

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

июль—август 2009

№ 4 (62)



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, 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.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. Котелкова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

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

Телефон: (812) 233 12 70

Факс: (812) 232 02 95 (с пометкой: для редакции
Научно-технического вестника)

[http: //books.ifmo.ru/ntv](http://books.ifmo.ru/ntv)

E-mail: karmanov@mail.ifmo.ru

1. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ	5
Васильев В.Н., Парфенов В.Г., Шалыто А.А. Инновационная система подготовки специалистов в области производства программного обеспечения в СПбГУ ИТМО	5
Гетманская Т.А., Гриншпун Д.М., Королев В.В., Стафеев С.К. Мониторинг профильного обучения: анализ спроса и предложения.....	12
2. ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА	20
Иванов Д.В., Козлов С.А. Спектральные аналоги уравнений Максвелла для диэлектрических сред с нерезонансной дисперсией и безынерционной кубичной нелинейностью	20
Волинский М.А., Гуров И.П., Потапов А.С. Исследование представлений изображений в оптической когерентной томографии с использованием информационного критерия	28
Савельева А.В., Мухина М.В., Орлова А.О., Маслов В.Г., Баранов А.В., Федоров А.В. Спектрально-люминесцентные проявления взаимодействия CdTe квантовых точек с ионами металлов в водном растворе.....	36
3. ЛАЗЕРНЫЕ И МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ	42
Евстрапов А.А., Тупик А.Н. Обработка поверхности стеклянных микрочипов после анализа биологических проб	42
Матыжонок В.Н., Петров А.А. Сравнение схем для лазерной вытяжки нанопипеток и нанозондов	48
Архипов Р.М., Егоров В.С., Чехонин И.А. Неадиабатические явления в оптоинформационных поляритонных лазерах	53
4. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	60
Золотаревич В.П., Югов Н.В. Расчет гидродинамических характеристик рабочего колеса радиально-осевой турбины РО-230	60
Тогатов В.В., Гнатюк П.А., Терновский Д.С. Теория сверхбыстрого включения МОП-транзисторов	68
5. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА	75
Михалев И.О., Исламов С.Р. Экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье	75
6. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	82
Голубок А.О., Ковров А.В., Левичев В.В., Мухин И.С., Приходько О.А. Формирование одиночных нановискеров на вершинах зондов сканирующего зондового микроскопа	82
7. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ..	88
Алиев Т.И., Никульский И.Е., Пяттаев В.О. Моделирование ядра мультисервисной сети с относительной приоритезацией неоднородного трафика	88
Лужков Ю.В., Тропченко А.Ю. Исследование метода сжатия изображений с потерями на основе адаптивного квантования.....	96
Перегудов А.Ф., Гласман К.Ф., Белозерцев А.В., Гриненко Е.Н. Оценка качества телевизионных материалов в системах вещания на мобильные терминалы	102
Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Одноранговая распределенная мультиагентная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности....	108
8. ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ.....	114
Строков Д.С., Соложенцев Е.Д. Критерии идентификации логико-вероятностных моделей кредитного риска по статистическим данным	114

1. NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION.....	5
V. Vasilev, V. Parfyonov, A Shalyto Innovative system of education specialists in software design sphere in St.P SU ITMO	5
T. Getmanskaya, D. Grinshpun, V. Korolyov, S. Stafeev Core training monitoring in senior high school: demand and supply analysis	12
2. PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS	20
D. Ivanov, S. Kozlov Spectral prototypes of Maxwell equations in dielectric medium with non-resonance dispersion and instantaneous cubical nonlinearity.....	20
M. Volynsky, I. Gurov, A. Potapov Investigation of image representations in optical coherent tomography using information criteria	28
A. Savelyeva, M. Mukhina, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov Photoluminescent manifestation of interaction between CdTe quantum dots and metal ions in water solution.....	36
3. LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES.....	42
A. Evstrapov, A. Tupik Surface cleaning of glass microchip after biological samples analysis.....	42
V. Matyzhonok, A. Petrov Comparison of plans for nanopipettes and nanoprobe laser drawing	48
R. Arkhipov, V. Egorov, I. Chekhonin Nonadiabatic phenomena in optoinformatic polariton lasers	53
4. UNITS AND DEVICES OF TECHNICAL SYSTEMS.....	60
V. Zolotarevich, N. Yugov Calculation of hydrodynamic characteristics of Francis turbine runner RO-230	60
V. Togatov, P. Gnatyuk, D. Ternovsky The theory of the MOSFET ultra fast switching	68
5. THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING	75
I. Mikhalyov, S. Islamov Experimental investigation of reversed process of brown coal bed gasification with air and oxygen blowing	75
6. MATERIALS SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES.....	82
A. Golubok, A. Kovrov, V. Levichev, I. Mukhin, O. Prihodko Single nanowhisker formation on the top of cantilever for scanning probe microscopy	82
7. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES.....	88
T. Aliev, I. Nikulsky, V. Pyattaev Modeling of multiservice network core with relative prioritization of non-homogeneous traffic	88
Y. Luzhkov, A. Tropchenko Research of lossy images compression method with application of adaptive quantization	96
A. Peregudov, K. Glasman, A. Belozertsev, E. Grinenko Quality assessment of broadcast television materials for mobile terminals	102
A. Masloboev, M. Shishaev An agent-based peer-to-peer distributed system for information support of innovations	108
8. ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT	114
D. Stokov, E. Solojentsev Identification criteria of credit risk models by statistical data..	114

УДК 681.31

ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СПбГУ ИТМО

В.Н. Васильев, В.Г. Парфенов, А.А. Шалыто

В 2008 г. СПбГУ ИТМО возглавил мировой рейтинг университетов, составленный по результатам выступлений университетов на студенческих командных чемпионатах мира по программированию за последние пять и десять лет. Университет ИТМО входит в число ведущих вузов мира, занимающихся подготовкой специалистов по производству программного обеспечения (ПО). Эти достижения во многом связаны с разработкой и внедрением в учебный процесс инновационной системы подготовки, основанной на сочетании проектного и соревновательного подходов. В статье рассмотрены научно-методические основы построения этой системы. Ее эффективность подтверждается очередной победой команды СПбГУ ИТМО на чемпионате мира по программированию ACM ICPC в 2009 г.

Ключевые слова: производство программного обеспечения, проектный подход, соревновательный подход, подготовка специалистов, чемпионат мира по программированию ACM ICPC.

Научно-методические основы построения системы подготовки высококвалифицированных специалистов в области производства программного обеспечения

В настоящее время перед Россией стоит задача интенсивного развития инновационного сектора экономики, связанного с высокими технологиями и, в частности, с информационными технологиями и программированием. В последние годы общепризнано, что именно здесь позиции России на мировом рынке высоких технологий являются наиболее сильными и перспективными. В России сфера производства программного обеспечения (ПО) стала лидером по темпам развития среди других направлений высоких технологий, а технологии производства ПО включены в состав важнейших критических технологий Российской Федерации.

Учитывая такие обстоятельства социального развития России, как демографический кризис, с одной стороны, и рост среднего уровня заработной платы в стране, с другой стороны, приходится констатировать, что в области решения «простых» задач Россия становится неконкурентоспособной по сравнению с Индией и Китаем. Поэтому российская «ставка» на мировом рынке производства ПО – это выполнение сложных проектов с использованием высококвалифицированных специалистов, развитие и доведение инновационных идей до коммерческого использования, а также проведение научно-исследовательских работ. Таким образом, для нашей страны особую ценность представляют наиболее талантливые специалисты, способные стать лидерами проектов и научно-исследовательских работ по разработке ПО в качестве руководителей и «генераторов идей». Это тем более важно потому, что программирование в последние годы превратилось в индустрию, а разработка ПО – в производство, которое неразрывно связано с процессом его проектирования.

Охарактеризуем условия, в которых сегодня готовятся такие специалисты.

Сложный социально-экономический кризис, пережитый нашей страной, вывел из индустрии разработки ПО, как и из многих других областей высоких технологий, целое поколение «сорокалетних», которые закончили вузы в конце восьмидесятых – начале девяностых годов. Аналогичный, но еще более острый характер, имеют кадровые про-

блемы в области научных исследований. В результате нарушилась цепочка преемственности в подготовке кадров: сегодняшние молодые люди, приходящие в индустрию разработки ПО, практически лишены возможности опереться на реальный производственный опыт старших коллег.

Во всех развитых странах, в том числе в России, констатируются такие социально-психологические процессы, как общее падение интереса молодежи к занятиям точными науками, сильный отток в промышленность наиболее активных и способных университетских преподавателей, негативное воздействие на молодежь клиповой и Интернет-культур, компьютерных игр, телевидения и т.д., приводящее к сдвигам в психике молодых людей, препятствующим их долговременной сосредоточенной умственной деятельности (так называемый синдром перманентного частичного внимания), и общее уменьшение настроения молодежи на напряженный труд. В российских условиях эти процессы в сочетании с отмеченным выше демографическим спадом резко снижают стремление молодых специалистов к затрате усилий для повышения своей квалификации.

В области производства ПО огромную роль играет возрастной фактор. Программирование – это занятие для очень молодых. Опыт показывает, что изучение ряда фундаментальных курсов теоретической информатики и программирования надо начинать еще в школьные годы, и подчас даже в весьма молодом, по общепринятым стандартам, возрасте весьма трудно наверстать упущенное в школе, так как с годами резко падает способность к обучению программированию. Молодой человек даже в двадцать с небольшим лет может оказаться слишком «старым» для начала целевой программистской подготовки. С другой стороны, в силу чрезвычайно высокой скорости развития информационных технологий в области производства ПО срок, за который разработчик может стать руководителем проекта, существенно сократился по сравнению с традиционными инженерными отраслями. Можно привести много примеров, когда спустя всего два–три года после окончания вуза молодые специалисты становились руководителями технических и технологических направлений компаний на позициях не только руководителей проектов, но и технических директоров.

Как показывает практика, малоэффективной является и переподготовка для работы в области производства ПО даже недавних выпускников вузов, окончивших математические или физические специальности, которые не получили интенсивной программистской подготовки в студенческие годы. Такая переподготовка была возможна в семидесятых – начале восьмидесятых годов. Однако за последние десятилетия технологии производства ПО (software engineering) получили огромное развитие как самостоятельное инженерное и научное направление, включающее большое число специальных дисциплин и технологических компетенций, предусмотренных соответствующими международными стандартами. Знания, умения и навыки, полученные в двух–трех последних классах средней школы и на первых трех–четырех курсах вузов при изучении фундаментальных дисциплин в области теоретической информатики и технологий программирования, играют огромную (если не решающую) роль в становлении высококвалифицированных разработчиков и исследователей.

Некоторые из указанных факторов лежат вне сферы образования, однако, несмотря на это, в работу образовательных учреждений должны быть внесены изменения, которые позволят (хотя бы частично) компенсировать негативное влияние внешних условий. В связи с изложенным весьма актуальным является построение системы «школа – вуз – научные исследования – индустрия», обеспечивающей поиск, профориентацию, отбор, дополнительное обучение, предпрофессиональную и профессиональную подготовку (включая обучение в аспирантуре и докторантуре) высококвалифицированных специалистов в области производства ПО, которые смогут выполнять функции разра-

ботчиков, исследователей и руководителей широкого круга научно-технических, научно-исследовательских и инновационных проектов.

Такая система должна использовать учебно-методические, технологические и организационные подходы, позволяющие нейтрализовать указанные выше негативные социально-психологические и демографические процессы, т.е. отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать максимальную стандартизацию, формализацию, автоматизацию и унификацию соответствующих процедур, позволяющих сократить потребность в высококвалифицированных педагогических кадрах, что особенно важно в связи с их сильным дефицитом;
- реализовывать современные формы самостоятельной работы студентов, которые «позволят молодым людям научиться учиться» [1] и будут использоваться наряду с традиционными формами, поскольку самостоятельная работа чрезвычайно важна при подготовке специалистов в области производства ПО. Эти формы должны отвечать психологическому настрою современного молодого человека на применение в учебном процессе сетевых технологий;
- поддерживать активность учащихся в ходе образовательного процесса, обеспечивая эффективное взаимодействие не только преподавателя с учащимися, но и учащихся между собой;
- готовить учащихся к инновационной и научной деятельности в условиях сильной конкуренции, характерной для современного мирового рынка разработок и научных исследований в области информационных технологий.

При разработке указанной системы авторами в качестве базовых совместно использовались и развивались два подхода – проектный и соревновательный, обеспечивающие выполнение приведенных требований.

Преимущества *проектного подхода* при организации обучения хорошо известны. Как отмечается в работе [1], «... практика работы в проектом подходе позволит выявить и передать современные способы организации мыслительной работы человека, что и является современным содержанием образования». Важность использования проектного подхода при подготовке высококвалифицированных специалистов в области производства ПО определяется также и тем обстоятельством, что если разработка ПО может выполняться без его проектирования, то производство ПО без проектирования невозможно. Однако наши исследования позволили выявить специфику проектного подхода в этом случае.

- При реализации проектного подхода при подготовке специалистов в области производства ПО не удастся использовать методики проектного обучения, применяемые в классических инженерных областях, где общий цикл подготовки высококвалифицированного специалиста составляет не менее десяти–пятнадцати лет. В рассматриваемой области этот цикл составляет шесть–восемь лет, за который используемые технологии обычно изменяются.
- Применение проектного подхода особенно актуально при обучении школьников, так как в противном случае молодой разработчик впервые сталкивается с жесткими требованиями обязательного ведения проектной документации только в начале своей трудовой деятельности в «зрелом» для программиста возрасте. При этом весьма часто возникают острые конфликтные ситуации с заказчиками и коллегами, а времени для перестройки взглядов на процесс создания ПО и дополнительного обучения непосредственно в ходе трудовой деятельности практически не остается.
- Раннее обучение молодых людей выполнению проектов представляется в настоящее время тем более актуальным, что упомянутый выше синдром частичного пер-

манентного внимания находится в противоречии с характером и духом требований к качественным программным проектам.

- При реализации проектного подхода к подготовке специалистов в области производства ПО возникают трудности, связанные с необходимостью воспроизведения в учебном процессе реального процесса создания ПО, включающего такие этапы, как формирование архитектуры, кодирование, тестирование и документирование, а также элементов научно-исследовательской работы. Полная и качественная реализация этих этапов ограничивается выделяемым на учебные проекты временем и трудностями привлечения к учебному процессу высококвалифицированных специалистов, имеющих опыт практической работы. Задача еще более усложняется, если принять во внимание наличие большого числа подходов к организации процесса создания ПО, парадигм программирования, инструментальных средств и т.д. Кроме того, необходимо обеспечить адаптацию реальных процессов создания ПО, имеющих место в различных компаниях, к уровню учащихся, начиная от школьников старших классов и кончая студентами старших курсов вузов.

Опыт работы кафедр компьютерных технологий и технологий программирования СПбГУ ИТМО позволил сделать вывод о том, что указанной специфике отвечает учебный процесс, основанный на проектном подходе с применением *автоматного программирования* [2–4]. Применение автоматного подхода позволяет студентам сконцентрироваться на проектировании программ, а не на их реализации. Отметим, что при традиционном обучении за время, отведенное на реализацию курсовой работы, студенты успевают только написать код и, изредка, фрагменты документации. В описываемом подходе основное время уходит на проектирование, что позволяет студентам получить необходимые навыки в этой области, обеспечивает высокое качество работ и позволяет применять полученные результаты и другим людям.

Проектный подход воспитывает у учащихся аккуратность, умение доводить начатое дело до конца, самостоятельно мыслить, работать в коллективе, грамотно писать и правильно оформлять проектную документацию, дает возможность реализовывать различные формы самостоятельной работы студентов [5]. В настоящее время проектный подход внедряется в школы [6].

Вторым эффективным средством для решения указанных выше проблем стал *соревновательный подход*, суть которого состоит во введении элементов коллективных и индивидуальных интеллектуальных соревнований в учебный процесс, причем не только в форме предметных олимпиад. Охарактеризуем преимущества такого подхода для подготовки разработчиков ПО.

Практика последних пятнадцати лет показала, что одним из наиболее результативных средств мотивации молодых людей на построение карьеры в области разработки ПО, которое доказало свою работоспособность даже в экстремальных политико-экономических условиях 1990-х г.г., является проведение олимпиад по информатике и программированию. Широкое распространение в России олимпиад по этим предметам позволяет одновременно решать задачи профориентации, поиска, отбора и подготовки школьников и студентов, а также ряд важных методических и организационных вопросов. На базе подготовки к олимпиадам в школах [7] и вузах [8] под руководством наиболее квалифицированных преподавателей формируются коллективы способных, увлеченных и трудолюбивых студентов и школьников, ориентированных на выстраивание серьезной профессиональной карьеры в области информационных технологий.

Во многом благодаря объединяющей и организующей роли олимпиад в вузах, средних школах и учреждениях дополнительного образования возникают неформальные сообщества преподавателей и учащихся, интересующихся фундаментальными и прикладными вопросами в области компьютерных технологий. Регулярно проводятся

семинары и тренировочные занятия, ведутся отбор и большая подготовительная работа. Участие в тренировках и соревнованиях (особенно индивидуальных) – одна из наиболее эффективных современных форм самостоятельной работы учащихся.

Соревновательный подход воспитывает у учащихся способность работать в условиях конкуренции и дефицита времени, дисциплинированность, умение общаться и работать в коллективе (при проведении получивших широкое распространение командных олимпиад), проявлять инициативу и брать ответственность на себя, быстро ориентироваться в новой предметной области и быстро решать возникающие в ней задачи. Отметим, что именно эти качества, которые не могут быть развиты за счет других видов занятий, часто становятся определяющими при приеме на работу в таких компании, как Google и Microsoft, которые добились выдающихся результатов в индустрии разработки ПО.

Сочетание соревновательного и проектного подходов формирует у обучающихся дополняющие друг друга наборы качеств, необходимых высококвалифицированным специалистам в области производства ПО. Их совокупность образует оптимальный набор качеств, позволяющих специалистам, обладающим ими, эффективно выполнять инновационные программные проекты.

Авторы настоящей статьи совместно с Г.А. Корнеевым и М.А. Казаковым отмечены премией Правительства РФ 2008 г. в области образования за научно-практическую и методическую разработку «Инновационная система поиска и подготовки высококвалифицированных специалистов в области производства программного обеспечения на основе проектного и соревновательного подходов» для образовательных учреждений высшего профессионального образования [9].

Победы студентов СПбГУ ИТМО в чемпионатах мира по программированию – один из показателей эффективности системы подготовки одаренных программистов

Созданная авторами инновационная система поиска и подготовки высококвалифицированных специалистов ПО ярко продемонстрировала свою эффективность в ходе участия команд студентов СПбГУ ИТМО в чемпионатах по программированию самого высокого уровня. Студенты университета ИТМО шесть раз выигрывали полуфинальные соревнования чемпионата мира по программированию ACM ICPC, причем в 1995 г. первыми из российских вузов пробившись в финал чемпионата, пять раз (в 1996, 2001, 2003, 2004 и 2007 г.г.) становились чемпионами России по программированию, а в 2000, 2005 и 2006 г.г. – вице-чемпионами. В течение двенадцати лет, начиная с 1995 г., студенты университета ИТМО неизменно выходили в финал чемпионата мира, где в 2000 г. завоевали серебряные медали, в 1999, 2001, 2003, 2005 и 2007 г.г. – золотые, а в 2004 г. стали абсолютными чемпионами мира и Европы по программированию. При этом необходимо отметить, что эти результаты достигнуты не одной, а семью различными командами университета по три студента в каждой.

