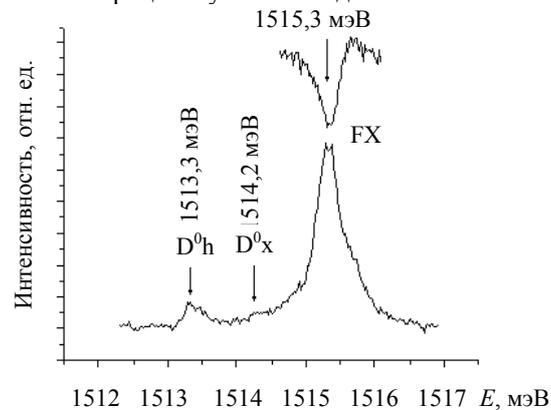


Рисунок. Спектр фотолюминесценции n<sup>0</sup>-GaAs слоя

Измерения фотолюминесценции n<sup>0</sup>-слоя осуществлялись с помощью He-Ne-лазера при температуре 2 К (рисунок). Этот метод диагностики хорошо зарекомендовал себя в прошлых работах [J]. Соотношение интенсивностей спектральных линий позволяет оценить концентрацию остаточных примесей в материале и дает значение  $N_D - N_A = 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Для определения концентрации свободных носителей в n<sup>0</sup>-GaAs слое использовались вольт-фарадные измерения. Полученные этим методом значения составляли менее 10<sup>12</sup> см<sup>-3</sup>, что согласуется с измерениями фотолюминесценции и соответствует требованиям, предъявляемым к чистоте активных слоев для рентгеновских детекторов выбранного типа.

По распределению интенсивности электролюминесценции в направлении, перпендикулярном плоскости p-n перехода, определена диффузионная длина носителей заряда (дырок), которая составила величину от 70 до 100 мкм.

На основе полученных арсенид галлиевых p-i-n структур изготовлены опытные образцы детекторов рентгеновского излучения. Энергетическое разрешение приборов составило около 600 эВ при энергиях поглощаемых фотонов 60 кэВ и 170 эВ при 5,9 кэВ соответственно.

[J]. Zhilyaev Yu.V., Poletaev N.K., Botnaryuk V.M., Orlova T.A., Fedorov L.M., Yusupova Sh.A., Owens A., Bavdaz M., Peacock A., Meara B.O., Helava H. Optical characterization of ultra-pure GaAs // Phys. Status Solidi (c). – 2003. – V. 0. – P. 1024–1027.

*Жилыев Юрий Васильевич* – Физико-технический институт им. Иоффе, доктор физ.-мат. наук, профессор, zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

*Микулик Дмитрий Игоревич* – Физико-технический институт им. Иоффе, мл. научн. сотр., dogged06@mail.ru

*Орлова Татьяна Алексеевна* – Физико-технический институт им. Иоффе, кандидат физ.-мат. наук, научн. сотр., shikina71@hotmail.com

*Пантелеев Валерий Николаевич* – Физико-технический институт им. Иоффе, научн. сотр., valnikpan@mail.ru

*Полетаев Николай Константинович* – Физико-технический институт им. Иоффе, кандидат физ.-мат. наук, научн. сотр., poletaev@mail.ioffe.ru

*Сныткина Светлана Александровна* – Физико-технический институт им. Иоффе, научн. сотр., zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

*Федоров Леонид Михайлович* – Физико-технический институт им. Иоффе, кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

**УДК 004.056.53**

### **К ВОПРОСУ О ПЕРЕВОДЕ 32-х РАЗРЯДНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ В 64-х РАЗРЯДНЫЕ В.А. Безруков**

Приведены рекомендации для перевода 32 разрядных приложений Windows в 64 разрядные.

**Ключевые слова:** архитектура Intel 64, типы данных, size\_t, ptrdiff\_t, intptr\_t и uintptr\_t.

Данные, определения и рекомендации относятся только к архитектуре микропроцессора Intel 64. Почти все современные операционные системы имеют версии для архитектуры Intel 64.