Эти достижения были в очередной раз подтверждены результатами участия студентов СПбГУ ИТМО в финале студенческого командного чемпионата мира по программированию ACM ICPC 2009 года (Стокгольм, 21 апреля 2009 г.). На этих соревнованиях, как и в 2008 г., команда СПбГУ ИТМО в составе Максима Буздалова, Евгения Капуна и Владислава Исенбаева получила золотые медали и стала абсолютным чемпионом мира и Европы 2009 года (фото 1). Команда решила девять из 11 задач со штрафным временем 1381 минута. Как и все последние годы, тренером команды являлся доцент кафедры компьютерных технологий А.С. Станкевич, а руководителем команды – декан факультета информационных технологий и программирования В.Г. Парфенов.



Фото 1. Команда СПбГУ ИТМО, крайние слева и справа – организаторы соревнований.
Слева направо: Андрей Станкевич, Максим Буздалов, Евгений Капун, Владислав Исенбаев



Фото 2. Лауреаты премии DeBlasi Award и организаторы ACM ICPC (крайние слева и справа). В середине: В.Г. Парфенов, Р.А. Елизаров и В.Н. Васильев

Команда СПбГУ ИТМО стала чемпионом мира в третий раз (2004, 2008 и 2009 г.г.), догнав по этому показателю Стэнфордский университет, который трижды становился чемпионом мира по программированию. Отметим, что три из четырех золотых медалей в финале чемпионата 2009 г. завоевали российские команды. Еще никогда наши команды не занимали на одном чемпионате мира первое, третье и четвертое места. Кроме того, еще одна российская команда выиграла серебряные медали, заняв восьмое место. К успехам российских команд общественность начинает привыкать, но каждый год российские молодые программисты достигают все лучших результатов. Практически нет других видов человеческой деятельности, где у России были бы такие успехи! При этом необходимо учесть, что на стадии отборочных соревнований в чемпионате участвовало 7109 команд из 1838 университетов 88 стран мира, а в финале – 100 команд. Решением оргкомитета ACM ICPC ежегодная премия DeBlasi Award 2009 года за большой вклад в развитие соревнований ICPC вручена СПбГУ ИТМО: ректору, профессору В.Н. Васильеву, директору NEERC, профессору В.Г. Парфенову и председателю жюри NEERC Р.А. Елизарову (фото 2).

Заключение

Таким образом, в СПбГУ ИТМО создана и успешно развивается инновационная система поиска и подготовки высококвалифицированных специалистов в области разработки ПО, авторы которой были удостоены Премии Правительства РФ 2008 г. в области образования. В результате применения системы на базе СПбГУ ИТМО сформировался получивший международное признание центр подготовки одаренных программистов, эффективность которого регулярно подтверждается победами студентов СПбГУ ИТМО в чемпионатах мира по программированию.

Литература

1. Волков А., Ливанов Д., Фурсенко А. Высшее образование: повестка 2008–2016 // Эксперт. – 2007. – № 32. – С. 42–47.
2. Поликарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009. – 176 с.
3. Васильев В.Н., Казаков М.А., Корнеев Г.А., Парфенов В.Г., Шалыто А.А. Применение проектного подхода на основе автоматного программирования при подготовке разработчиков программного обеспечения // Труды Первого Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 98–100.
4. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПб: Наука, 1998. – 628 с.
5. Шалыто А.А. Трехединая задача одного педагогического эксперимента в области ИТ-образования // Инженерное образование. – 2007. – № 4. – С. 208–213.
6. Автоматное программирование в школе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://is.ifmo.ru/automata_school/, свободный.
7. Девятая Всероссийская олимпиада школьников по информатике и программированию / Под ред. В.Н. Васильева, В.Г. Парфенова и А.С. Станкевича. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 204 с.
8. Командный чемпионат мира по программированию ACM 2007/2008. Северо-Восточный европейский регион / Под ред. В.Н. Васильева и В.Г. Парфенова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 242 с.

9. Васильев В.Н., Казаков М.А., Корнеев Г.А., Парфенов В.Г., Шалыто А.А. Инновационная система поиска и подготовки высококвалифицированных разработчиков программного обеспечения на основе проектного и соревновательных подходов // Труды Первого Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 84–97.

<i>Васильев Владимир Николаевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ректор, доктор технических наук, профессор, vasilev@mail.ifmo.ru
<i>Парфенов Владимир Глебович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, parfenov@mail.ifmo.ru
<i>Шалыто Анатолий Абрамович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, shalyto@mail.ifmo.ru

УДК 37.014.5

МОНИТОРИНГ ПРОФИЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ: АНАЛИЗ СПРОСА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Т.А. Гетманская, Д.М. Гриншпун, В.В. Королев, С.К. Стафеев

В статье определена цель мониторинга и гипотеза исследования, обоснована его актуальность, описана его организация, методы сбора, математической обработки и представления данных, приведены результаты, на основании которых сделаны выводы.

Ключевые слова: мониторинг, профильное обучение школьников, старшая школа, потребности школьников, потребности рынка труда в специалистах.

Введение

Целью представленной работы является выявление степени соответствия системы профильного обучения требованиям учеников школ и их родителей, образовательных учреждений профессионального образования, а также работодателей. Метод достижения обозначенной цели – мониторинг профильного обучения, позволяющий дать соответствующую комплексную оценку и охватывающий сбор данных о системе профильного обучения, их критериальную оценку с последующим анализом и формированием выводов о состоянии системы, ее соответствии ожиданиям потребителей, требованиям образовательного учреждения профессионального образования к выпускникам школ, потребностям рынка труда (значение критериев рассчитывается для каждого профиля). Старшая же школа рассматривается как этап предпрофессионального образования (рис. 1).

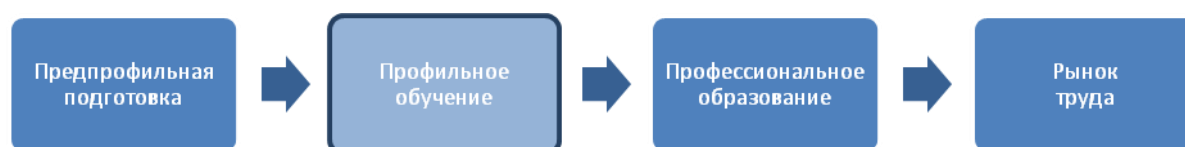


Рис. 1. Образовательные этапы

Актуальность исследования определена тенденцией раннего профессионального самоопределения подростков, что имеет как положительные, так и отрицательные стороны, сбалансировать которые можно обеспечением преемственности образовательных

этапов – предпрофессионального и профессионального. При этом под предпрофессиональным понимается профильное обучение (ПО)¹ в старших классах и предпрофильная подготовка (ППП)² на уровне общего среднего образования.

Исходя из этого, предметом исследования являются:

- ПО как этап образовательного процесса;
- целостность образовательного процесса ППП–ПО–профессиональное самоопределение;
- направленность ПО на профессиональное образование и потребности рынка труда.

Примененные методы мониторинга: кабинетные – обзор публикаций в средствах массовой информации (в том числе в сети Интернет), а также справочных данных; полевые – анкетирование целевых групп; экспертные – для анализа полученных результатов [2]. В качестве целевых групп респондентов определены: учащиеся ППП (9-х классов), определяющие потенциальный спрос на профильное обучение; родители учащихся 9-х классов, определяющие действительный спрос; учащиеся ПО (10-х и 11-х классов), оценивающие степень реализации их ожиданий от профильного обучения и определяющие планы дальнейшего профессионального образования; родители учащихся 10-х и 11-х классов; учителя профильных классов, определяющие педагогическую и ресурсную готовность школ к развитию профильного образования.

Проведение мониторинга включило пять последовательных этапов: разработка показателей и методики их анализа, сбор данных, их математическая обработка, представление полученных результатов, их сопоставительный анализ.

Опробование мониторинга профильного образования в Северо-Западном регионе

В октябре–ноябре 2008 г. проведено опробование методики мониторинга в трех субъектах РФ – Санкт-Петербурге, Ленинградской и Новгородской областях. В анкетировании участвовало около 20 000 человек. Ниже представлены основные результаты.

Потенциальный спрос (рис. 2) – относительное количество школьников 9-х классов, определяющих для себя приоритетные профили будущего обучения. График показывает, что максимальный интерес для школьников представляют информационно-технологический, физико-математический, гуманитарный профили; минимальный – естественнонаучный и индустриально-технологический; при этом спрос на наиболее и наименее востребованные профили отличается почти в девять раз.

Если выбор универсального профиля расценивать как неготовность к выбору профиля, то 90,2% опрошенных девятиклассников определились в направленности дальнейшего обучения, т.е. профильное самоопределение ими выполнено.

Действительный спрос – относительное количество родителей школьников 9-х классов, определяющих для своих детей приоритетные направления будущего обучения. Распределение значений по профилям (рис. 2) демонстрирует, что наиболее востребованы родителями универсальный, гуманитарный и физико-математический профили; наименее востребованы – оборонно-спортивный и художественно-эстетический.

¹ Профильное обучение – это система специализированной подготовки в старших классах общеобразовательной школы, ориентированной на индивидуализацию обучения и социализацию обучающихся, в том числе с учетом реальных потребностей рынка труда, <...> отработки гибкой системы профилей и кооперации старшей ступени школы с учреждениями начального, среднего и высшего профессионального образования [1].

² Под предпрофильной подготовкой понимается этап образования, нацеленный на подготовку школьников к осознанному выбору профиля для дальнейшего обучения, т.е. на осуществление первичного профильного самоопределения.

Опрос родителей показывает их консерватизм в отношении к дифференциации обучения: более половины опрошенных остановили свой выбор на «традиционных» направлениях – общеобразовательное (универсальный профиль), гимназическое (гуманитарный профиль), лицейское (физико-математический профиль).

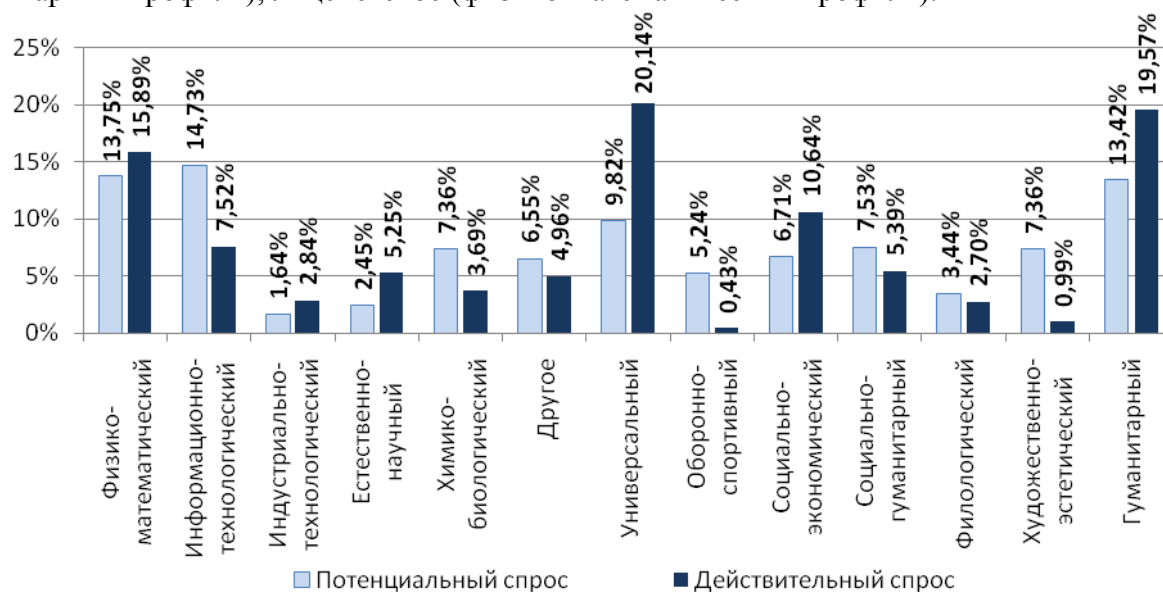


Рис. 2. Соотношение потенциального спроса (интересов детей) и действительного спроса (предпочтений родителей)

Сопоставляя значения потенциального и действительного спроса, можно увидеть, что последний существенно менее определен, чем потенциальный; существуют значительные разногласия между мнениями родителей и детей; совпадения наблюдаются по филологическому и физико-математическому профилям. Можно предположить, что одной из причин расхождения мнений является больший прагматизм родителей.

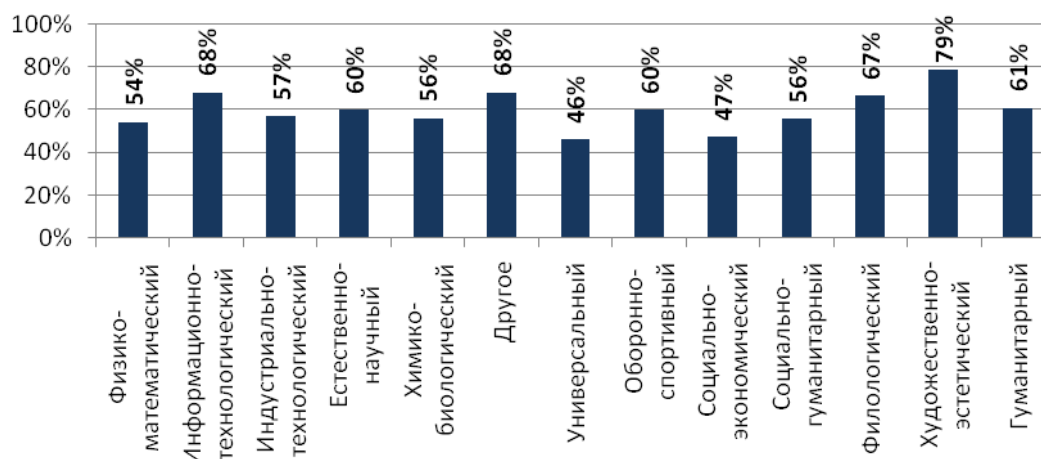


Рис. 3. Степень мотивированности выбора профильного направления

Значения критерия «Мотивированность спроса» (рис. 3) показывают наибольшую мотивированность школьников, выбравших художественно-эстетический профиль, наименьшую – универсальный, выше среднего – информационно-технологический и филологический. Оценка по этому критерию неоднозначна: 60% девятиклассников готовы сменить школу ради желаемого профиля, что подтверждает актуальность личностно-ориентированного подхода, в то же время 40% готовы изменить выбор профиля, чтобы не менять школу.

Педагогическая готовность (рис. 4) – относительное количество учителей, считающих целесообразным развитие профильного обучения в своей школе и оценивающих педагогическую и техническую готовность школы к нему более чем на 70%. Полученные значения демонстрируют наибольшую заинтересованность и готовность школ к внедрению информационно-технологического профиля; наименьшую – к внедрению индустриально-технологического и химико-биологического профилей; высокая готовность проявлена к реализации филологического и гуманитарного профилей. Причиной преобладания информационно-технологического профиля, возможно, является результат государственной программы «Информатизация образования».

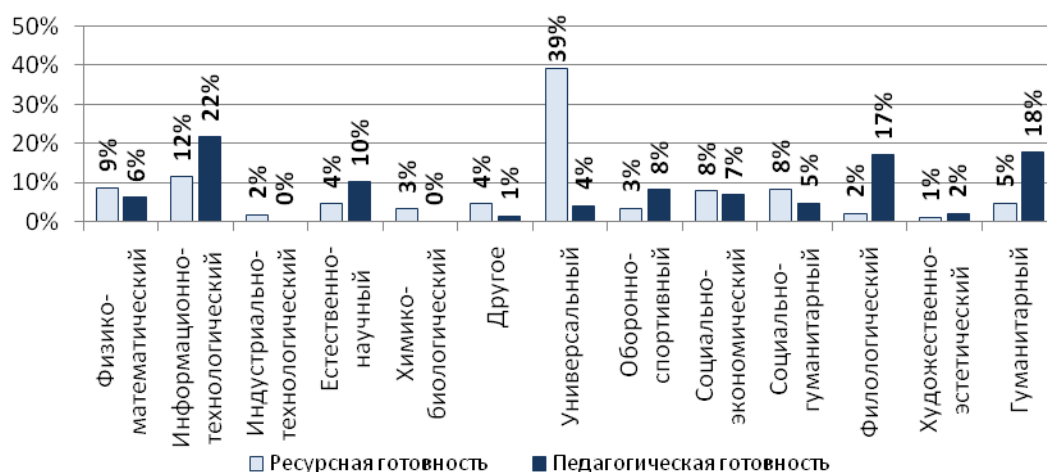


Рис. 4. Соотношение педагогической и ресурсной готовности

Ресурсная готовность – относительное количество классов, обучающихся по профильным направлениям (распределение объемов реализуемых направлений профильного образования). Полученные значения (рис. 4) демонстрируют преобладание универсального профиля, что может объясняться близостью к нему программ старшей общеобразовательной школы (без углубленного изучения отдельных предметов) при наименьшей реализации художественно-эстетического профиля.

Объемная удовлетворенность спроса – сопоставление характеристик потенциального спроса, действительного спроса и ресурсной готовности (рис. 5).

График демонстрирует, что объем реализации универсального профиля в четыре раза превышает потенциальный спрос, в то время как объем реализации художественно-эстетического, филологического, оборонно-спортивного, физико-математического, информационно-технологического, гуманитарного, химико-биологического профилей существенно меньше потенциального спроса. Универсальный же профиль выбрали только 10% школьников при предложении в 39%. Возможно, в такой ситуации обучающиеся по этому профилю выбрали направление, не реализуемое своей школой, но не смогли поменять учебное заведение.

Наибольшие значения педагогической готовности соответствуют профилям, у которых спрос превышает ресурсную готовность. Таким образом, можно сделать вывод, что учителя считают целесообразным внедрение профилей, спрос на которые превышает предложение, если школа технически готова к его обеспечению.

Качество ППП – относительное количество десяти- и девятиклассников, удовлетворенных качеством предпрофильной подготовки, проводившейся с ними в средней школе (рис. 6). График демонстрирует наибольшую удовлетворенность качеством ППП, соответствующую гуманитарному профилю, наименьшую – индустриально-технологическому и естественнонаучному; при этом гуманитарный, физико-математический, универсальный и

информационно-технологический профили преобладают в распределении относительного количества десяти- и девятиклассников, удовлетворенных качеством ППП.