Моделью данных для 64-битной операционной системы Windows является модель LLP64 (указатели имеют размер 64 бита). Для совместимости эта система поддерживает исполнение 32-битных программ, которые работают в режиме модели данных ILP32LL (типы int, long и указатели (pointers) имеют размер в 32 бита). Разница между 32-разрядной и 64-разрядной средами компиляции заключается в смене модели представления типов данных.

В общем виде перевод кода можно представить:

- заменить функции Win32 API на их 64-разрядные варианты;
- заменить типы данных в соответствии с заменяемой моделью.

Соответствующие API-функции Win32 необходимо заменить их 64-разрядными эквивалентами. Например, если в программе необходимо выбрать значение, связанное со структурой WNDCLASSEX, в виде дескриптора (указателя) следует использовать функцию GetClassLongPtr, а если изменить значения, то – функцию SetClassLongPtr. При этом в качестве второго параметра этих функций следует использовать значения, идентификаторы которых начинаются с префикса GCLP\_, например, GCLP\_WNDPROC – изменить адрес оконной процедуры, связанной с классом. Для выборки информации об окне или из дополнительной памяти окна в виде указателя следует применять функцию GetWindowLongPtr, а для изменения значения указателя, которое связано с окном, или значение, которое находится по заданному смещению в дополнительных данных окна – функцию SetWindowLongPtr. Для второго параметра этих функций следует использовать значения, идентификаторы которых начинаются с префикса GWLP\_, например, GWLP\_HINSTANCE – изменить дескриптор экземпляра приложения. Допустимые значения для диалоговых окон являются только значения, идентификаторы которых начинаются с префикса DWLP\_ [Л].

В 64-битных приложениях предпочтительно использовать типы size\_t, ptrdiff\_t, INT\_PTR, intptr\_t и uintptr\_t вместо 32-битных типов int и unsigned. Тип size\_t – беззнаковый целый тип, например тип результата операции sizeof. На 32-битной системе size\_t будет занимать 32 бита, а на 64-битной – 64 бита. Этот тип обычно применяется для счетчиков циклов и индексации массивов.

Для размещения указателей существует тип intptr\_t (uintptr\_t), который лучше выражает намерения и делает код более переносимым. Это целые типы со знаком (без знака), способные хранить указатели, размер которых определяется платформой, т.е. экземпляры этих типов или 32-разрядные или 64-разрядные. Любой указатель на void может быть преобразован к этому типу. Тип ptrdiff\_t – знаковый целый тип. На 32-битной системе ptrdiff\_t будет занимать 32 бита, а на 64-битной – 64 бита. Тип ptrdiff\_t, например, является результатом выражения, где один указатель вычитается из другого, а также применяется для счетчиков циклов, индексации массивов и адресной арифметики. В архитектуре Intel 64 размер size\_t и ptrdiff\_t совпадают с размером указателя, т.е. sizeof(size\_t) == sizeof(ptrdiff\_t) == sizeof(void \*).

Чтобы получить имя константы, представляющей минимальное и максимальное значения указанных типов, необходимо в имени типа, заменить t на MAX или MIN и перевести все символы в верхний регистр, например, максимально допустимым значением типа size\_t является константа SIZE\_MAX (stdint.h).

При создании 64-битных приложений, использование типов size\_t, ptrdiff\_t, INT\_PTR, intptr\_t и uintptr\_t обеспечивает быстрое действие, возможность работы с большими объемами данных, корректную адресную арифметику, а также позволяют писать переносимый код.

[Л]. Саймон Р. Windows 2000 API. Энциклопедия программиста: Пер. с англ. – Киев: СПб: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. – 1088 с.

*Безруков Вячеслав Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат техн. наук, доцент, bezrukov@mail.ifmo.ru

## SUMMARY

### OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

#### PARAMETERS RESEARCH OF SUPERFICIALLY COLORED POLYMERIC LENSES

**A. Kremenskaya, E. Prunenko**

The coloring of polymeric eyeglass lenses is used for sun glasses production. Time influence of surface staining of polymer material CR-39 and the dye concentration on its spectral characteristics and the refractive index changing is researched. It is shown that with time increasing of surface staining the refractive index and transmittance decrease.