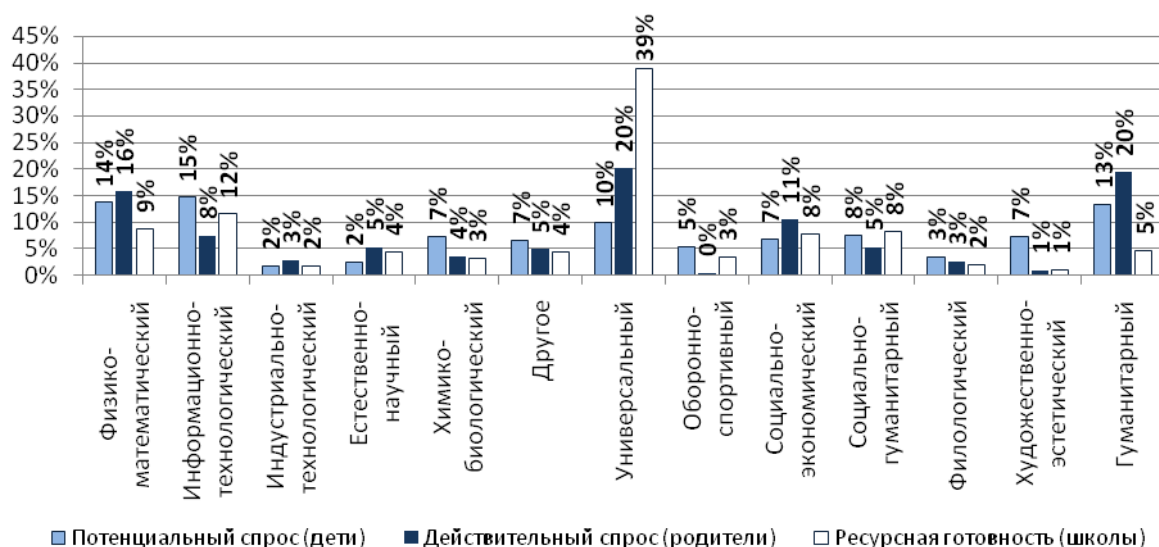


Рис. 5. Соответствие ресурсной готовности спросу

72% школьников, удовлетворенных качеством ППП, обучается (собирается обучаться) по гуманитарному, физико-математическому, информационно-технологическому или универсальному профилю. Вероятнее всего, при этом сказался опыт школ, реализовавших до внедрения профильного обучения углубленные программы технической и гуманитарной направленности, а государственные программы по компьютеризации школ и ИТ-подготовке учителей обеспечили ресурсными возможностями организацию ППП по информационно-технологическому направлению.

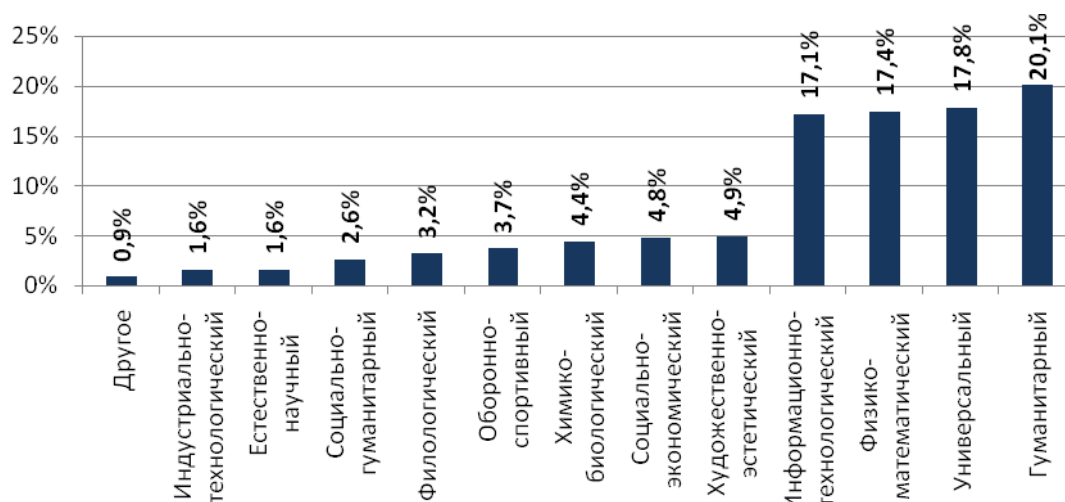


Рис. 6. Удовлетворенность потребителей качеством ППП

Объемная характеристика ППП – относительное количество девяти-, десяти- и одиннадцатиклассников, с которыми проводится (проводилась) предпрофильная подготовка, т.е. характеристика степени распространенности ППП в школах. 72% опрошенных школьников ответили, что проходили этот курс.

Профориентационная работа – относительное количество девяти-, десяти- и одиннадцатиклассников, с которыми проводится (проводилась) профориентационная

работа, т.е. характеристика объема проводимой работы (66%) по профессиональной ориентации.

Готовность несения материальных затрат на профессиональное образование – относительное количество старшеклассников, готовых получить профессиональное образование на контрактной основе (рис. 7). График демонстрирует, что 36% учащихся профильных классов готовы к обучению на контрактной основе; большинство из них обучается на гуманитарном профиле. Таким образом, профильные и профессиональные намерения опрошенных девяти-, десяти- и одиннадцатиклассников достаточно высоки.

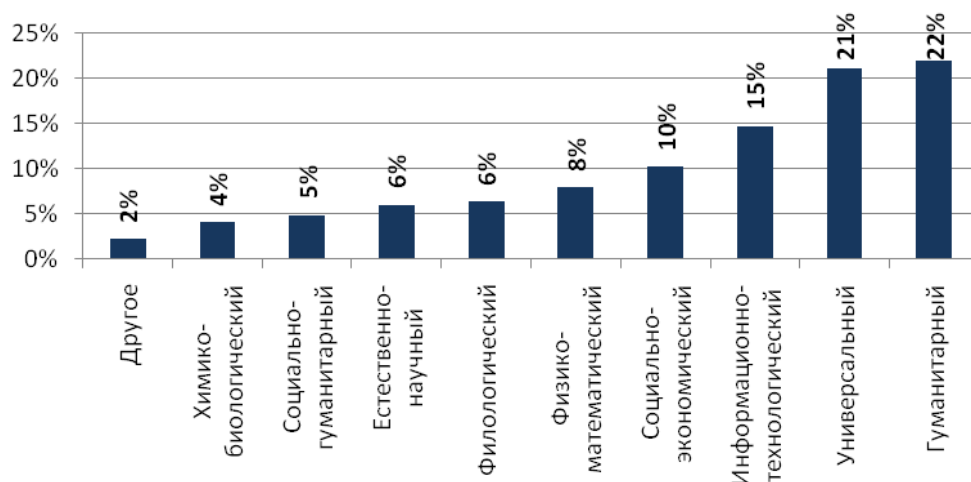


Рис. 7. Готовность финансировать профессиональное образование

Прямая преемственность (рис. 8) – относительное количество десяти- и одиннадцатиклассников, намеревающихся получить профессиональное образование в прямом соответствии с выбранным профилем в старшей школе. График показывает, что наибольшее соответствие проявляется в физико-математическом профиле, наименьшее же – в филологическом.

Амбициозность планируемой профессиональной подготовки (рис. 9) – относительное количество обучающихся по профильным направлениям, намеревающихся получить профессиональное образование. График демонстрирует намерение 91% обучающихся по профильным направлениям продолжать обучение для получения высшего профессионального образования.

Результаты анкетирования показывают слабую ориентацию большинства старшеклассников в профессиях и их востребованности, одним из наиболее важных факторов выбора они указывают финансовый, половина же школьников намерена получить профессиональное образование в прямом соответствии с профилем общего образования. По-видимому, можно говорить, что основные усилия профориентационной работы должны не только опираться на сложившиеся склонности и интересы школьника, но и формировать их, а также быть направлены на обеспечение преемственности в направлении следующего уровня образования и помощь в выборе соответствующего ОУ.

Профессиональная направленность – соответствие распределения объемов обучения по профильным направлениям потребностям рынка труда. График (рис. 10) демонстрирует выявленное несоответствие.

Данные о востребованности направлений на рынке труда получены на основе анализа Интернет-ресурсов, содержащих информацию о вакансиях. Представленные на рынке труда профессии сгруппированы и собраны данные о востребованности групп; сгруппированы также специальности высшего и среднего профессионального образования; экспертным методом установлено соответствие этих групп и рассчитана их вос-

требованность. Аналогично установлено соответствие профилей группам специальностей и рассчитана востребованность профильных направлений.

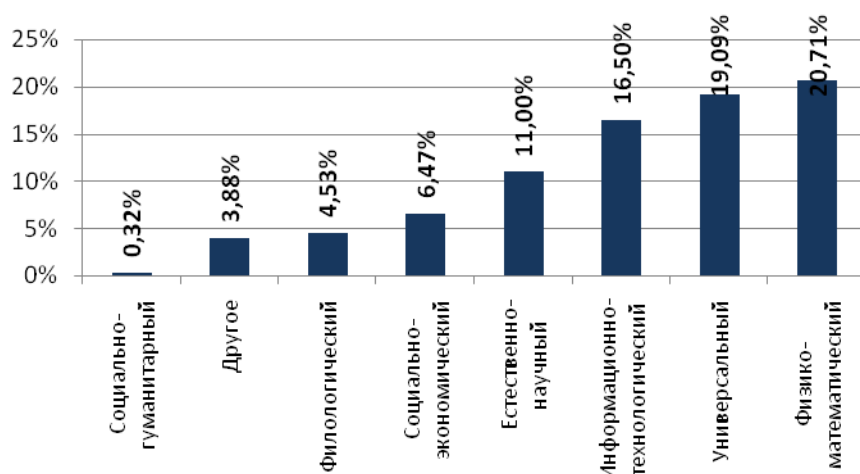


Рис. 8. Намерение получить профессиональное образование в прямом соответствии с профилем общего образования

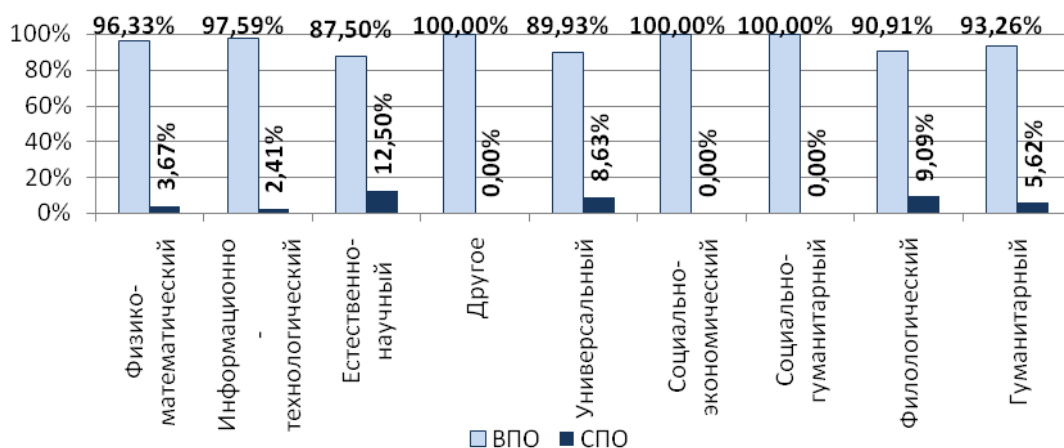


Рис. 9. Распределение образовательных уровней, желательных для старшеклассников, по профильным направлениям

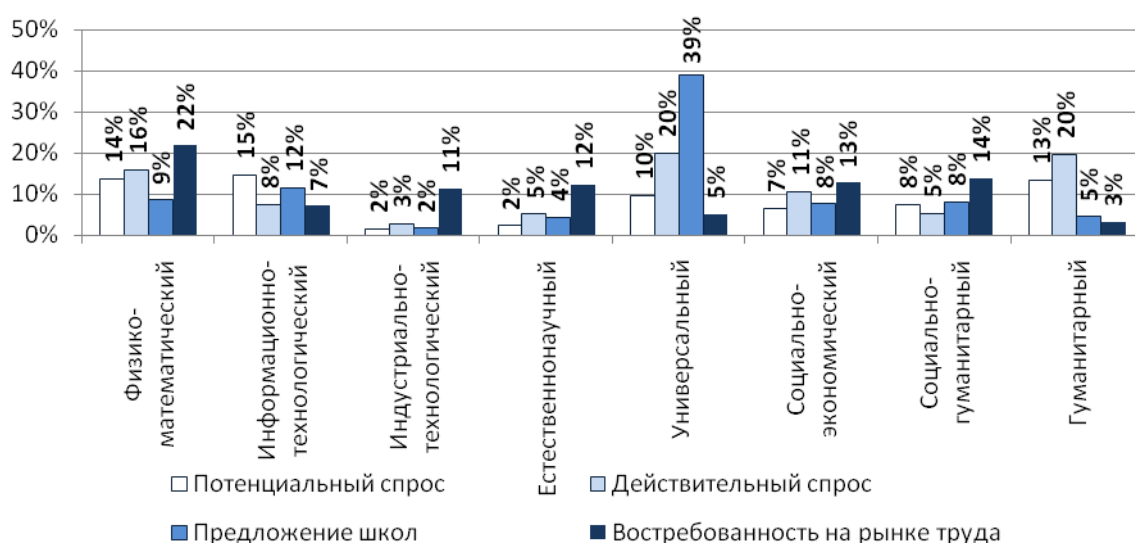


Рис. 10. Соответствие распределения объемов обучения по профильным направлениям потребностям рынка труда и потребностям региона

Готовность к поэтапному образованию (рис. 11) – относительное количество старшеклассников, готовых получать профессиональное образование поэтапно. При среднем значении 30% наибольшую готовность проявили старшеклассники, обучающиеся по естественнонаучному профилю; наименьшую – по физико-математическому и гуманитарному.

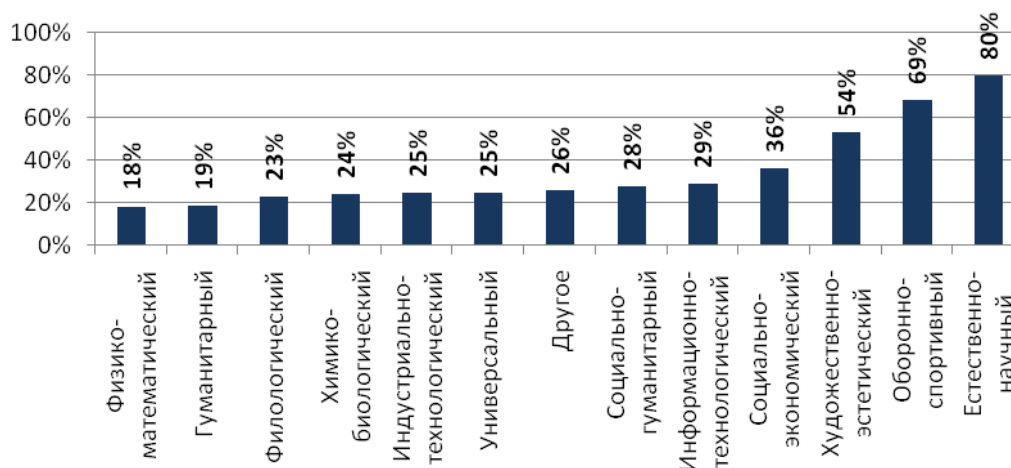


Рис. 11. Готовность старшеклассников к реализации программы непрерывного поэтапного профессионального образования

Выводы

Результаты мониторинга показывают перспективу реализации основной идеи обновления старшей ступени общего образования: образование должно стать более индивидуализированным, функциональным и эффективным.

Литература

1. Приказ Министерства образования Российской Федерации «Об утверждении концепции профильного обучения на старшей ступени общего образования» от 18 июля 2002 г. № 2783.
2. Мониторинг системы образования: Учеб.-метод. комплект. – Саратов, 2002. – С. 2.

Гетманская Татьяна Александровна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, педагог-организатор, firefly.tg@gmail.com

Гриншпун Дмитрий Михайлович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, декан, dgr1@yandex.ru

Королев Владимир Владимирович

– Негосударственное образовательное учреждение «СЕГРИС-ИИТ», зам. генерального директора, vvkorolyov@gmail.com

Стафеев Сергей Константинович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, stafeev@phd.ifmo.ru

УДК 535.135

СПЕКТРАЛЬНЫЕ АНАЛОГИ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД С НЕРЕЗОНАНСНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И БЕЗЫНЕРЦИОННОЙ КУБИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Д.В. Иванов, С.А. Козлов

Из уравнений динамики электромагнитных полей Максвелла выведена система уравнений, описывающая эволюцию сверхшироких пространственно-временных спектров световых волн в однородных изотропных диэлектрических средах с произвольной спектральной зависимостью линейного показателя преломления и безынерционной кубичной нелинейностью. Приведено аналитическое итерационное решение полученной нелинейной системы уравнений. Решения линеаризованных уравнений иллюстрированы результатами численного моделирования распространения непараксиального фемтосекундного волнового пакета из малого числа оптических колебаний в кварцевом стекле.

Ключевые слова: непараксиальность, фемтосекундный импульс, пространственно-временной спектр, кубичная нелинейность, сверхширокий спектр, итерационное решение, ближний ИК диапазон, оптическое стекло, дисперсионное уширение, дифракционное уширение.

Введение

В последние полтора десятилетия стремительно развивалась техника фемтосекундных лазеров и лазерных систем [1]. На сегодняшний день уже во многих лабораториях имеются лазеры, генерирующие световые импульсы, которые состоят всего из нескольких колебаний электромагнитного поля [2, 3]. Временной спектр таких импульсов очень широк. Пространственный спектр этих предельно коротких волновых пакетов также может быть сверхшироким, например, при поперечном сжатии высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов видимого и ближнего ИК диапазона в процессе самофокусировки [4] или для широкополосных импульсов дальнего ИК диапазона из-за малых размеров источника излучения [5].

При теоретическом анализе распространения световых волн со сверхширокими временными и пространственными спектрами удобно использовать уравнения динамики не электромагнитных полей, а их спектров [1, 6]. Спектральные уравнения обычно получают, преобразуя волновые уравнения [7, 8]. В настоящей работе уравнения эволюции спектров выведены из исходных основных уравнений классической оптики – уравнений Максвелла. Решения этих уравнений проиллюстрированы дифракцией световой волны из малого числа колебаний и с исходными поперечными размерами, соизмеримыми с центральной длиной волны излучения в оптическом стекле.

Преобразование уравнений динамики электромагнитных полей Максвелла в уравнения эволюции их спектров

Лежащие в основе всей классической оптики уравнения Максвелла, записанные в системе единиц СГСЭ, имеют вид [9]

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \nabla \vec{D} = 4\pi \vec{r}, \\ \nabla \vec{B} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\vec{E}$ – напряженность электрического поля светового излучения, $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля; $\vec{D}$ – электрическая индукция, $\vec{B}$ – магнитная индукция, $\vec{j}$ – плотность электрического тока, ρ – плотность стороннего электрического заряда, t – время; c – скорость света в вакууме. В настоящей работе ограничимся рассмотрением частного, но распространенного на практике случая распространения света в диэлектрических средах, в которых отсутствуют сторонние заряды ($\rho = 0$) и токи ($\vec{j} = 0$).