**Keywords:** surface coloring, polymeric material CR-39, reflective index, transmittance.

*Anastasiya Kremenskaya* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, a\_kremenskaya@mail.ru

*Elena Prunenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, prunenko@pochta.ru

#### METHOD FOR ELIMINATING THE NOISE SIGNAL INFLUENCE ON THE SENSITIVITY OF RECEIVING HYDROACOUSTIC ANTENNA BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS

**S. Varzhel, V. Strigalev**

The article deals with mathematical method for eliminating the influence of noise signal on the sensitivity of receiving hydroacoustic antenna based on fiber Bragg gratings.

**Keywords:** fiber-optic sonar antenna, interferometric phase sensor, the sensitivity of photo-detection.

*Sergey Varzhel* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, vsv187@gmail.com

*Vladimir Strigalev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Professor, vstrglv@mail.ru

#### OPTICAL SURFACES PRODUCTION OF ELEMENTS ON THE BASE OF ZINC SULFIDE

**E. Vilkova, O. Timofeev**

The process of mechanical polishing of polycrystalline zinc sulphide with the use of colophony-based polishing resin was investigated. The optimum pressure range is suggested for mechanical polishing. It is shown that the parameters of treatment process and surface quality of zinc sulfide will be greatly affected not only by composition of polishing resins but also by technique of their preparation.

**Keywords:** zinc sulphide, mechanical polishing, polishing resins, purity class, surface defects.

*Elena Vilkova* – Institute of Chemistry for High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, junior scientist, timofeev@ihps.nnov.ru

*Oleg Timofeev* – Institute of Chemistry for High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, PhD, Associate professor, timofeev@ihps.nnov.ru

#### DIGITAL PROCESSING OF FRAUNHOFER DIFFRACTION PATTERNS AT THE OBJECTS GEOMETRICAL PARAMETERS CONTROL

**A. Ivanov, V. Michailov**

New method of diffraction pattern digital processing, which will allow increasing the accuracy of the diffraction control methods, is developed. It is offered to register coordinates of inflexion points of the diffraction pattern principal maximum, which have high sensitivity to resizing of controllable object.

**Keywords:** Fraunhofer diffraction, image processing.

*Alexander Ivanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate professor, i\_off@mail.ru

*Vitaliy Michailov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, mynameisvitalik@gmail.ru

### LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

#### INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE PARAMETERS OF CHROME FILMS AND THEIR INFLUENCE ON RESULTS OF LOCAL THERMOCHEMICAL OXIDATION BY LASER RADIATION

**A. Agafonov**

The present paper is devoted to investigation of influence of thin chrome films microstructure on results of thermochemical oxidation, stimulated by laser radiation. Results of experimental researches of a microstructure and element structure of films from 50 to 140 nanometers are presented. Results of research of laser record on

chrome films with the various crystallite sizes are presented. Results comparison of numerical modeling and natural experiments is made.

**Keywords:** thermochemical oxidation, chrome films, crystallite

*Andrey Agafonov* – Samara State Aerospace University, Assistant, andr\_agafonov@mail.ru

#### THIN METAL FILMS STRUCTURE RESEARCH AFTER FEMTOSECOND LASER RECORDING

**V. Veiko, A. Baranov, M. Yarchuk, A. Ivanov, K. Bogdanov**

Thermochemical method of thin Cr films modification by laser pulses of super short width is considered. Illumination modes till exhalation are examined. Illuminated areas in the atmosphere and vacuum steady for etching are obtained. Structural and chemical composition of illuminated areas is determined. The most technological mode of Cr modification is selected increasing the method resolution.

**Keywords:** surface modification, thin Cr films, femtosecond laser, chromium oxides, Raman spectroscopy.

*Vadim Veiko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, Department Head, veiko@lastech.ifmo.ru

*Alexander Baranov* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, a\_v\_baranov@yahoo.com

*Michail Yarchuk* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, chukforyou@list.ru

*Alexander Ivanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ale4103@gmail.com

*Kiril Bogdanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kirw@inbox.ru

#### INVESTIGATION OF THE ULTRAVIOLET RADIATION INFLUENCE ON THE THIN FILMS SURFACE

**E. Gavrish, V. Chuiko**

The article deals with the investigation of anisotropic texture creation on the smooth surface of the alignment films on the basis of amorphous carbon (a-C:H) and indium-tin oxide (ITO) with ultraviolet laser radiation. The results of the investigation are given with optical microscopy of the samples surface before and after the processing of UV laser radiation, and the results of liquid crystal alignment on the processing surface. The influence of the processing conditions on the surface texture is discussed.

**Keywords:** amorphous carbon, indium-tin oxide film (ITO), thin films, UV radiation, liquid crystal (LC)

*Ekaterina Gavrish* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, katty87@list.ru

*Vladimir Chuiko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior lecturer, veiko@lastech.ifmo.ru

#### THE RESEARCH OF THE CONTRAST RASTER CREATION PROCESS BY LASER MARKING

**O. Yulmetova, A. Scherbak**

The research results of laser marking conditions influence on the level of contrast and microgeometry of labels, created on precise beryllium surfaces of gyrodevices, are given. The possibility of obtaining necessary contrast level  $0,7 \pm 0,1$  on the wavelength 860 nm by laser marking was revealed during research.

**Keywords:** laser marking, roughness.

*Olga Yulmetova* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, Postgraduate, www.ralli@rambler.ru

*Alexander Scherbak* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, D.Sc., leading scientific researcher, a\_sch@gtm.ru

#### ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

##### NONTRIVIAL PENDULUM SYSTEMS CONTROL UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC AND FUNCTIONAL UNCERTAINTIES

**S. Kolyubin, A. Pyrkin**

The paper deals with motion control for not actuated pendulum systems under conditions of parametric and functional uncertainties, considering example of inverted position stabilization of inertia wheel pendulum on the movable platform. Obtained adaptive controller allows achieving control task for unknown parameters of the plant, the presence of neglected dynamics and control signal limitation. In contrast to other approaches, obtained algorithm provides real-time adjustment of controller parameters. Effectiveness of proposed approach is illustrated by experimental results.

**Keywords:** not actuated systems, pendulum systems, adaptive control, identification, mechatronic experimental setup.

*Sergey Kolyubin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ksa\_tau@mail.ru

*Anton Pyrkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, a.pyrkin@gmail.com

## CONTROL SYSTEM SYNTHESIS OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE ALTAY TELESCOPE AZIMUTHAL AXIS

**V. Tolmachev, M. Nikitina, M. Sergeeva**

The method for control system synthesis of the power watching electric drive of an azimuthal axis of the big telescope rotary device for Altay optic-laser center is offered.

**Keywords:** three-mass model of the mechanism, the power watching electric drive, mechanical resonance frequency.

*Valery Tolmachev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, va-tolmachev@mail.ru

*Maria Nikitina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, nikitina@ets.ifmo.ru

*Maria Sergeeva* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sergeeva.maria@mail.ru

## TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENTS CALCULATION IN COUPLED QUANTUM WAVEGUIDE SYSTEM

**M.Gavrilov, I. Popov**

Mathematical model of the coupled quantum waveguide system is constructed. Transmission and reflection coefficients depending on the geometric and energy parameters of the system can be obtained numerically based on it.

**Keywords:** quantum physics, coupled waveguides, numerical simulation.

*Maxim Gavrilov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, maxim.gavrilov@gmail.com

*Igor Popov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, Department Head, popov@mail.ifmo.ru

## SOFTWARE PACKAGE FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR NONLINEAR NAVIGATION PROBLEMS

**A.Toropov, V. Vasiliev**

A software package for performance analysis of algorithms for nonlinear navigation problems is suggested. The possibilities of the package are illustrated.

**Keywords:** Kalman-type algorithms, filtering, navigation.

*Anton Toropov* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, Scientific researcher, toropov\_a@mail.ru

*Vladimir Vasiliev* – Saint Petersburg State University, Postgraduate, vasiliev\_vl.a@mail.ru

## THE BALANCING OF RADIAL ELECTROMAGNETIC FORCES OF GATED MOTOR WITH ASYMMETRICAL STATOR WINDING

**I. Ovchinnikov, A. Egorov**

This paper presents approaches for balancing of radial electromagnetic forces of gated motor. These forces arise in a motor when stator windings are divided into several independent winding sections. These sections interact with general rotor with permanent magnet.