Будем полагать, что в среде существует выделенное направление z , вдоль которого распространяется излучение (вдоль оси z); направления x и y поперечны ему. Выделенность направления распространения световых пучков формализуется условиями

$$\underset{\substack{x \rightarrow \pm\infty \\ y \rightarrow \pm\infty}}{E_{x,y,z}} \rightarrow 0, \quad \underset{\substack{x \rightarrow \pm\infty \\ y \rightarrow \pm\infty}}{H_{x,y,z}} \rightarrow 0, \quad \underset{\substack{x \rightarrow \pm\infty \\ y \rightarrow \pm\infty}}{D_{x,y}} \rightarrow 0, \quad \underset{\substack{x \rightarrow \pm\infty \\ y \rightarrow \pm\infty}}{B_{x,y}} \rightarrow 0, \quad (2)$$

где $E_{x,y,z}$ – декартовы компоненты напряженности электрического поля излучения, $H_{x,y,z}$ – напряженности его магнитного поля, $D_{x,y,z}$ – декартовы компоненты электрической индукции диэлектрика, $B_{x,y,z}$ – компоненты магнитной индукции.

От уравнений для электромагнитных полей (1) перейдем к уравнениям для декартовых компонент пространственно-временного спектра светового излучения:

$$\left\{ \begin{aligned} g_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{x,y,z}(t, x, y, z) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy, \\ h_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H_{x,y,z}(t, x, y, z) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy, \\ \delta_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} D_{x,y,z}(t, x, y, z) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy, \\ \beta_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B_{x,y,z}(t, x, y, z) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $g_{x,y,z}$, $h_{x,y,z}$, $\delta_{x,y,z}$, $\beta_{x,y,z}$ – компоненты пространственно-временного спектра напряженности электрического и магнитного полей и электрической и магнитной индукции; ω , k_x , k_y – частоты временного и пространственного спектров.

Домножив все уравнения системы (1) на $e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)}$ и проинтегрировав их по x , y и t от $-\infty$ до $+\infty$ с учетом равенств $\rho = 0$, $\vec{j} = 0$ и условий (2), несложно получить спектральные аналоги уравнений системы (1):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial g_x}{\partial z} - i k_x g_z &= i \frac{\omega}{c} \beta_y, \\ \frac{\partial g_y}{\partial z} - i k_y g_z &= -i \frac{\omega}{c} \beta_x, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} k_y g_x - k_x g_y &= -\frac{\omega}{c} \beta_z, \\ \frac{\partial h_x}{\partial z} - i k_x h_z &= -i \frac{\omega}{c} \delta_y, \\ \frac{\partial h_y}{\partial z} - i k_y h_z &= i \frac{\omega}{c} \delta_x, \\ k_y h_x - k_x h_y &= \frac{\omega}{c} \delta_z, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta_z}{\partial z} + ik_x \delta_x + ik_y \delta_y = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \beta_z}{\partial z} + ik_x \beta_x + ik_y \beta_y = 0. \quad (7)$$

Система уравнений (4)–(7) при выполнении условий (2) имеет те же решения, что и система (1). В этом смысле они эквивалентны.

Ограничимся далее случаем немагнитных сред, в которых $\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{H}}$, и, следовательно, $\beta_{x,y,z} = h_{x,y,z}$. Продифференцировав первые два уравнения системы (4) по z , взяв производные $\frac{\partial \beta_x}{\partial z}$, $\frac{\partial \beta_y}{\partial z}$ (т.е. $\frac{\partial h_x}{\partial z}$, $\frac{\partial h_y}{\partial z}$) из (5) и выразив в получившихся уравнениях h_z через g_x и g_y из третьего уравнения (4), а также в третьем уравнении системы (5) выразив h_x и h_y (т.е. β_x и β_y) из системы (4), получаем, что динамика декартовых компонент пространственно-временного спектра напряженности электрического поля описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 g_x}{\partial z^2} - ik_x \frac{\partial g_z}{\partial z} - k_y^2 g_x + k_x k_y g_y = -\frac{\omega^2}{c^2} \delta_x, \\ \frac{\partial^2 g_y}{\partial z^2} - ik_y \frac{\partial g_z}{\partial z} - k_x^2 g_y + k_x k_y g_x = -\frac{\omega^2}{c^2} \delta_y, \\ (-k_x^2 - k_y^2) g_z - ik_x \frac{\partial g_x}{\partial z} - ik_y \frac{\partial g_y}{\partial z} = -\frac{\omega^2}{c^2} \delta_z. \end{cases} \quad (8)$$

Важно, что решения системы (4)–(7) являются и решениями системы (8). Обратное, строго говоря, неверно. Система (8) из-за дифференцирования уравнений (4) по z приобретает новые решения, которые имела бы система (4)–(7) при добавлении в (4) слагаемых, не зависящих от z . Отметим, что полученные уравнения (8) при условии (2) являются спектральными аналогами полевого уравнения

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}. \quad (9)$$

Будем рассматривать ниже нерезонансное взаимодействие света с диэлектрической средой, когда спектр излучения попадает в ее диапазон прозрачности. В этом случае отклик среды, которую мы будем полагать однородной и изотропной, на силовое воздействие со стороны светового поля, как правило, можно представить в виде [1]

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_{lin} + \mathbf{D}_{nl} = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(t-t') \mathbf{E}(t') dt' + \varepsilon_{nl} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E}, \quad (10)$$

где первое слагаемое описывает линейную часть электрической индукции и ее дисперсию (ε – диэлектрическая проницаемость среды), а второе – нелинейный отклик среды (ε_{nl} – нелинейная диэлектрическая проницаемость среды), который в оптике интенсивных фемтосекундных импульсов даже со сверхширокими пространственно-временными спектрами в широкозонных диэлектриках в первом приближении можно считать безынерционным [1].

При материальных уравнениях (10) выведенная система уравнений (8) примет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 g_x}{\partial z^2} + (k^2 - k_y^2) g_x - ik_x \frac{\partial g_z}{\partial z} + k_x k_y g_y = -\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{nl} F_x, \\ \frac{\partial^2 g_y}{\partial z^2} + (k^2 - k_x^2) g_y - ik_y \frac{\partial g_z}{\partial z} + k_x k_y g_x = -\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{nl} F_y, \\ (k^2 - k_x^2 - k_y^2) g_z - ik_x \frac{\partial g_x}{\partial z} - ik_y \frac{\partial g_y}{\partial z} = -\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{nl} F_z, \end{cases} \quad (11)$$

где $k(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega)$ – волновое число, $n(\omega)$ – зависимость от частоты линейного показателя

преломления среды, причем $n^2(\omega) = \varepsilon(\omega)$, $\varepsilon(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(t) e^{i\omega t} dt$, функционалы

$$F_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) E_{x,y,z} e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy =$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^6} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=x,y,z} g_i(\omega - \omega', k_x - k_x', k_y - k_y', z) g_i(\omega' - \omega'', k_x' - k_x'', k_y' - k_y'', z) \times$$

$$\times g_{x,y,z}(\omega'', k_x'', k_y'', z) d\omega' dk_x' dk_y' d\omega'' dk_x'' dk_y''$$

описывают нелинейный отклик среды. В предельном случае слабых электромагнитных полей система (11) линеаризуется и после подстановки g_z из третьего уравнения в первые два может быть сведена к виду [1]

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 g_x}{\partial z^2} + (k^2 - k_x^2 - k_y^2) g_x = 0, \\ \frac{\partial^2 g_y}{\partial z^2} + (k^2 - k_x^2 - k_y^2) g_y = 0, \\ g_z = \frac{ik_x}{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \frac{\partial g_x}{\partial z} + \frac{ik_y}{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \frac{\partial g_y}{\partial z}. \end{cases} \quad (12)$$

Итерационные решения нелинейных уравнений динамики спектров

Для выведенной системы нелинейных спектральных уравнений (11) удобно строить итерационные решения, так как ее предельный случай – линеаризованная система (12) – в отличие от полевого аналога, легко решается в квадратурах [1]. Эти решения естественно выбирать начальными итерационными решениями системы (11). Рассмотрим метод получения таких решений и сами решения подробнее.

Итерационный метод позволяет свести систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений (11) к системе линейных однородных и неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Будем искать итерационное решение (11) в виде ряда:

$$g_{x,y,z}(\omega, k_x, k_y, z) = g_{lin_{x,y,z}}(\omega, k_x, k_y, z) + \mu g_{1_{x,y,z}}(\omega, k_x, k_y, z) + \mu^2 g_{2_{x,y,z}}(\omega, k_x, k_y, z) + \dots, \quad (13)$$

где $\mu : \varepsilon_{nl} E_0^2$ (E_0 – максимальная амплитуда поля излучения на входе в среду) – параметр малости, $g_{lin_{x,y,z}}$ – соответствующий компонент решения системы (12), $g_{1_{x,y,z}}$ и $g_{2_{x,y,z}}$ – добавки к нему, обусловленные нелинейностью отклика среды в поле излучения высокой интенсивности.

Частное решение системы (12), соответствующее линейной дифракции однонаправленной волны (излучения, распространяющегося в положительном направлении оси z), которое мы будем рассматривать в качестве первой итерации, имеет вид

$$\begin{cases} g_{lin_x} = C_x(\omega, k_x, k_y) e^{-ik \sqrt{1 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2 - \left(\frac{k_y}{k}\right)^2} z}, \\ g_{lin_y} = C_y(\omega, k_x, k_y) e^{-ik \sqrt{1 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2 - \left(\frac{k_y}{k}\right)^2} z}, \\ g_{lin_z} = \frac{k_x C_x(\omega, k_x, k_y) + k_y C_y(\omega, k_x, k_y)}{\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} e^{-ik \sqrt{1 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2 - \left(\frac{k_y}{k}\right)^2} z}, \end{cases} \quad (14)$$

где $C_{x,y}(\omega, k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_{x,y}(t, x, y) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} dt dx dy$, $E_{x,y}(t, x, y)$ – поперечные компоненты электрического поля излучения на входе в среду ($z = 0$).

Решая систему уравнений (11), где в правой их части $F_{x,y,z}$ является функционалом от выражений (14), которые выведены как первая итерация, получаем добавку к решению (14) в следующей – второй – итерации вида

$$g_{1_x}(\omega, k_x, k_y, z) = \frac{e^{-iUz}}{2k^2 U} \int_0^z \left(iU^2 F_x - \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} + i \frac{k_y}{k_x} U^2 F_y \right) e^{iUz} dz + \frac{e^{iUz}}{2k^2 U} \int_z^L \left(-iU^2 F_x + \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} - i \frac{k_y}{k_x} U^2 F_y \right) e^{-iUz} dz - \quad (15)$$

$$\frac{ie^{-iUz}}{2k^2} \cdot \int_0^z e^{2iUz} \left(\int_z^L \left(ik_y^2 F_x + \frac{k_y^2}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} - i \frac{k_y}{k_x} (k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{-iUz} dz \right) dz + \frac{ie^{iUz}}{2k^2} \cdot \int_z^L e^{-2iUz} \left(\int_0^z \left(-ik_y^2 F_x - \frac{k_y^2}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} + i \frac{k_y}{k_x} (k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{iUz} dz \right) dz, \\ g_{1_y}(\omega, k_x, k_y, z) = \frac{e^{-iUz}}{2k^2 U} \int_0^z \left(-ik_x k_y F_x - k_y \frac{\partial F_z}{\partial z} + i(k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{iUz} dz + \frac{e^{iUz}}{2k^2 U} \int_z^L \left(ik_x k_y F_x + k_y \frac{\partial F_z}{\partial z} - i(k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{-iUz} dz, \quad (16)$$

$$g_{1_z}(\omega, k_x, k_y, z) = \frac{k_x e^{-iUz}}{2k^2 U^2} \int_0^z \left(iU^2 F_x - \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} + i \frac{k_y}{k_x} U^2 F_y \right) e^{iUz} dz - \frac{k_x e^{iUz}}{2k^2 U^2} \int_z^L \left(-iU^2 F_x + \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} - i \frac{k_y}{k_x} U^2 F_y \right) e^{-iUz} dz - \frac{ik_x e^{-iUz}}{2k^2 U} \cdot \int_0^z e^{2iUz} \left(\int_z^L \left(ik_y^2 F_x + \frac{k_y^2}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} - i \frac{k_y}{k_x} (k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{-iUz} dz \right) dz - \frac{ik_x e^{iUz}}{2k^2 U} \cdot \int_z^L e^{-2iUz} \left(\int_0^z \left(-ik_y^2 F_x - \frac{k_y^2}{k_x} \frac{\partial F_z}{\partial z} + i \frac{k_y}{k_x} (k^2 - k_y^2) F_y \right) e^{iUz} dz \right) dz + \frac{F_z}{U^2}, \quad (17)$$

где $U = k \sqrt{1 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2 - \left(\frac{k_y}{k}\right)^2}$, L – граница нелинейной среды.

Таким образом, в настоящем параграфе статьи получено аналитическое решение задачи об эволюции пространственно-временного спектра световой волны, который может быть сверхшироким, в изотропной диэлектрической нелинейной среде в виде (13), где решение в первой итерации имеет вид (14), а нелинейная добавка к нему в следующей итерации – вид (15)–(17). Нелинейная часть решения (15)–(17) описывает как уменьшение дифракционной расходимости пучка из-за самофокусировки, так и явление самоотражения излучения.

Проиллюстрируем полученное решение, ограничившись в настоящей статье эволюцией непараксиальных световых волн с малым числом колебаний в приближении первой итерации (14), акцентируя внимание в этом линейном режиме распространения на динамике продольной компоненты спектра и поля излучения.

Численное моделирование распространения фемтосекундного импульса титан-сапфирового лазера в кварцевом стекле

На рис. 1 и 2 проиллюстрированы решения (14), демонстрирующие непараксиальную эволюцию двумерного спектра излучения и щелевую динамику его поля, при граничных условиях

$$E(z, x, t)|_{z=0} = E_0 \exp\left(-2 \frac{x^2}{\Delta x^2}\right) \exp\left(-2 \frac{t^2}{\Delta t^2}\right) \cos(\omega_0 t), \quad (18)$$

где центральная длина волны $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0 = 780$ нм соответствует излучению титан-сапфирового лазера, пространственно-временные параметры волнового пакета на входе в среду $\Delta t = 7,5$ фс и $\Delta x = 10\lambda_0$. В качестве среды, в которой распространяется излучение, рассматривается кварцевое стекло с зависимостью линейного показателя преломления от частоты вида

$$n(\omega) = N_0 + a\omega^2 - \frac{bc}{\omega^2}, \quad (19)$$

где $N_0 = 1,4508$, $a = 2,7401 \cdot 10^{-44} \text{ с}^3 \text{ см}^{-1}$, $b = 3,9437 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-1}$ [4].

На рис. 1, а, б, представлены плоскостные изображения зависимостей модулей пространственно-временных спектров поперечной и продольной компонент поля импульса от пространственной частоты k_x , нормированной на центральную длину волны λ_0 , и от циклической частоты ω , нормированной на центральную частоту $\omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$. Из

(14) ясно, что эти зависимости с расстоянием z не изменяются. Как видно из рисунка, в спектре продольных компонент поля излучения на всех временных частотах отсутствуют низкие пространственные частоты волнового пакета.

На рис. 2 представлены плоскостные изображения зависимости поля E , нормированного на максимальное входное значение E_0 , от поперечной координаты x , нормированной на входную центральную длину волны λ_0 , и от времени t с увеличением пройденного импульсом расстояния z в оптической среде. Темно-серым частям изображения соответствуют максимальные положительные значения поля, светло-серым – максимальные отрицательные значения. На рис. 2, а–г, демонстрируется временная динамика и изменение пространственного распределения поперечной компоненты электрического поля импульса, на рис. 2, а'–г', приведены аналогичные изображения для продольной компоненты. Как видно из рис. 2, продольная компонента поля импульса на поперечной оси обнуляется. Эта область разделяет две части импульса, имеющие

фазовое смещение друг относительно друга на π . Амплитуда продольной компоненты импульса составляет по модулю не более 1% от амплитуды поперечной компоненты.

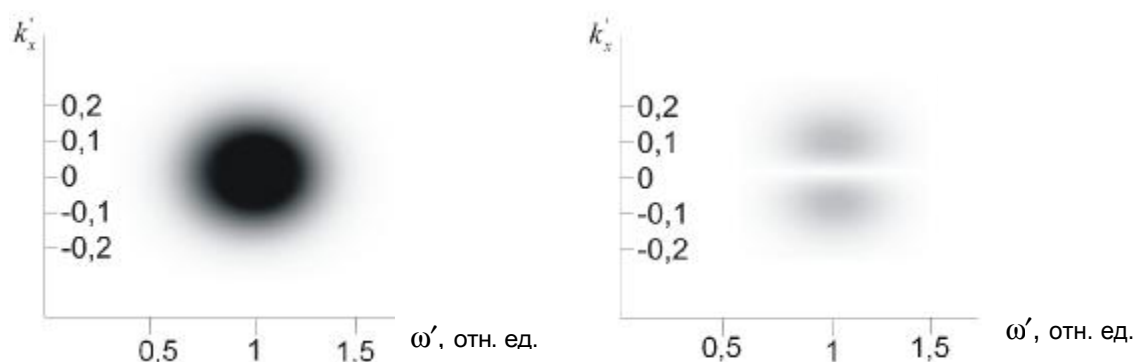


Рис. 1. Нормированные пространственно-временные спектры поперечной и продольной компонент поля импульса с параметрами на входе в среду $\lambda_0 = 780 \text{ нм}$, $\Delta t = 7,5 \text{ фс}$, $\Delta x = 10\lambda_0$

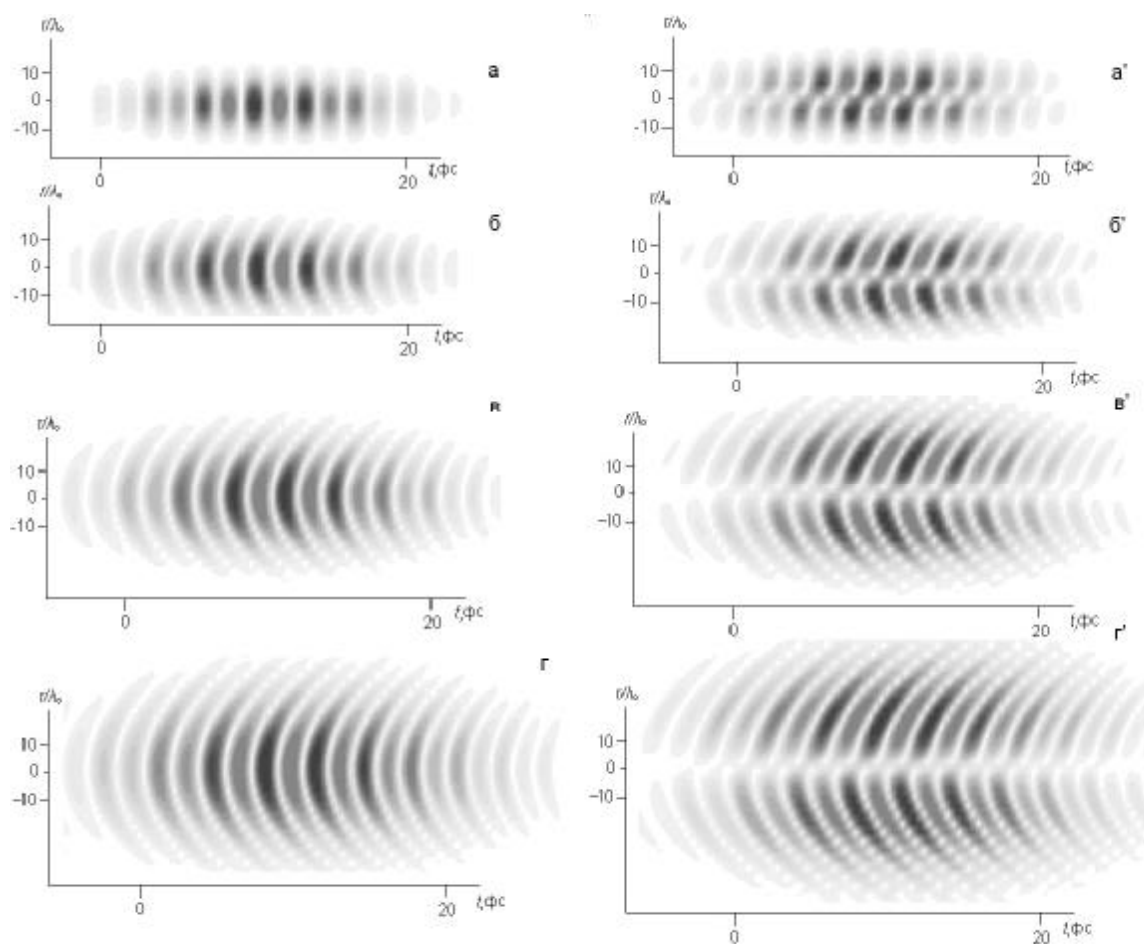


Рис. 2. Пространственно-временная эволюция компонент электрического поля светового импульса (поперечная слева, продольная справа) с входными параметрами $\lambda_0 = 780 \text{ нм}$, $\Delta t = 7,5 \text{ фс}$, $\Delta x = 10\lambda_0$. В кварцевом стекле: а–а') $z = 0$, б–б') $z = 0,15 \text{ мм}$, в–в') $z = 0,3 \text{ мм}$, г–г') $z = 0,45 \text{ мм}$

Заключение

Из уравнений динамики электромагнитных полей Максвелла выведена система уравнений, описывающих непараксиальную эволюцию декартовых компонент пространственно-временного спектра световой волны в однородной изотропной диэлектрической среде с произвольной зависимостью линейного показателя преломления и характерной для диэлектриков безынерционной кубичной по полю нелинейностью электрической индукции среды. Получены итерационные решения этих уравнений. Решения в первой итерации (приближение линейной среды) иллюстрированы на примере дифракционно-дисперсионного расплывания двумерного волнового пакета. Показано, что на оси пучка продольная компонента поля равна нулю, и в этой области реализуется скачок фазы волны на π .

Работа поддержана грантом РФФИ 08-02-00902-а и программой «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.1/4923.

Литература

1. Козлов С.А., Самарцев В.В. Оптика фемтосекундных лазеров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 218 с.
2. Baltuska A., Wei Z., Pshenichnikov M.S., Wiersma D.A. Optical pulse compression to 5 fs at a 1 MHz repetition rate // Opt. Lett. – 1997. – V. 22. – № 2. – P. 102–104.
3. Nisovi M. et al. Compression of high-energy laser pulses below 5 fs // Opt. Lett. – 1997. – V. 22. – № 8. – P. 522–524.
4. Berkovskiy A.N., Kozlov S.A., Shpolyanskiy Y.A.. Self-focusing of few-cycle light pulses in dielectric media // Phys. Review A. – 2005. – V. 72. – 043821.
5. Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 208 с.
6. Козлов С.А. Спектральные уравнения в фемтосекундной нелинейной оптике // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. – С. 143–160.
7. Изъюров С.А., Козлов С.А. Динамика пространственного спектра световой волны при ее самофокусировке в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 71. – В. 11. – С. 666–670.
8. Козлов С.А., Петрошенко П.А. Самоделение импульсов из нескольких колебаний светового поля в нелинейной среде с дисперсией // Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 76. – № 4. – С. 241–245.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

Иванов Дмитрий Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, haxpeha@list.ru

Козлов Сергей Аркадьевич

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

УДК 004.932.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ

М.А. Волынский, И.П. Гуров, А.С. Потапов

Проведено исследование представлений изображений в оптической когерентной томографии (ОКТ). На основе принципа репрезентационной минимальной длины описания (РМДО) введен объективный критерий качества математических моделей для описания ОКТ-изображений (томограмм). Предложен алгоритм сегментации томограмм для случая слоистой структуры исследуемого объекта, что может быть использовано в морфологическом анализе структуры биологических тканей, в том числе при диагностике заболеваний. Показано, что величина критерия РМДО согласуется с экспертной оценкой адекватности результатов сегментации. Предложенный критерий может быть использован как основа разработки алгоритмов автоматического анализа томограмм в ОКТ.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, сегментация изображений, теория информации.

Введение

Одна из центральных проблем в биомедицине – это проблема анализа внутренней микроструктуры биологических тканей в целях диагностики заболеваний. Современным методом исследования подобной микроструктуры является оптическая когерентная томография (ОКТ), перспективность которой обусловлена высокой разрешающей способностью и информативностью ОКТ-изображений (томограмм), формируемых неинвазивно, что позволяет минимизировать потребность взятия проб биопсии [1].

В то же время томограммы являются трудно интерпретируемыми, поскольку способ их формирования существенно отличается от процесса регистрации оптических изображений, к восприятию которых человеческая зрительная система эволюционно адаптирована. Как следствие, затруднительной оказывается и разработка методов автоматического анализа томограмм, поскольку эти методы в большинстве своем построены на спектральных признаках, эвристически вводимых для каждого конкретного типа биологических тканей и заболеваний [2, 3]. Актуальной становится разработка общего подхода к синтезу алгоритмов интерпретации томограмм с введением объективного количественного критерия качества алгоритмов.

Основная задача анализа томограмм состоит в обнаружении слоев и неоднородных включений в биологических тканях и оценке их характеристик. Иными словами, требуется осуществлять построение описаний томограмм, характеризующих внутреннюю микроструктуру биологических тканей. Построение описаний изображений всегда производится в рамках некоторых представлений изображений с использованием математической модели. Выбор представления влияет на возможность построения адекватных описаний изображений и оказывается ключевой проблемой при интерпретации изображений заданного класса на основе строго обоснованного критерия.

Понятие представления изображений является фундаментальным в области компьютерного зрения. Однако общие теории представления изображений, включающие строгое определение данного понятия и критерии выбора оптимальных представлений для изображений новых типов, таких как томограммы, в настоящее время практически отсутствуют.

Один из возможных подходов был предложен в работе [4], определяющей представление как такую программу для универсальной машины Тьюринга, которая может восстановить любое изображение из данного множества по его описанию. Программа соответствует некоторому представлению только в том случае, когда для любого изображения существует подходящее описание. Простейшему представлению соответствует программа, которая принимает на вход изображение в качестве его собственного описания, передавая его на выход без какой-либо обработки.

Для оценки того, насколько эффективно содержание изображений некоторого класса может быть описано с помощью данного представления, вводится принцип репрезентационной минимальной длины описания (РМДО), основанный на следующих основных положениях.

1. Критерием качества представления для данного множества изображений является сумма:

- длины самого представления (числа символов в соответствующей программе);
- длин наименьших описаний (в рамках представления) изображений множества.

Обычно одному изображению можно поставить в соответствие большое число разных описаний, по которым это изображение может быть восстановлено. Вторая часть принципа РМДО устанавливает критерий для выбора наилучшего описания единичного изображения в рамках данного представления (как правило, это описание разделяется на регулярную часть, или модель, и случайную часть):

2. Критерием качества модели изображения в рамках данного представления является сумма

- длины модели;
- длины описания отклонений изображения от модели (в рамках представления).

Если одно представление позволяет построить более компактное описание любого изображения некоторого множества по сравнению с описаниями, строящимися в рамках другого представления, оно существенно превосходит другое представление.

В работе [5] показано, что принцип РМДО может быть использован для выбора оптимальных представлений для разных выборок обычных оптических и радиолокационных изображений.

В настоящей работе рассмотрены результаты применения принципа РМДО для исследования представлений томограмм в ОКТ. В качестве основного результата показана принципиальная применимость принципа РМДО для оценки качества представлений изображений указанного типа. В работе предложены два упрощенных представления томограмм, основывающихся на моделях сегментации. Эти представления позволяют выявлять слоистую структуру биологических тканей при автоматическом анализе томограмм, что имеет важное прикладное значение для решения задач биомедицинской диагностики.

Принцип репрезентационной минимальной длины описания

Принцип РМДО является расширением хорошо известного принципа минимальной длины описания, который строго вводится на основе алгоритмической сложности по Колмогорову [6]. Пусть U – универсальная машина Тьюринга (УМТ). Алгоритмическая сложность бинарной строки β задается выражением

$$K_U(\beta) = \min_{\alpha} [l(\alpha) | U(\alpha) = \beta],$$

где $l(\alpha)$ – длина программы α . Индекс U обычно опускают, когда речь не идет о нескольких разных УМТ. Программа для УМТ может рассматриваться как модель источника, порождающего данные β .

Для вывода принципа РМДО строка α представляется в виде конкатенации двух строк $\alpha = \mu\delta$, где μ интерпретируется как сама программа (модель или регулярная компонента), а δ – как входные данные к этой программе (случайная компонента, описывающая отклонение модели μ от данных наблюдения β). Выражение для алгоритмической сложности при этом принимает вид

$$K(\beta) = \min_{\mu\delta} [l(\mu) + l(\delta) | U(\mu\delta) = \beta] = \min_{\mu} \left[l(\mu) + \min_{\delta} [l(\delta) | U(\mu\delta) = \beta] \right].$$

Минимальная длина описания данных β может быть выражена формулой

$$K(\beta) = \min_{\mu} [I(\mu) + K(\beta | \mu)],$$

где величина $K(\beta|\mu)$ обозначает условную алгоритмическую сложность строки β при данной строке μ . Правило выбора модели на основе критерия длины описания принимает форму

$$\mu^* = \arg \min_{\mu} [K(\beta | \mu) + I(\mu)].$$

Этот критерий, однако, не может быть применен непосредственно к проблемам анализа изображений, поскольку он не учитывает априорную информацию, содержащуюся в представлении изображений. В рамках принципа МДО полагается, что вся имеющаяся информация сосредоточена в строке β . Однако методы анализа изображений применяются ко многим изображениям независимо, поэтому задачу анализа изображений необходимо раскрывать применительно к набору изображений.

Обозначим ансамбль изображений как $f_1, \dots, f_n$. Независимое описание отдельных изображений является менее эффективным по сравнению с одновременным описанием всех изображений ансамбля, поскольку выполняется следующее неравенство

$$\sum_{i=1}^n K(f_i) \geq K(f_1 f_2 \dots f_n).$$

Повысить эффективность независимого описания можно, если извлечь из изображений взаимную информацию и использовать ее как априорную информацию при независимом описании каждого изображения:

$$K(f_1 f_2 \dots f_n) \approx \min_S \left[\sum_{i=1}^n K(f_i | S) + K(S) \right].$$

Здесь S является программой для УМТ, для которой каждому изображению f_i можно поставить в соответствие такое описание $\mu_i \delta_i$, что $U(S \mu_i \delta_i) = f_i$. Поскольку применение программы S к описанию изображения из ансамбля позволяет восстановить исходное изображение, программа S может быть названа представлением изображений. Первая часть принципа РМДО устанавливает критерий выбора оптимального представления изображений по их ансамблю в форме

$$S^* = \arg \min_S \left[\sum_{i=1}^n K(f_i | S) + K(S) \right].$$

Длина описания одного изображения в рамках заданного представления примет вид

$$L_S(\beta) = K(\beta | S) = \min_{\mu} [I(\mu) + K(\beta | S \mu)],$$

что соответствует второй части принципа РМДО.

Как следствие, принцип РМДО предоставляет возможность корректно сравнивать длины описаний изображений, полученные в рамках различных представлений, в то время как обычно полагается, что подобные длины не могут сравниваться, поскольку получаются с использованием различных критериев.

Представления изображений на основе моделей сегментации

Обратимся к представлениям изображений, на основе которых может производиться сегментация изображений.

1. Представление S_0 , в рамках которого значения интенсивности излучения для отдельных пикселей интерпретируются как независимые отсчеты случайных величин с одинаковым распределением вероятностей. Длина описания изображения

$f(x, y) : G \rightarrow R$, заданного в области G , в рамках этого представления может быть оценена по формуле

$$L_{S_0}(f) = \|G\|H(f) + N_b \log_2 N_b,$$

где $\|G\|$ – площадь изображения, $H(f)$ – энтропия интенсивностей, N_b – число различных уровней интенсивности. Первое слагаемое в правой части соответствует суммарной длине закодированных значений интенсивности, а второе слагаемое – длине таблицы перекодировки.

2. Представление S_1 , в котором область изображения G разделяется на некоторые подобласти $G_1, \dots, G_d$. Значениям интенсивностей в каждой области приписывается собственное вероятностное распределение. В дополнение к значениям интенсивности необходимо также описать границы областей δG_i . Длина описания изображения в рамках этого представления может быть оценена по формуле

$$L_{S_1}(f) = \sum_{i=1}^d (\|G_i\|H(f_i) + N_b \log_2 N_b + \|\delta G_i\| \log_2 N_d),$$

где f_i – сужение изображения на область G_i , N_d – число соседей у каждого пикселя (например, $N_d=8$).

Представление S_1 допускает произвольное разбиение изображения на области. Однако лучшее разбиение должно выбираться по критерию длины описания. Если разбиение соответствует действительным областям на изображении, значения энтропии внутри этих областей будут минимальными. Энтропия также может уменьшаться, если выбирается разбиение на большое число областей, но решения с чрезмерной сегментацией штрафуются, поскольку при вычислении длины описания учитывается сложность модели (длины таблиц перекодировки и описания границ).

3. Представление S_2 , в котором изображение также разделяется на области, но содержимое каждой области описывается с помощью регрессионной модели, т.е. некоторая регулярная функция $g_i(x, y, \mathbf{w}_i)$ с вектором параметров $\mathbf{w}_i$ вычитается из значений интенсивности $f_i(x, y)$ перед вычислением энтропии. Оптимальное значение параметров регрессионной модели соответствует минимуму энтропии в соответствующей области G_i . Длина описания изображения в рамках представления S_2 может быть оценена по формуле

$$L_{S_2}(f) = \sum_{i=1}^d (\|G_i\|H(r_i) + N_b \log_2 N_b + L(\mathbf{w}_i) + \|\delta G_i\| \log_2 N_d),$$

где значения

$$r_i(x, y) = f_i(x, y) - g_i(x, y, \mathbf{w}_i)$$

описывают отклонения модели от значений интенсивности в области G_i , а значения

$$L(\mathbf{w}_i) = \frac{m_i}{2} \log_2 \|G_i\|$$

являются длинами описания векторов параметров $\mathbf{w}_i$, состоящих из m_i элементов. Здесь рассмотрение ограничено линейными регрессионными моделями, поскольку выбор наиболее адекватного класса моделей является отдельной проблемой, требующей дальнейшего исследования, которое может быть проведено с помощью принципа РМДО.

Оптимизация длины описания единичного изображения в рамках каждого из представлений должна производиться с помощью некоторого алгоритма сегментации. Мы использовали один из вариантов алгоритма «роста областей». Этот алгоритм начинает работу с большого числа маленьких областей (например, размером 3×3), и последовательно находит такие пары областей, объединение которых дает наибольший выигрыш в длине описания в рамках представления S_1 или S_2 . Поскольку длины описания

зависят от представления, один и тот же алгоритм будет находить разные решения при использовании разных представлений, качество которых может быть оценено на основе достигаемых длин описания.

Следует отметить, что существуют ранее разработанные алгоритмы сегментации с использованием принципа МДО [7, 8]. Новизна результатов настоящей работы состоит в следующем. Во-первых, принцип РМДО впервые позволил сравнивать эффективность различных представлений, поскольку в указанных выше работах обсуждается только проблема выбора оптимальной сегментации единичного изображения в рамках фиксированного представления. Во-вторых, представление S_2 (в котором учитываются плавные переходы яркости внутри областей) ранее не применялось в алгоритмах сегментации на основе принципа МДО, а также не применялось при сегментации ОКТ изображений.

Кратко описанный выше алгоритм «роста областей» не обеспечивает нахождения абсолютного минимума длины описания, хотя и дает удовлетворительные результаты. По своим характеристикам он соответствует алгоритму градиентного спуска или «жадному» алгоритму, которые имеют свойства останавливаться в локальных минимумах. Исследование алгоритмов поиска выходит за рамки данной работы.

Экспериментальные результаты сегментации томограмм в ОКТ

Представления S_1 и S_2 были применены при сегментации 30 различных томограмм в форме В-сканов [9], полученных с использованием оптического когерентного микроскопа EX1301 (Michelson Diagnostics, Ltd.), в котором сканирование исследуемого образца по глубине осуществляется четырьмя зондирующими пучками, сфокусированными на различной глубине, что позволяет после аналоговой постобработки увеличить общую глубину резкости прибора и вдвое повысить разрешающую способность [10].

На рис. 1 приведены примеры двух томограмм, состоящих из разного числа слоев. Результаты их сегментации представлены на рис. 2.

Длины описания L_i , соответствующие представлениям S_i , представлены в табл. 1.

N	$L_0(f)$, бит	$L_1(f)$, бит	$L_2(f)$, бит
1	268365	220790	214386
2	449433	415708	415375

Таблица 1. Длины описаний

Как видно из таблицы, длины описания в рамках представления S_1 меньше, чем в рамках представления S_0 , в котором деление на области не производится. По результатам экспериментов такое сокращение длины описания (в среднем на 10%) наблюдается на всех изображениях выборки. В соответствии с принципом РМДО можно заключить, что представление S_1 заметно превосходит представление S_0 , что свидетельствует о присутствии отдельных областей на изображениях.

Представление S_2 оказывается еще более эффективным в тех случаях, когда не произведена предобработка томограмм. Поскольку значения интенсивности в томограммах понижаются с глубиной в связи с поглощением излучения, в логарифмической шкале такое затухание излучения хорошо описывается линейными регрессионными моделями, включенными в представление S_2 . В рамках представления S_1 регулярные изменения яркости внутри областей не описываются, в результате чего результаты сегментации могут оказаться чрезмерно фрагментированными (см. рис. 2, а), а длина описания – повышенной. Таким образом, понижение значения критерия РМДО является объективным показателем повышения адекватности представления.