**Keywords:** gated motor, radial force, elementary torque, stator coil.

*Igor Ovchinnikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, ludimit@yandex.ru

*Alexei Egorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, alexeykey@rambler.ru

## TWO-BODY MODEL OF QUANTUM WIRE COUPLED WITH QUANTUM RING

**D. Eryomin**

Operators, describing behavior of two interacting particles in the quantum wire and in the ring, are constructed by means of operator extension theory. Two-body model of quantum wire coupled with quantum ring is described. Model spectrum is numerically studied. The result is compared with equivalent model with one particle.

**Keywords:** Schrödinger equations, symmetric operator, Krein theory, self-conjugate extension, Green function.

*Dmitry Eryomin* – Mordvinian State University named after N. Ogaryov, Postgraduate, ereminda@mail.ru

## COMPONENT CALCULATION OF THE SPECTROMETRIC POSITION-SENSITIVE NEUTRON DETECTOR

**D. Postovarova**

For simultaneous detection of neutrons and high-energy division gamma-rays a new device - low-background spectroscopic position-sensitive neutron detector is proposed to be established based on  $^3\text{He}$  gas-based neutron counters or glass doped with  $^6\text{Li}$  and a number of scintillator-based neutron detectors used at the same time as neutron thermalizers. This paper presents the results of registration modeling of neutrons by proposed neutron detector for its various forms and materials and for two different neutron sources.

**Keywords:** low-background spectroscopic position-sensitive neutron detector, mathematical simulation.

*Dar'ya Postovarova* – V.G. Khlopin Radium Institute, junior scientific researcher, darya.bayandina@gmail.com

## ON ELECTROMAGNETIC FIELD INDUCTORS IN JOINT FINITE AND BOUNDARY ELEMENT METHODS

**I. Stupakov, M. Korsun, M. Royak**

The two ways of taking into account the field inductors are considered for mathematical model that is used in three-dimensional electromagnetic processes simulation with joint boundary and finite element method. The first of them is based on introducing of full scalar potential break surface into calculation area; the second one is based on representation of magnetic field strength as a sum of the incomplete potential gradient and the magnetic field induced by current coils strength.

**Keywords:** boundary and finite element method, electromagnetic processes.

*Ilya Stupakov* – Novosibirsk State Technical University, Postgraduate, E-mail: istupakov@gmail.com

*Maria Korsun* – Novosibirsk State Technical University, Postgraduate, maria.korsun@gmail.com

*Mikhail Royak* – Novosibirsk State Technical University, Professor, D.Sc., Associate professor, royak@fpm.ami.nstu.ru

## INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION FORMATION ALGORITHM DEVELOPMENT OF ORDER PACKAGES IN VIRTUAL ENTERPRISES

**A. Salomatina, I. Subbotin, Ye. Yablochnikov**

Various approaches to the problem decision of the order analysis in the cooperation environment are investigated. Application possibility of the qualifier and expert system in algorithm of formation of order packages and select of co-executors is considered.

**Keywords:** information control system, order analysis, order package, qualifier, expert systems.

*Anna Salomatina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Salomatina.Anna@gmail.com

*Igor Subbotin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Soobboteen@gmail.com

*Yevgeniy Yablochnikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate professor, Department Head, eij@mail.ifmo.ru

## HYDROSTATIC PRESSURE IMITATION AT TRIGGER TESTS OF INDEPENDENT UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES IN WORKSHOP CONDITIONS

**V. Valetov, A. Krasilnikov**

Circuit decisions of the hydrodynamic stand and its brake mechanism of original designs for working off of underwater starting modules of mainly small-sized uninhabited underwater vehicles are considered. Correlations are given, allowing to make an estimation of influence of the stand for work of starting arrangements. By means of the developed settlement model working capacity of a brake mechanism in the big range of speeds of an input of a product in a brake pipe is proved.

**Keywords:** uninhabited independent underwater vehicle, the starting arrangement, test, the hydrodynamic stand, conformity factor, a brake mechanism.

*Vyacheslav Valetov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, valetov@tps.ifmo.ru

*Anton Krasil'nikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, a.v.krasilnikov@mail.ru

## COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

### APPLICATION OF GENETIC PROGRAMMING AND MODEL CHECKING FOR FINITE-STATE MACHINE INDUCTION ON THE BASE OF TESTS AND SPECIFICATION

**K. Egorov, F. Tsaryov, A. Shalyto**

We describe the method of finite state machine induction using both genetic programming and model verification based on testing and model checking. The description of chromosome structure, of genetic algorithm, of cross-over and mutation operations is given. Experimental results for the induction of elevator doors control system are given.

**Keywords:** genetic programming, machine learning, model checking, automata-based programming.

*Kirill Egorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, magistrate's student, kegorof@gmail.com

*Fyodor Tsaryov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, fedor.tsarev@gmail.com

*Anatoly Shalyto* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D.Sc., Professor, shalyto@mail.ifmo.ru

## GENERATION ALGORITHM FOR 3D FACE MODEL BY A PHOTOGRAPH

**A. Shlyannikov**

The paper suggests a method for generating a 3D face model by a single input image. Algorithm is based on extracting the control points and characteristic features from input image and applying them to a model. A special wavelet transform is used to extract the most informative features from face photograph. Generated model can be used in face recognition systems or for visualization.

**Keywords:** face recognition, 3D-modeling, wavelet processing.

*Alexander Shlyannikov* – Kazan State University, Postgraduate, a.shlyannikov@gmail.com

## ON THE FORMAL SPECIFICATION AND VERIFICATION OF AUTOMATA-BASED PROGRAMS BY SPECIFICATION PATTERNS

**A. Klebanov, O. Stepanov, A. Shalyto**

Model checking is a well developed verification technique; still it is not widely adopted. One of the reasons is that defining formal specification as a set of temporal logic formulae is an error-prone and time-consuming task. This paper gives an overview of the research which focuses on expressing verifiable requirements in a controlled natural language in the framework of automata-based programming. Applicability of the specification patterns in scope of automata-based approach is investigated. Also a formal grammar is introduced to derivate the requirements.

**Keywords:** automata-based programming, model checking, temporal logic.

*Andrey Klebanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, magistrate's student, klebanov.andrey@gmail.com

*Oleg Stepanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Assistant, oleg.stepanov@gmail.com

*Anatoly Shalyto* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, Department Head, shalyto@mail.ifmo.ru

## CALCULATIONS OPTIMIZATION IN APPLIED SOFTWARE IN C LANGUAGE ON THE EXAMPLE OF EUROPEAN OPTION PRICING

**S. Bastrakov, R. Donchenko, I. Meerov, A. Polovinkin**

This paper deals with optimization of applied computational programs in C. The main purpose of optimization in this case is the effective utilization of available computational resources. The study is performed on the example of European call option pricing. We use widespread Heath-Jarrow-Morton (HJM) model for evolution of the forward rate curve. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by computational experiments.

**Keywords:** software optimization, multicore architectures, financial mathematics.

*Sergey Bastrakov* – Nizhny Novgorod State University named after N. Lobachevskiy, student, mib@uic.nnov.ru

*Roman Donchenko* – Nizhny Novgorod State University named after N. Lobachevskiy, student, ss.donchenko@itlab.unn.ru

*Iosif Meerov* – Nizhny Novgorod State University named after N. Lobachevskiy, Associate professor, PhD, Associate professor, mib@uic.nnov.ru

*Alexey Polovinkin* – Nizhny Novgorod State University named after N. Lobachevskiy, Postgraduate, alexey.polovinkin@gmail.com

## MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

### THE STATISTICAL ANALYSIS OF NANOPOROUS GLASSES STRUCTURE BY IMAGES RECEIVED WITH THE METHOD OF CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPY

**I. Kukhtevich, A. Evstrapov**

Images of nanostructured porous glasses by method of confocal laser scanning microscopy are received. These images are the evidence of structures with different optical properties. Images filtration has been done. Intensity histograms according the tints of grey for filtered images have been completed. Relation analysis between histogram maximum height and glass thermal treatment time has been done. Processes in glasses under heat treatment are discussed.