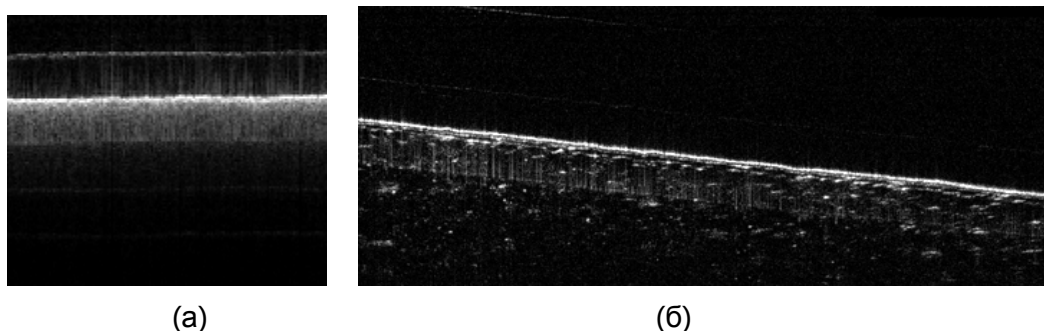


Рис. 1. Томограммы листа бумаги (а) и листа цветка (б)

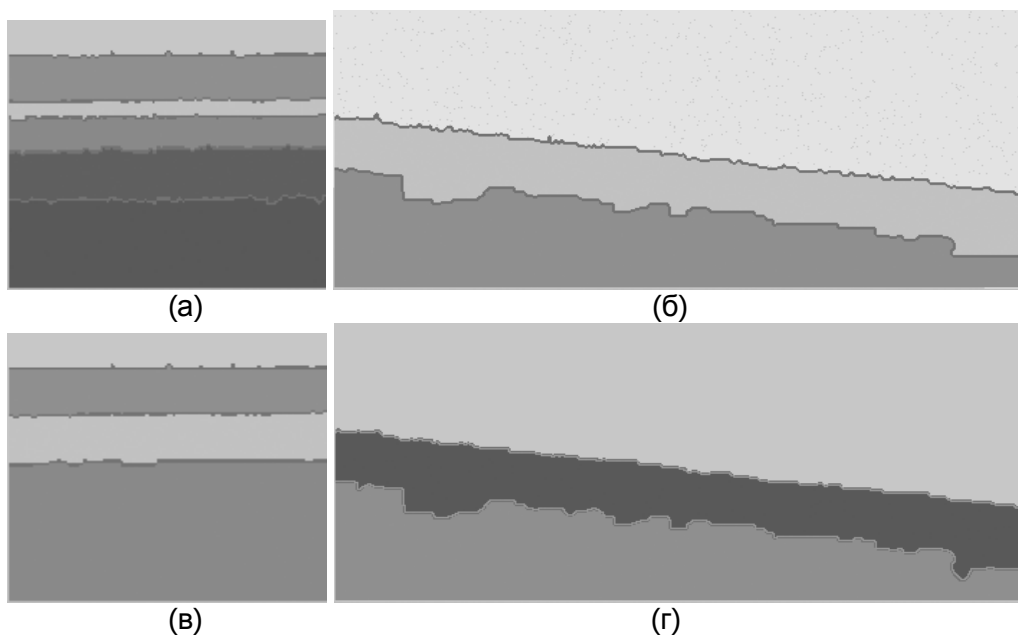


Рис. 2. Результаты сегментации томограмм (рис. 1) с помощью представлений S_1 (а, б) и S_2 (в, г)

Отметим, что устранение влияния затухания можно выполнить автоматически при использовании соответствующей опции в томографе, однако исследования показали, что при этом в изображение нижних слоев вносятся заметные ошибки.

На рис. 3 представлен пример предобработанного изображения и результаты его сегментации. Хотя результаты в рамках представления S_1 оказываются менее фрагментированными, качество сегментации в рамках представления S_2 ухудшается.



Рис. 3. Пример ОКТ изображения с устранением эффекта поглощения и результаты сегментации в рамках представлений S_1 и S_2

Как показывают эксперименты, в результате сегментации томограмм в рамках представления S_2 выделяются области, в целом соответствующие реальным слоям микроструктуры объекта (как, например, в случае рис. 1, б). При этом, однако, в равной степени могут выделяться и артефакты, вносимые системой формирования томограмм. В частности, слои на рис. 1, а, являются следствием не вполне корректного объединения информации четырех каналов томографа. Установление природы обнаруженных областей невозможно без привлечения экспертных знаний. В то же время наличие подобных артефактов на изображениях увеличивает значение критерия РМДО, что может использоваться для сравнения качества изображений, формируемых разными томографами. Отметим, что рассмотренные в настоящей статье представления томограмм требуют дальнейшего развития применительно к анализу тонкой структуры слоев и микровключений в отдельных слоях.

Заключение

В работе исследованы три представления изображений, в рамках которых производилось описание томограмм, формируемых в ОКТ. Одно из представлений не подразумевало сегментацию изображений. Два других представления включали разделение изображения на области, которые должны были соответствовать разным слоям микроструктуры исследуемых образцов. Эти представления отличались способом описания содержимого областей.

В целях сравнения эффективности представлений предложено использовать критерий РМДО. Установлена адекватность результатов сравнения представлений по критерию РМДО. Показано, что изображения слоев микроструктуры обладают различными свойствами, что находит отражение в значениях критерия РМДО и позволяет разделять слои с использованием алгоритмов автоматической сегментации.

Дальнейшее развитие представлений ОКТ-изображений с использованием более детальных сведений о структуре биологических тканей различных видов может проводиться с использованием принципа РМДО, обеспечивающего объективное сравнение эффективности представлений изображений. При этом наиболее эффективные представления изображений разных типов микроструктуры объектов могут оказаться различными, что позволит осуществить классификацию характеристик биологических тканей по критерию РМДО, в частности, при диагностике заболеваний.

Литература

1. Gossage K.W. et al. Texture analysis of optical coherence tomography images: feasibility for tissue classification // J. of Biomedical Optics. – 2003. – V. 8. – № 3. – P. 570–575.
2. Gossage K.W. et al. Texture analysis of speckle in optical coherence tomography images of tissue phantoms // Phys. Med. Biol. – 2006. – V. 51. – P. 1563–1575.
3. Qi X. et al. Computer-aided diagnosis of dysplasia in Barrett's esophagus using multiple endoscopic OCT images // Proc. SPIE. – 2006. – V. 6079. – P. 81–90.
4. Potapov A.S. Synthetic pattern recognition methods based on the representational minimum description length principle // Proc. OSAV'2008, 2nd Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision. – 2008. – P. 354–362.
5. Potapov A.S. Comparative analysis of structural representations of images based on the principle of representational minimum description length // Journal of Optical Technology. – 2008. – V. 75. – № 11. – P. 715–720.
6. Vitanyi P.M.B., Li M. Minimum description length induction, Bayesianism, and Kolmogorov complexity // IEEE Trans. on Inform. Theory. – 2000. – V. 46. – № 2. – P. 446–464.

7. Zhu S.-C., Yuille A. Region competition: unifying snakes, region growing, and bayes/MDL for multiband image segmentation // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1996. – V. 18. – P. 884–900.
8. Lee T.C.M. A Minimum Description Length based image segmentation procedure, and its comparison with a cross-validation based segmentation procedure // J. of the American Statistical Association. – 2000. – V. 95. – P. 259–270.
9. Fercher A.F., Drexler W., Hitzenburger C.K., Lasser T. Optical coherence tomography – principles and applications // Rep. Prog. Phys. – 2003. – V. 66. – P. 239–303.
10. Holms J. Theory and applications of multi-beam OCT // Proc. SPIE. – 2008. – V. 7139. – P. 7139–08.

Волынский Максим Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, maxim.volynsky@gmail.com

Гуров Игорь Петрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gurov@mail.ifmo.ru

Потапов Алексей Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, pas.aicv@gmail.com

УДК 538.9+538.958

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ CdTe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

**А.В. Савельева, М.В. Мухина, А.О. Орлова, В.Г. Маслов, А.В. Баранов,
А.В. Федоров**

Представлены результаты исследования динамики агрегации CdTe квантовых точек (КТ) в водных растворах в присутствии в растворе ионов свинца и хрома (Pb^{2+} , Cr^{3+}) с использованием методов абсорбционного и люминесцентного анализа, включая измерения времен затухания люминесценции КТ. Показано, что в присутствии ионов свинца происходит образование достаточно стабильных кластеров определенного размера, демонстрирующих наличие процесса переноса энергии фотовозбуждения внутри кластера

Ключевые слова: CdTe квантовые точки, кластеры, ионы свинца, перенос энергии.

Введение

Получение наноструктур субмикронных размеров с заданными оптическими свойствами в настоящее время является актуальной задачей nanoиндустрии. Полупроводниковые нанокристаллы, или квантовые точки (КТ), размеры которых во всех трех измерениях составляют единицы нанометров, весьма привлекательны в качестве «строительных блоков» для создания таких наноструктур, например, с использованием процессов самоорганизации нанокристаллов в жидком растворе [1]. Важно, что благодаря эффекту пространственного ограничения трансляционного движения квазичастиц в квантовых точках их оптическими свойствами можно управлять, меняя их размер [2]. Следовательно, можно менять и оптические параметры наноструктур на основе квантовых точек. Кроме того, имеется возможность изменения оптических характеристик нанокристаллов и наноструктур на их основе при изменении типа или заряда молекулярной оболочки, обычно присутствующей на поверхности нанокристаллов. Одним из интересных типов наноструктур с рядом необычных оптических свойств являются кластеры, содержащие различное количество (от нескольких единиц до десятков тысяч) в

той или иной степени упорядоченных нанокристаллов. Такие кластеры могут возникать в результате спонтанной агрегации квантовых точек в жидких растворах. Процесс увеличения размеров кластеров обычно неконтролируем и в конечном результате приводит к выпадению образовавшихся кластеров в осадок. Важной задачей является установление условий, при которых возможно образование достаточно стабильных кластеров, желательного определенного размера и обладающих важными для приложений свойствами, например, свойствами переноса энергии фотовозбуждения от периферии к центру кластера [3].

В данной работе проведено исследование динамики агрегации CdTe КТ в водных растворах в присутствии в растворе ионов свинца и хрома (Pb^{2+} , Cr^{3+}) с использованием методов абсорбционного и люминесцентного анализа, включая измерения времен затухания люминесценции КТ. Показано, что в присутствии ионов свинца происходит образование достаточно стабильных кластеров определенного размера, демонстрирующих наличие процесса переноса энергии фотовозбуждения внутри кластера.

Объекты и методы исследования

Для приготовления водных растворов квантовых точек использовались отрицательно заряженные водорастворимые КТ полупроводника CdTe, солюбилизованные меркаптоуксусной кислотой [4]. Диаметр, молекулярный коэффициент экстинкции и концентрация КТ в растворе определялись по спектру поглощения и люминесценции КТ с использованием методики, предложенной в работе [5]. Определено, что исследуемые КТ имеют диаметр 2,2 нм, максимум длинноволнового пика поглощения с коэффициентом экстинкции $\epsilon = 3,5 \times 10^4 \text{ М}^{-1} \text{ см}^{-1}$ на 494 нм и максимум полосы люминесценции с шириной на полувысоте 43 нм на 528 нм. Концентрация КТ в экспериментах составляла примерно $C = 5 \times 10^{-7} \text{ М}$, что позволяло уверенно регистрировать спектры поглощения и люминесценции образцов.

В ходе эксперимента к раствору CdTe КТ добавлялись растворы солей металлов – ацетаты свинца и хрома ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ и $\text{Cr}(\text{CH}_3\text{COO})_3$) при различных концентрациях. Спектры поглощения и люминесценции растворов были получены с использованием спектрофотометра UV Probe 3600, Shimadzu и спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама», Люмэкс. Время затухания люминесценции растворов регистрировалось с помощью лазерного сканирующего люминесцентного микроскопа с возможностью временного анализа люминесценции MicroTime100, PicoQuant.

Результаты и обсуждение

Исследуемые растворы КТ были устойчивы в щелочной среде ($\text{pH} = 11,2\text{--}11,7$) в течение нескольких месяцев, демонстрируя неизменность параметров спектров поглощения и люминесценции КТ, что свидетельствует об отсутствии спонтанной агрегации. В то же время в растворах с нейтральным $\text{pH} = 6,5$ наблюдались выраженные изменения спектров поглощения и люминесценции КТ с характерными временами в несколько десятков часов, свидетельствующие о спонтанной агрегации КТ в кластеры с последующим выпадением их в осадок. Поэтому эксперименты по определению влияния ионов металлов на процесс образования кластеров были проведены при $\text{pH} = 6,5$. Отметим здесь, что о выпадении кластеров КТ в осадок однозначно свидетельствует только уменьшение интенсивности полосы поглощения раствора. В то же время уменьшение интенсивности люминесценции может быть также связано с различными механизмами тушения люминесценции при взаимодействии КТ между собой в кластере и с продуктами диссоциации солей металлов.

Сначала, для установления диапазона концентраций ионов металлов, необходимых для изменения хода агрегации, к раствору CdTe КТ добавлялись растворы солей металлов в различной концентрации, чтобы соотношение молярных концентраций ацетата свинца и КТ, $C_{Pb}:C_{КТ}$ варьировалось в диапазоне от 1:1 до 200:1. Обнаружено, что наиболее интересным является диапазон концентраций $C_{Pb}:C_{КТ}$ от 10:1 до 100:1, где наблюдается монотонное уменьшение интенсивности люминесценции раствора, сопровождаемое сдвигом полосы люминесценции КТ в длинноволновую сторону и уменьшением ее ширины. В то же время в спектрах поглощения растворов значительных изменений не наблюдалось, что позволяет сделать вывод о том, что тушение люминесценции не связано с выпадением кластеров КТ в осадок. При дальнейшем увеличении концентрации ионов свинца люминесценция КТ практически исчезает одновременно с уменьшением интенсивности полосы поглощения, как это наблюдалось для раствора КТ в отсутствии ионов металлов.

При смешивании растворов CdTe КТ и ацетата трехвалентного хрома $Cr(CH_3COO)_3$ в диапазоне $C_{Cr}:C_{КТ}$ от 0:1 до 200:1 не наблюдалось изменений спектров люминесценции и поглощения. Эксперименты проводились при таких же значениях pH, как в случае ацетата свинца. На основании этого сделан вывод, что исследуемые КТ не взаимодействуют с продуктами диссоциации соли хрома.

Это обстоятельство позволяет ответить на вопрос о том, какие компоненты раствора оказывают влияние на процесс агрегации КТ – ионы свинца или противоионы CH_3COO^- . Если бы КТ взаимодействовали с ионами CH_3COO^- , то это бы проявилось и в случае смешения растворов КТ и ацетата хрома. Поскольку не было обнаружено изменений спектров КТ при добавлении ацетата хрома, был сделан вывод, что КТ взаимодействуют именно с ионами свинца.

Для анализа влияния присутствия ионов свинца в растворе на процесс образования кластеров КТ проведен сравнительный анализ эволюции спектров поглощения и люминесценции растворов КТ с pH=6,5 без и с ионами свинца во временном промежутке от момента приготовления растворов до 170 часов. Концентрация КТ в эксперименте составляла порядка 5×10^{-7} М, концентрация ионов свинца в растворе – 2×10^{-5} М, что соответствует соотношению ионов свинца и КТ в растворе $C_{Pb}:C_{КТ} = 27:1$. Раствор ацетата свинца добавлялся к раствору КТ таким образом, чтобы изменение объема не превышало 10 %.

На рис. 1, а, и 1, б, показана эволюция спектра люминесценции и поглощения раствора CdTe КТ при отсутствии ионов свинца. Как известно, образование кластеров из нанокристаллов обычно сопровождается красным сдвигом полосы люминесценции вследствие диполь-дипольного взаимодействия близко расположенных нанокристаллов. Поэтому наблюдающийся нами красный сдвиг полосы люминесценции и уменьшение ее интенсивности свидетельствует о спонтанной агрегации CdTe КТ в растворе с образованием кластеров. Монотонное увеличение величины сдвига и уменьшение интенсивности люминесценции говорят о постепенном увеличении размеров кластеров КТ. При достижении некоторого критического размера кластеры выпадают в осадок, о чем свидетельствует постепенное исчезновение полосы поглощения КТ из спектра поглощения раствора (рис. 1, б) и рост скорости уменьшения интенсивности люминесценции (рис. 1, а). Полная деградация люминесценции и поглощения КТ (выпадение КТ в осадок) занимает порядка 100 часов.

На рис. 2 представлены временные изменения спектров люминесценции (рис. 2, а) и поглощения (рис. 2, б) раствора CdTe КТ после добавления ионов свинца. Сразу после добавления ионов наблюдается уменьшение интенсивности люминесценции КТ и спектральный сдвиг ее полосы примерно на 10 нм в длинноволновую область по сравнению с исходным раствором КТ (рис. 2, а, кривые 1 и 2). Такие изменения показыва-

ют, что в растворе произошла очень быстрая самоорганизация КТ в кластеры более или менее определенного размера, соответствующего кластерам, образующимся в растворе КТ без ионов приблизительно через 15 часов. Видно, что, в отличие от раствора КТ без ионов, спектральное положение и форма полосы люминесценции (кривые 2, 3 и 4 на рис. 2, а) практически не меняются, по крайней мере, в течение нескольких десятков часов. То же справедливо и для длинноволновой полосы спектра поглощения (кривые 2, 3 и 4 на рис. 2, б). Эти факты свидетельствуют о неизменности размеров кластеров и взаимодействия квантовых точек, образующих кластер. И лишь после примерно 100 часов наблюдаются характерные изменения параметров спектров поглощения и люминесценции КТ, свидетельствующие о выпадении кластеров в осадок. Таким образом, проведенный анализ спектров поглощения и люминесценции исследуемого раствора показывает, что добавление в раствор CdTe КТ ионов свинца предоставляет принципиальную возможность формирования близких по размерам кластеров, состоящих из КТ и достаточно стабильных во времени. Корреляцию между концентрацией ионов и размером кластеров, как и внутреннюю структуру кластеров, предполагается установить в дальнейших исследованиях.