**Keywords:** nanostructures, porous glasses, confocal laser scanning microscopy, filtration, and image analysis.

*Igor Kukhtevich* – Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, engineer, ba@inbox.ru

*Anatoly Evstrapov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate professor, an\_ evs@mail.ru

## THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

### SOLUTION ALGORITHMS FOR DIRECT AND BACKWARD HEAT CONDUCTIVITY PROBLEMS BY MEANS OF DIFFERENTIAL-DIFFERENCE MODELS

**K. Kirillov, N. Pilipenko**

The article describes the use of various versions of digital Kalman filter for solving the boundary and coefficient inverse problems of heat conductivity. It contains descriptions for mathematical models of heat transfer and

measurements as well as used algorithms and computational routines. The testing results of developed programs are included.

**Keywords:** differential-difference model of heat transfer, boundary and coefficient inverse problems of heat conductivity, Kalman filter.

*Kirill Kirillov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, kirill.kirillov@gmail.com

*Nikolai Pilipenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, pilipenko38@mail.ru

## BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

### PERSPECTIVE FOR THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE RESEARCH AREAS IN THE FIELD OF LASER SYSTEMS AND BIOMEDICAL OPTICAL TECHNOLOGIES

**A. Belikov, V. Khramov**

The promising areas of modern laser medicine are examined in this work. Goals, objectives and content of the innovative research areas in the field of laser systems and biomedical optical technologies are formulated.

**Keywords:** adaptive control, microbeams, micropulses, programmable effect.

*Andrey Belikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate Professor, meddv@grv.ifmo.ru

*Valery Khramov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, Department Head, khramov@grv.ifmo.ru

### METHOD OF DIFFUSE OPTICAL SPECTROSCOPY FOR *IN VIVO* ESTIMATION OF TUMOR OXYGENATION DYNAMICS

**G. Golubyatnikov, A. Maslennikova, A. Orlova, T. Pryanikova**

Capabilities of diffuse optical spectroscopy for noninvasive assessing of parameters changing of oxygenation in experimental tumors under its induced modification have been demonstrated. Using this method, the alterations of distribution of oxygenated hemoglobin, deoxygenated hemoglobin, and blood oxygen saturation are shown under the influence of pentoxifyllin – the agent for enhancing the microcirculatory perfusion. Increase of oxyhemoglobin content, characterizing oxygen delivery to tissues, as well as decrease of deoxyhemoglobin concentration, characterizing tissues oxygen consumption, caused recovery of blood oxygen saturation level in the experimental tumor zone.

**Keywords:** tumor oxygenation degree, diffuse optical spectroscopy, noninvasive diagnostics, oxygen state correction, pentoxifyllin, Plis' lymph sarcoma.

*German Golubyatnikov* – Institute of Applied Physics of RAS, PhD, glb@ufp.appl.sci-nnov.ru

*Anna Maslennikova* – Nizhny Novgorod State Medical Academy, Institute of Applied Physics of RAS, D.Sc., Professor, maslennikova.anna@gmail.com

*Anna Orlova* – Institute of Applied Physics of RAS, PhD, orlova@ufp.appl.sci-nnov.ru

*Tatiana Pryanikova* – Nizhny Novgorod State University named after N. Lobachevskiy, student, tatka-echo@mail.ru

## NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

### SUBJECT-ORIENTED LANGUAGES FOR DESCRIPTION OF SCIENTIFIC COMPETITIONS PROBLEMS

**M. Bogdanov, S. Rukshin, D. Stepulenok**

Technology for developing of subject-oriented languages for representations of math problems in distance learning systems is presented in the article. Basic feature of this approach is a possibility to use new class of problems – “self-tested” problems.

**Keywords:** subject-oriented languages, representation of mathematical knowledge, distance learning systems.

*Mikhail Bogdanov* – AXIOM SL Inc., programmer, flown@mail.ru

*Denis Stepulenok* – Saint Petersburg State Electrotechnical University (LETI), assistant, super.denis@gmail.com

*Sergey Rukshin* – State Russian Herzen Pedagogical University, PhD, Associate professor, vliuser@gmail.com

### INTERACTIVE TRAINING COMPLEX FOR THE STATE EDUCATIONAL INSTITUTIONS

**V. Yagovkin, S. Stafeev**

Problems and principles of creation of interactive training complex for the state educational institutions are discussed in this article. Various spheres of usage of interactive training complex are described. User interface of training complex is demonstrated.

**Keywords:** interactive training complex, training, control.

*Vadim Yagovkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, yagovkin@itc.vuztc.ru

*Sergey Stafeev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, Dean, stafeev@phd.ifmo.ru

## ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

### COMPETITIVENESS MANAGEMENT PERFECTION OF TRADE ENTERPRISE IN THE CONDITIONS OF SERVICE-ORIENTED ECONOMY

**O. Tchernysheva**

The basic research results of competitiveness estimation problems of trade enterprises in the conditions of service-oriented economy are given. Special attention is paid to such components of competitiveness as personnel, finance, service, quality and price. A system of activities for realization and increasing of trade enterprises competitiveness has been worked out.

**Keywords:** competitiveness, price, quality, service, personnel, finance.

*Olga Tchernysheva* – Saint Petersburg Institute of Commerce and Economics, senior lecturer, ov49@mail.ru

## BRIEF REPORTS

### GENERATED PROBLEMS IN THE SYSTEM INTENDED FOR DISTANCE WORK WITH PROBLEMS

**I. Posov, S. Rukshin**

The paper describes design decisions made to support problems with generated statements into the DCES system that is intended to organize distance work with problems in mathematics and informatics.

**Keywords:** generated problems, distance learning.

*Il'ya Posov* – Saint Petersburg State Electrotechnical University (LETI), assistant, iposov@gmail.com

*Sergey Rukshin* – State Russian Herzen Pedagogical University, PhD, Associate professor, vliuser@gmail.com

### DEFECTS INVESTIGATION OF SI/SIO<sub>2</sub> SYSTEM FORCED BY LASER IRRADIATION

**O. Kuznetsova, Pham Quang Tung, R. Khaletsky**

Investigation results of laser irradiation influence on structural properties of silicon-thermal oxide system are shown in this article.

**Keywords:** laser irradiation, silicon nanocluster, Si/SiO<sub>2</sub> system.

*Olga Kuznetsova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, olunchik\_1989@mail.ru

*Pham Quang Tung* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, quang\_tung@yahoo.com

*Roman Khaletsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate professor, halecky@yandex.ru

### GaAs P-I-N STRUCTURES FOR X-RAY DETECTORS

**Yu. Zhilyaev, D. Mikulik, T. Orlova, V. Pantelev, N. Poletaev, S. Snytkina,**

**L. Fyodorov**

The characteristics of GaAs p-i-n structures, made by vapor phase epitaxy, were researched. New conditions of epitaxial growth, allowing the production of thick ultra-pure GaAs layers by single process are worked out.

**Keywords:** p-i-n structures, GaAs, HVPE, X-ray detector.

*Yuri Zhilyaev* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, Laboratory Head, D.Sc., Professor, zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

*Dmitry Mikulik* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, junior scientist, dogged06@mail.ru

*Tat'yana Orlova* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, PhD., Scientific researcher, shikina71@hotmail.com

*Valery Pantelev* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, Scientific researcher, valnikpan@mail.ru

*Nikolay Poletaev* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, PhD., Scientific researcher, poletaev@mail.ioffe.ru

*Svetlana Snytkina* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, Scientific researcher, zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

*Leonid Fyodorov* – Ioffe Physical Technical Institute, RAS, PhD, Leading scientific researcher, zhilyaev@jyuv.ioffe.rssi.ru

### ON CONVERSION OF 32-DIGITS APPLICATIONS INTO 64-DIGITS

**V. Bezrukov**

The report contains some recommendations about conversion of 32-digits Windows applications into 64-digits ones.

**Keywords:** Intel 64 architecture, data types, pointer, size\_t, ptrdiff\_t, intptr\_t, uintptr\_t

*Vyacheslav Bezrukov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD, Associate professor, bezrukov@mail.ifmo.ru