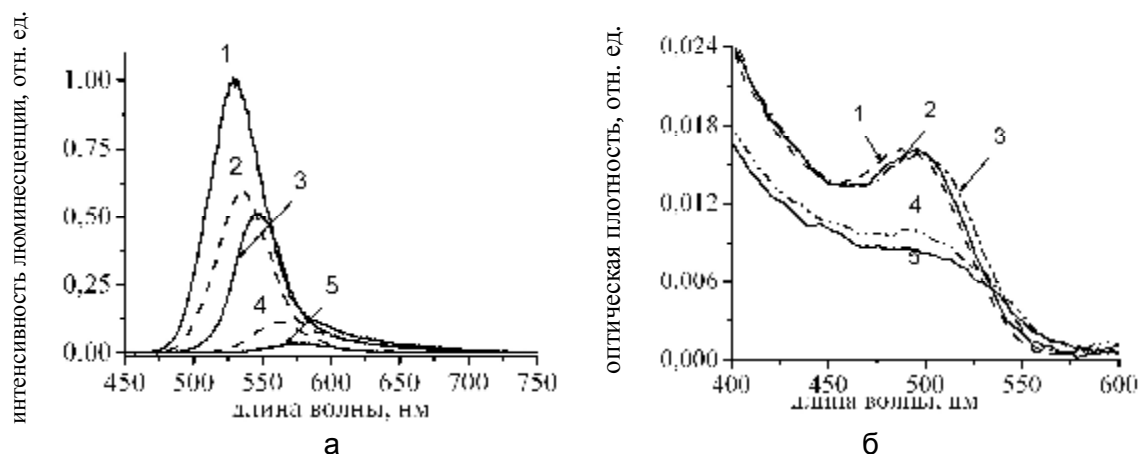


Рис. 1. Эволюция спектров люминесценции (а) и поглощения (б) раствора КТ CdTe (длина волны возбуждения люминесценции 415 нм): 1 – сразу после приготовления раствора; 2 – через 15 часов; 3 – через 23 часа; 4 – через 40 часов; 5 – через 46 часов

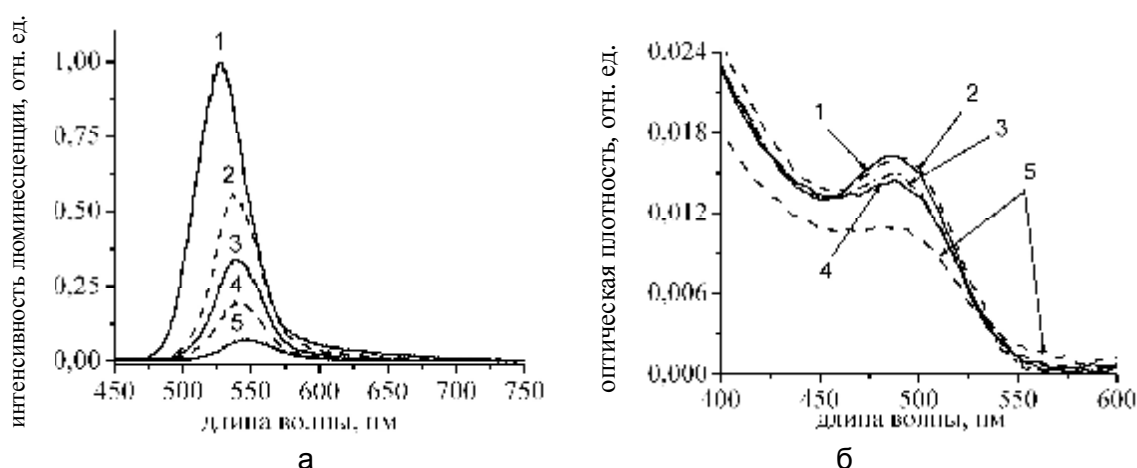


Рис. 2. Эволюция спектров люминесценции (а) и поглощения (б) раствора КТ CdTe после добавления раствора ацетата свинца (длина волны возбуждения люминесценции 415 нм): 1 – раствор КТ до добавления ионов свинца; 2 – сразу после добавления ионов свинца; 3 – через 23 часа; 4 – через 48 часов; 5 – через 170 часов

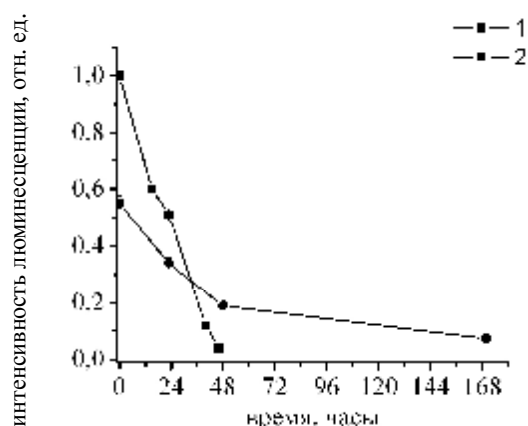


Рис.3. Эволюция люминесценции растворов CdTe КТ: 1 – раствор КТ; 2 – раствор КТ с ионами свинца. За единичную интенсивность принята интенсивность люминесценции КТ сразу после приготовления раствора

Сравнение эволюции интенсивности люминесценции растворов КТ без добавления ионов свинца и после добавления ионов свинца (рис. 3, кривые 1 и 2 соответственно) показывает, что во втором случае в растворе образуются кластеры хотя и с меньшей интенсивностью люминесценции, но значительно более устойчивые во времени. За исходную интенсивность люминесценции растворов принималась люминесценция раствора чистых КТ сразу после приготовления раствора.

Следует заметить, что сужение полосы люминесценции при практически неизменном спектре поглощения, наблюдающееся для кластеров КТ при добавлении в раствор ионов свинца (рис. 2, а) позволяет говорить о возможном наличии резонансного безызлучательного переноса энергии фотовозбуждения (Fluorescence Resonant Energy Transfer, FRET) [6] между КТ разного размера, образующими кластер. Для выяснения этого обстоятельства был проведен сравнительный анализ времени жизни люминесценции изолированных КТ и КТ, входящих в состав кластера.

Как известно [6], эффект FRET заключается в том, что энергия фотовозбужденного донора не излучается, а безызлучательно передается акцептору с последующим испусканием фотона акцептором. В результате должно наблюдаться уменьшение люминесценции донора и увеличение люминесценции акцептора.

Следует отметить, что существующие технологии синтеза полупроводниковых КТ не позволяют приготовить нанокристаллы одного размера, а лишь с некоторым распределением по размерам. Из-за разброса КТ по размерам полосы поглощения и люминесценции КТ являются неоднородно уширенными, причем КТ меньшего размера соответствует коротковолновая, а большего размера – длинноволновая область этих полос. Естественно, что и образующиеся кластеры состоят из КТ, несколько отличающихся по размерам. В нашем случае донорами в эффекте FRET являются КТ меньшего размера, а акцепторами – КТ большего размера. Уменьшение люминесценции КТ меньшего размера приводит к уменьшению интенсивности коротковолновой части полосы люминесценции, а увеличение люминесценции более крупных частиц – к возгоранию люминесценции длинноволновой части полосы, что и приводит к наблюдающемуся нами сужению и красному сдвигу полосы люминесценции кластеров, образующихся в присутствии ионов свинца.

Для получения дополнительного свидетельства наличия FRET в таких кластерах был проведен сравнительный анализ времен жизни люминесценции КТ в исходном растворе и в кластерах с помощью лазерного сканирующего люминесцентного микроскопа MicroTime100. Анализ основан на том, что наличие FRET между КТ разного раз-

мера приводит также к уменьшению времени жизни люминесценции КТ меньшего размера и увеличению времени жизни люминесценции более крупных КТ [7].

Поскольку люминесцентный микроскоп регистрирует люминесценцию в широком спектральном диапазоне, для выделения нужного участка спектра, соответствующего области люминесценции исследуемых растворов, использовались два светофильтра: фильтр ЗС-1 с полосой пропускания 480–570 нм и интерференционный фильтр с максимумом пропускания на длине волны 588 нм и шириной полосы пропускания 10 нм. Полоса люминесценции CdTe КТ полностью пропускается фильтром ЗС-1, что позволяет регистрировать среднее время жизни люминесценции всего ансамбля КТ. В то же время интерференционный фильтр вырезает узкую полосу люминесценции на 588 нм, что соответствует сигналу, идущему от наиболее крупных частиц из ансамбля КТ. На рис. 4, а, б, приведены кривые затухания люминесценции, соответствующие исходному раствору КТ и раствору кластеров соответственно.

Было найдено, что для исходного раствора CdTe КТ значение времени жизни люминесценции, зарегистрированное с помощью интерференционного фильтра ($\tau_{\text{ИФ}} = 15$ нс), достаточно близко к величине времени жизни, полученной с использованием фильтра ЗС-1 ($\tau_{\text{ЗС}} = 11$ нс). В этом случае можно сделать вывод, что КТ различных размеров имеют не сильно отличающиеся времена жизни люминесценции. В то же время обнаружено, что для раствора кластеров, образующихся в присутствии ионов свинца, $\tau_{\text{ИФ}} = 19,7$ нс, т.е. существенно больше, чем $\tau_{\text{ЗС}} = 4,6$ нс. Этот факт позволяет заключить, что КТ больших размеров (акцепторы) имеют большее время жизни люминесценции. Это, как уже было отмечено, является еще одним косвенным свидетельством наличия процессов безызлучательного переноса энергии в кластере, образуемом при самоорганизации CdTe КТ в водном растворе.

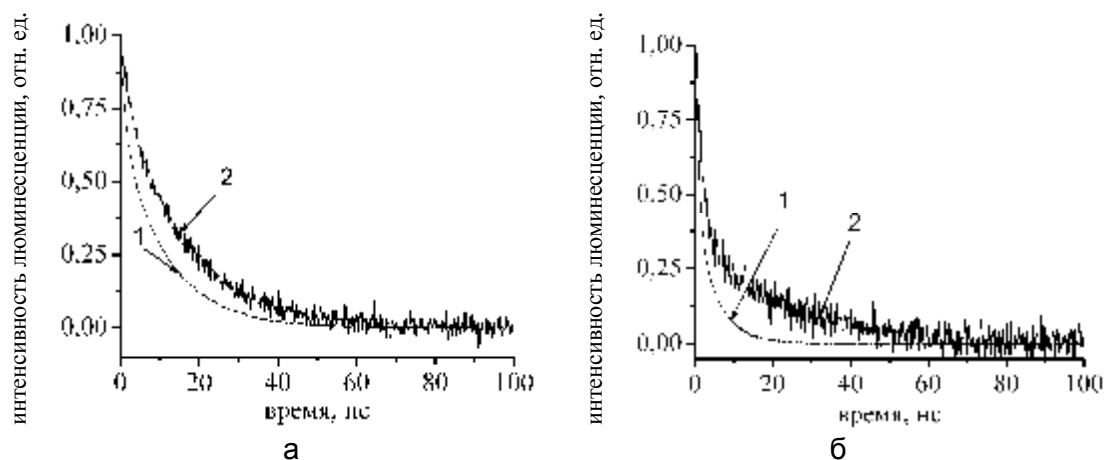


Рис. 4. Кривые затухания люминесценции раствора CdTe КТ сразу после приготовления раствора (а) и после добавления ионов свинца (б): 1 – фильтр ЗС-1; 2 – интерференционный фильтр с максимумом пропускания на длине 588 нм

Выводы

Применение методов спектрально-люминесцентного анализа позволило обнаружить образование кластеров, самоорганизованных в водном растворе из отрицательно заряженных CdTe КТ. Показано, что наличие в растворе ионов свинца стабилизирует размер кластеров в растворе и предотвращает дальнейший процесс спонтанной агрегации нанокристаллов. Анализ спектров и времени затухания люминесценции кластеров показывает наличие переноса энергии фотовозбуждения по механизму FRET между КТ различного размера, образующими кластер.

Литература

1. Родулгин В.И. Самоорганизация наночастиц на межфазных поверхностях // Успехи химии. – 2004. – Т. 73. – № 2. – С. 125–155.
2. Федоров А.В., Баранов А.В. Оптика квантовых точек // Оптика наноструктур / Под ред. Федорова А.В. – СПб: Недра, 2005. – С. 181–274.
3. Sukhanova A., Baranov A.V., Perova T.S., Cohen J.H.M. and Nabiev. I. Controlled Self-Assembly of Nanocrystals into Polycrystalline Fluorescent Dendrites with Energy-Transfer Properties // Angew. Chemie Int. Ed. – 2006. – V. 45. – № 13. – P. 2048–2052.
4. Gaponik N., Talapin D.V., Rogach A.L., Hoppe K., Shevchenko E.V., Kornowski A., Eychmuller A. and Weller H. // J. Phys. Chem. B. – 2002. – V. 106. – P. 7177.
5. W. William Yu, Lianhua Qu, Wenzhuo Guo, and Xiaogang Peng. Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals // Chem. Mater. – 2003. – V. 15. – P. 2854–2860.
6. Ермолаев В.Л., Бодунов Е.Н., Свешникова Е.Б., Шахвердов Т.А. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. – М.: Наука, 1977. – 311 с.
7. Kagan C.R., Murray C.B., Bawendi M.G. Long-range resonance transfer of electronic excitations in close-packed CdSe quantum-dot solids // Phys. Rev. – 1996. – V. 54. – P. 8633.

<i>Савельева Анна Валерьевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, anna.tomsk@gmail.com
<i>Мухина Мария Викторовна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, mmuxina@gmail.com
<i>Орлова Анна Олеговна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, udifa@mail.ru
<i>Маслов Владимир Григорьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, вед. научный сотрудник, maslov@sp.ru
<i>Баранов Александр Васильевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, начальник отдела, a_v_baranov@yahoo.com
<i>Федоров Анатолий Валентинович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. кафедрой, a_v_fedorov@inbox.ru

УДК 621.79.024

**ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОЧИПОВ
ПОСЛЕ АНАЛИЗА БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБ****А.А. Евстапов, А.Н. Тупик**

В статье обсуждаются проблемы, возникающие при реализации полимеразной цепной реакции (ПЦР) на микрочипах. Приведены результаты, полученные при использовании хромовой смеси, 1 %-го раствора гипохлорита натрия, смеси концентрированной серной кислоты с перекисью водорода (3:1) и буферного раствора ТЕ для обработки поверхности реакционной камеры после проведения ПЦР. Экспериментально подтверждено, что хромовая смесь и раствор гипохлорита натрия применимы для очистки поверхности стеклянного микрочипа.

Ключевые слова: микрочип, поверхность, полимеразная цепная реакция (ПЦР).

Введение

В современной практической медицине все большее внимание уделяется методам ДНК-диагностики, среди которых наиболее распространенным и известным является метод амплификации ДНК – полимеразная цепная реакция (ПЦР). ПЦР позволяет увеличить число копий определенных фрагментов ДНК в искусственных условиях, что значительно упрощает изучение генного материала. Применение ПЦР особенно эффективно при обнаружении трудно культивируемых в лабораторных условиях микроорганизмов, анализе исходно малого количества генного материала, анализе особо опасных инфекций. ПЦР применяется в научных исследованиях при клонировании и секвенировании ДНК, в криминалистике и судебной медицине («генетические отпечатки пальцев», установление отцовства), при определении генетически модифицированных продуктов, исследовании ископаемых останков живых существ и т.п.

Метод ПЦР основан на применении специального термостабильного фермента ДНК-полимеразы, выделенного из бактерий, живущих в горячих источниках. Этот фермент способен наращивать короткие цепочки ДНК (называемые праймерами), если они связаны с более длинной «матричной» цепью ДНК [1].

Для проведения ПЦР необходимо нагревать реакционную смесь согласно специальному циклическому температурному режиму, который задает условия протекания процессов копирования фрагментов ДНК. Под действием последовательных изменений температуры двухцепочные молекулы ДНК расплетаются (денатурация), к ним присоединяются праймеры (процесс носит название «отжиг»), после чего полимераза начинает достраивать вторую цепь ДНК из мономеров (элонгация) [2]. В дальнейшем этапы денатурации, отжига и элонгации многократно повторяются (30 и более раз), и на каждом цикле количество синтезированных копий фрагмента ДНК удваивается.

Техническая реализация ПЦР

Для проведения ПЦР производится коммерческое оборудование, ориентированное на выполнение реакции в полимерных пробирках (объемом от 0,2 до 0,5 мл) или планшетах (96 и 384 луночные планшеты с максимальным объемом одной лунки 40 и 300 мкл соответственно) [3]. Однако наиболее перспективным является реализация ПЦР на основе миниатюрных устройств – микрочипов. Достоинствами микрочиповых систем являются: значительное сокращение объема реакционной смеси; малые габариты приборов; возможность создания автоматизированных микросистем, объединяющих все стадии анализа (подготовка пробы, амплификация и последующий компонентный

анализ) на базе одного чипа. Уменьшение объема реакционной смеси (до нанолитров) позволяет повысить скорость изменения температуры в растворе, что сокращает продолжительность ПЦР. Применение портативных автоматизированных микроаналитических систем наиболее выгодно при анализе токсичных и особо опасных биологических веществ, для создания систем экспресс-анализа и др.

В настоящее время существует два основных подхода к реализации ПЦР на микрочипе [4]. В первом случае изменение температуры происходит за счет последовательного нагрева и охлаждения реакционной смеси в стационарной микрокамере. Оригинальной модификацией этого подхода является проведение ПЦР в так называемой виртуальной камере, когда капля реакционной смеси инкапсулирована в небольшом объеме минерального масла [5]. Это приводит к значительному сокращению нагреваемого объема, что позволяет существенно увеличить скорость ПЦР. Недостатком данной системы является проницаемость масляной оболочки для компонентов смеси и большая вероятность перекрестного переноса анализируемых образцов (контаминация). Другой подход заключается в разделении микрочипа на области, в которых поддерживается постоянная температура, при этом реакционная смесь движется по микроканалам из одной области в другую и нагревается, проходя соответствующие температурные зоны. Нагрев жидкости в канале происходит гораздо быстрее, чем в стационарной камере [6]. Однако в этом случае необходимы вспомогательные устройства для создания стабильных регулируемых высокоскоростных потоков в каналах.

Характерной особенностью микроструктур является высокое соотношение площади поверхности к объему. Например, для канала микрофлюидного чипа отношение площадь/объем превышает 100. Поэтому при проведении исследований на микрочипе необходимо учитывать влияние поверхностных свойств материала на аналитический сигнал. При создании микрочипа для ПЦР большое значение уделяется теплопроводности и химической инертности материала реактора. Однако существующие методы обработки поверхности (пассивация нанесением специальных полимерных покрытий) и возможность создания гибридных микрочипов (из двух и более материалов) значительно расширяют диапазон применяемых материалов. Существенными факторами становятся стоимость изготовления, а также затраты на технологии создания и герметизации микроструктур.

Обычно микрочипы изготавливают из кремния, стекла или полимеров. Каждый из этих материалов обладает различными свойствами, следовательно, имеет свои достоинства и недостатки [2]. Коэффициент теплопроводности стекла ниже, чем у кремния, но его вполне достаточно для обеспечения быстрого изменения температуры. Кроме того, стекла являются оптически прозрачными диэлектриками, что позволяет использовать оптические методы детектирования и электрокинетические методы анализа. Поверхность стекла в меньшей степени ингибирует ПЦР по сравнению с кремнием, который необходимо предварительно обрабатывать.

Постановка задачи

На базе Института аналитического приборостроения РАН созданы прототипы чипов для ПЦР, представляющие собой герметично соединенные стеклянные пластины, в одной из которых сформированы отверстия (лунки) диаметром 2,5 мм. Герметизация микрочипа осуществлялась посредством термического связывания (спекания), обеспечивающего прочность и долговечность соединения, а также однородность состава поверхностного слоя микроструктур. Применение оптически прозрачных полимерных фотоотверждаемых композиций (ФОК) позволяет снизить трудоемкость процесса герметизации микрочипа, но в этом случае необходим подбор композиций, обеспечивающих биохимическую нейтральность полимера в процессе реакции.

Так как стеклянные микрочипы являются достаточно дорогостоящими изделиями, то предполагается их многократное использование при анализе. Это подразумевает необходимость обработки чипа после ПЦР. Поэтому важным является выбор эффективного метода очистки поверхности микрочипа от продуктов реакции.

Задачами исследования являлись: (1) отработка методики очистки поверхности стеклянных чипов от минерального масла; (2) удаление остатков реакционной смеси после проведения ПЦР; (3) выбор растворов, пригодных для очистки чипов, герметизированных ФОК.

Обычно для очистки поверхности чипа от минерального масла достаточно применения слабых растворов щелочи (мыльный раствор), что сочетается с последующей обработкой поверхности микрочипа более сильными химическими реагентами для удаления остатков биологических комплексов реакционной смеси.

Выбор процедур очистки реакционной камеры ПЦР от компонентов реакционной смеси зависит от применяемого материала и, в том числе, определяется способом герметизации микрочипа. Обычно для дезактивации фрагментов ДНК применяют прокаливание (нагрев выше 100°C), УФ облучение и обработку химическими растворами, разрушающими ДНК и органические соединения реакционной смеси. Облучение УФ является наиболее распространенным способом борьбы с загрязнениями в ПЦР-лабораториях. Рабочие поверхности и оборудование до и после работы с генным материалом подвергаются облучению ультрафиолетовыми лучами с максимумом излучения в области 260 нм [7]. Но применение УФ облучения для очистки микрочипов ограничено характеристиками применяемых материалов, так как не все стекла прозрачны в данном диапазоне. Денатурация ДНК посредством нагрева смеси выше 100°C осуществляется под давлением (автоклав). Однако при работе с микрочипами возникают трудности, связанные с реализацией стабильных конвекционных потоков жидкости в микроканалах чипа.

Для стеклянных микрочипов выбор химических методов очистки является наиболее приемлемым. В лабораторной практике для дезактивации ДНК обычно применяют растворы на основе концентрированной серной кислоты, раствор гипохлорита натрия, хлорной извести, хлорамина, смесь метанола и соляной кислоты и др. [7]. В данной работе для очистки стеклянной поверхности микрочипов использовались химические растворы на основе концентрированной серной кислоты (раствор бихромата калия и смесь с перекисью водорода), а также раствор гипохлорита натрия и буферный раствор ТЕ.

Хромовая смесь (5 %-й раствор бихромата калия в концентрированной серной кислоте) является одним из лучших моющих средств, обладает сильным окислительным действием [8] и рекомендована для обработки стеклянных пробирок при работе с генным материалом [9]. Раствор концентрированной серной кислоты и перекиси водорода в соотношении 3:1 (подобные растворы носят название «пиранья») применяется для очищения поверхностей кварца и стекол от органических загрязнений [9].

Гипохлорит натрия (раствор натриевой соли хлорноватистой кислоты) в слабых концентрациях сохраняет окислительные свойства и бактерицидную активность и рекомендован для очистки загрязненных поверхностей в ПЦР-лабораториях [3]. Для исследований был выбран 1%-й раствор гипохлорита натрия, который является наиболее стабильным и комфортным для практической работы.

Буферный раствор ТЕ (0,01 М трис-НСl pH 7,8; 0,01 М ЭДТА) используется при работе с генетическим материалом для удаления фрагментов ДНК со стеклянной поверхности [3].

Для проведения экспериментальных исследований была выбрана следующая последовательность операций: (1) проведение ПЦР в реакционной камере микрочипа с добавлением ДНК-мишени (положительный контроль), (2) очистка поверхности чипа

от органических компонентов при помощи выбранного химического средства, (3) проведение ПЦР без добавления ДНК (отрицательный контроль).

В работе использовали комплекты реактивов, предназначенные для проведения ПЦР в реальном времени (научно-производственная компания СИНТОЛ, г. Москва). Исходная концентрация ДНК-мишеней в реакционной смеси составляла 10^6 копий/мкл. С целью предотвращения испарения раствор в лунке покрывали небольшим количеством минерального масла (4 мкл). Циклический нагрев и регистрацию ПЦР проводили с помощью прототипа анализатора нуклеиновых кислот, разработанного для микрочипов (АНК-4а, ИАНП РАН), с флуоресцентным детектором (длины волны возбуждения 470, 530, 590 и 625 нм).

В процессе ПЦР в реакционной смеси образуются флуоресцентно-меченные копии заданного фрагмента ДНК, при этом изменение интенсивности флуоресценции в процессе циклического нагрева позволяет наблюдать накопление продукта реакции в режиме реального времени. Зависимость изменения интенсивности флуоресценции (F) при ПЦР в процессе циклического нагрева представлена на рис. 1 (положительный контроль), на ней можно выделить стадию инициации и экспоненциальную стадию. Накопление продукта реакции происходит в геометрической прогрессии, однако на начальных этапах аналитический сигнал значительно меньше фонового. На второй стадии наблюдается экспоненциальная зависимость интенсивности флуоресценции от количества циклов нагрева, что свидетельствует об увеличении продукта реакции – меченных флуоресцентным зондом фрагментов ДНК-мишени. После 35–40 циклов нагрева возможно появление третьей стадии – плато, для которой характерно слабое изменение аналитического сигнала.

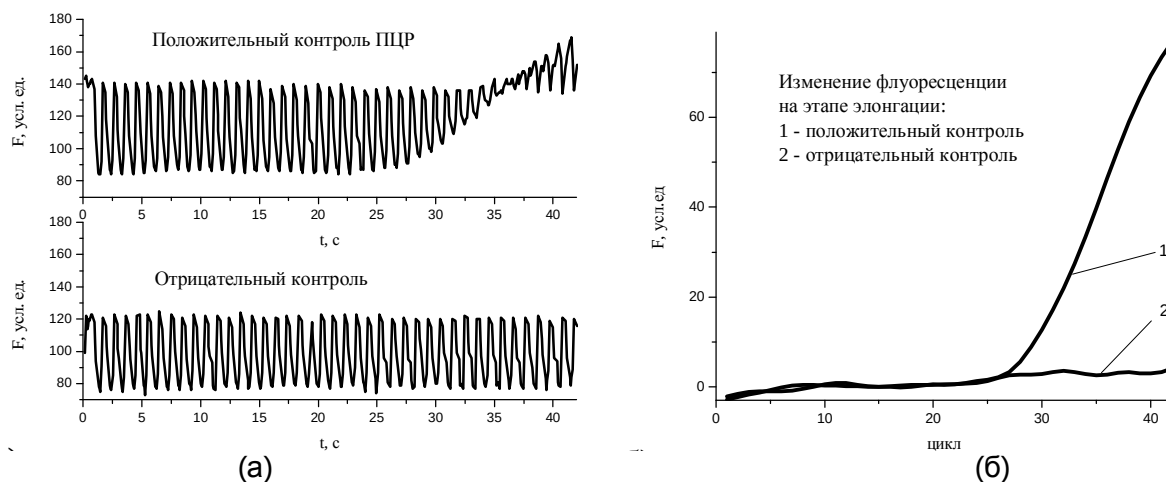


Рис. 1. (а) Экспериментально полученные зависимости интенсивности флуоресценции при циклическом нагреве реакционной смеси с фрагментом ДНК (положительный контроль) и без ДНК (отрицательный контроль). (б) Зависимость изменения флуоресценции (на этапе элонгации) от количества циклов ПЦР при положительном и отрицательном контролях

Результаты и обсуждение

Предварительные результаты показали, что при отрицательном контроле на микрочипе, промытом буферным раствором ТЕ, наблюдается экспоненциальное увеличение интенсивности флуоресценции на этапе элонгации, характерное для ПЦР. Можно предположить, что даже после обработки буферным раствором на стеклянной поверхности микрочипа присутствуют биологически активные комплексы. Следовательно, применения буферного раствора ТЕ недостаточно для очищения поверхности стеклянного чипа.

Стабильные и воспроизводимые результаты получены на микрочипе, обработанном хромовой смесью (рис. 2, зависимость 1). После 27-го цикла наблюдается изменение величины сигнала флуоресценции, что свидетельствует об увеличении количества анализируемых фрагментов ДНК.

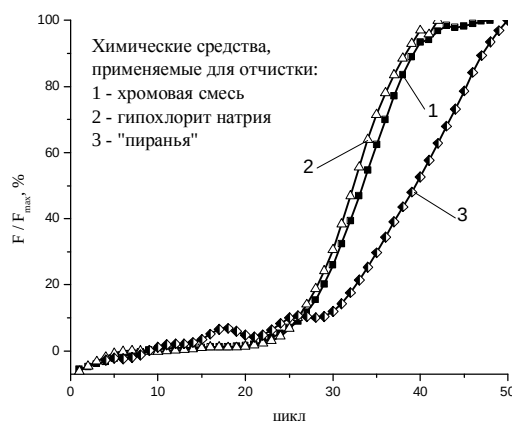


Рис. 2. Нормированные графики зависимости изменения флуоресценции во времени при проведении ПЦР в микрочипах, обработанных разными химическими растворами: 1 – хромовой смесью; 2 – раствором гипохлорита натрия; 3 – смесью концентрированной серной кислоты и перекиси водорода («пиранья»)

Аналогичные результаты получены на стеклянном микрочипе, обработанном раствором гипохлорита натрия (рис. 2, зависимость 2).

Раствор концентрированной серной кислоты и перекиси водорода отчищает стеклянную поверхность микрочипа от органических загрязнений, что подтверждено отрицательным контролем. Однако наблюдается изменение характера зависимости интенсивности флуоресценции при проведении ПЦР (рис. 2, зависимость 3), что, по-видимому, означает влияние данной смеси на поверхностные свойства микрокамеры. В этом случае для получения однозначных выводов необходимо провести дополнительные исследования.

Полученные результаты свидетельствуют, что 5%-й раствор бихромата калия в концентрированной серной кислоте (хромовая смесь) и 1%-й раствор гипохлорита натрия можно использовать для удаления остатков реакционной смеси с поверхности стеклянных микрочипов, герметизированных методом термического связывания.

Для микрочипов, герметизированных с помощью фотоотверждаемых композиций (ФОК), не рекомендуется применение хромовой смеси, так как сильное окислительное действие концентрированной серной кислоты может привести к разгерметизации микрочипа. Раствор гипохлорита натрия при малых концентрациях в меньшей степени воздействует на поверхность полимерных материалов и подходит для очистки поверхности микрочипа от биологических загрязнений. Следовательно, можно рекомендовать 1%-й раствор гипохлорита натрия для очистки микрочипов, герметизированных ФОК.

Заключение

Сочетание физико-химических свойств (оптическая прозрачность, теплопроводность, химическая инертность) стекла делает его привлекательным для использования в качестве материала при создании микрочипов для полимеразной цепной реакции (ПЦР). Так как стеклянные микрочипы являются достаточно дорогостоящими изделиями, то предполагается их многократное использование при анализе, что подразумевает необходимость эффективной очистки поверхности стекла от реакционной смеси после проведения реакции.

Для очистки реакционной камеры после проведения ПЦР на стеклянных микро-чипах поверхность обрабатывали следующими химическими средствами: 5%-м раствором бихромата калия в концентрированной серной кислоте (хромовая смесь), 1%-м раствором гипохлорита натрия, смесью концентрированной серной кислоты с перекисью водорода (3:1) и буферным раствором ТЕ. Выбрана следующая последовательность действий: (1) проведение ПЦР в реакционной камере микрочипа с добавлением фрагментов ДНК, (2) очистка поверхности чипа от минерального масла и органических компонентов реакционной смеси, (3) проведения ПЦР без ДНК-мишени.

Экспериментально подтверждено, что хромовая смесь и раствор гипохлорита натрия применимы для очистки поверхности стеклянных микрочипов.

Раствор гипохлорита натрия при малых концентрациях в меньшей степени воздействует на поверхность полимерных материалов и при этом подходит для очистки поверхности стеклянных микрочипа от биологических загрязнений. Следовательно, этот раствор можно рекомендовать для очистки микрочипов, герметизированных полимерными композициями.

Литература

1. Мюллис К. Необычная история о том, как родилась полимеразная цепная реакция // В мире науки. – 1990. – № 6. – С. 26–35.
2. Рудницкая Г.Е., Евстапов А.А, Микрочиповые устройства для полимеразной цепной реакции. Ч. 1. Основные принципы ПЦР; конструкция и материалы микрочипов // Научное приборостроение. – 2008. – Т. 18. – № 3. – С. 97–114.
3. Гипертекстовая база данных «Практическая молекулярная биология» / рук. Краснов А. – № 0220006875 в Госрегистре баз данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://molbiol.edu.ru/index.html>, свободный.
4. Huikko K., Kostianen R., Kotiaho T. Introduction to micro-analytical systems: bioanalytical and pharmaceutical applications // European journal of pharmaceutical sciences. – 2003. – № 20. – P. 149–171.
5. Neuzil P., Pipper J., Hsieh T.M. Disposable real-time microPCR device: lab-on-a-chip at a low cost // Molecular BioSystems. – 2006. – № 2. – P. 292–298.
6. Zhang C., Xing D. Miniaturized PCR chips for nucleic acid amplification and analysis: latest advances and future trends // Nucleic Acids Research. – 2007. – V. 35. – № 13. – P. 4223–4237.
7. Антонов Б.И. Правила проведения работ в диагностических лабораториях, использующих метод полимеразной цепной реакции (основные положения) №13–7–2/840 – М.: Минсельхозпрод РФ, 1997 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mcpx.ru/base_gvc/vetzac/document/204.html, свободный.
8. Коростелев П.П. Приготовление растворов для химико-аналитических работ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1964. – 400 с.
9. Zhuang G., Jin Q., Liu J., Cong H., Liu K., Zhao J., Yang M., Wang H A low temperature bonding of quartz microfluidic chip // Biomed Microdevices. – 2006. – № 8. – P. 255–261.

Евстапов Анатолий Александрович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, an_evs@mail.ru

Тупик Александра Николаевна

– Институт аналитического приборостроения РАН, аспирант, tunix@yandex.ru

УДК 535.211

СРАВНЕНИЕ СХЕМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ВЫТЯЖКИ НАНОПИПЕТОК И НАНОЗОНДОВ

В.Н. Матыжонок, А.А. Петров

Во многих областях науки требуется либо получить данные об объекте с наноразмерным разрешением, либо произвести с ним какие-то действия с нанометровой точностью. В данной статье рассмотрены две схемы для лазерной вытяжки нанопипеток и нанозондов, предложенные и используемые на кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения СПбГУ ИТМО. Проведено сравнение этих схем по техническим данным, а также по удобству использования. Даны результаты вытяжки, полученные на данных схемах.

Ключевые слова: нанозонд, СЗМ, лазерная вытяжка, зондовая микроскопия, нанопипетка, оптическое волокно.

Введение

Во многих областях современной науки требуется получить данные о различных физических, электрических, химических свойствах объектов, установить их геометрические характеристики, исследовать рельеф поверхности с микро- и наноразмерным разрешением. Также возникают задачи локального изменения свойств или геометрии поверхности объектов. Решить данные задачи с требуемой точностью позволяют, в том числе, методы сканирующей зондовой микроскопии.

Существует множество различных методов сканирующей зондовой микроскопии. Основным элементом в данных методах является зонд, и решающее значение для разрешения в большинстве случаев имеют характеристики острия зонда. Поэтому важную роль играет оптимизация существующих типов зондов, а также разработка и исследования новых типов зондов. На кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения СПбГУ ИТМО были разработаны и опробованы различные схемы для лазерного изготовления различных типов зондов для силовой зондовой микроскопии. В данной работе проводится анализ схем для лазерной вытяжки с вращением заготовки и схемы с использованием тороидального зеркала, оказавшихся наиболее перспективными.

Лазерная установка для вытяжки с вращением заготовки

Процесс лазерной вытяжки нанопипеток и нанозондов основан на том, что при поглощении лазерного излучения нагревается малый участок оптического волокна (или стеклянного капилляра). К концам волокна прикладывается растягивающее механическое усилие. При увеличении температуры разогреваемого участка волокна происходит уменьшение его вязкости, в результате чего на этом участке происходит растяжение волокна, его диаметр уменьшается с последующим обрывом и образованием зонда на концах волокна.

Схема для лазерной вытяжки с вращением заготовки исторически появилась раньше схемы с тороидальным зеркалом. Она может использоваться для лазерной вытяжки различных элементов (нанопипеток, нанозондов), а также для создания сферических торцевых элементов и изготовления кантилеверов [1].

Схема установки для лазерной вытяжки наноинструментов представлена на рис. 1. Излучение CO₂ лазера перенаправляется глухим зеркалом, фокусируется линзой и попадает на заготовку. Заготовка закреплена в подвижных суппортах. Мотор через гибкие передачи передает крутящий момент на суппорты, которые обеспечивают вращение заготовки. Также к суппортам приложено усилие, направленное на разрыв заготовки. Заготовка под действием лазерного излучения локально нагревается, растягивается, од-

новременно сужаясь в зоне нагрева. В некоторый момент происходит разрыв заготовки. При правильном подборе параметров воздействия получается 1 или 2 наноинструмента.

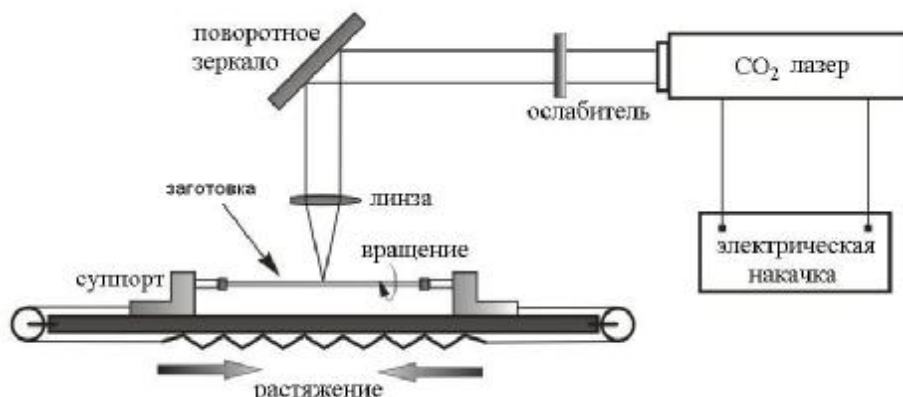


Рис. 1. Схема лазерной установки для вытяжки с вращением заготовки [1]

В качестве основного лазера используется непрерывный отпаянный СО₂ лазер с продольным разрядом. Длина волны излучения 10,6 мкм. Размер пятна излучения на выходе из лазера составляет 6 мм, расходимость излучения составляет 4 мрад. Лазер генерирует излучение мощностью до 21 Вт. Излучение фокусируется ZnSe линзой с фокусным расстоянием 75 мм. Схема позволяет создать зону воздействия размером до 300 мкм с плотностью мощности до 300 Вт/мм². Для создания равномерной зоны нагрева заготовка вращается вокруг своей оси. Вращение осуществляется электромотором и передается на суппорты через гибкую передачу. В связи с хрупкостью заготовки большую роль играет синхронность начала вращения.

Данная схема обладает следующими достоинствами:

- простота юстировки – необходима юстировка только двух оптических элементов (плоского поворотного зеркала для обеспечения нормального падения излучения на заготовку и сферической линзы, предназначенной для обеспечения необходимой плотности мощности в зоне воздействия);
- возможность управлять размером зоны воздействия, перемещая линзу вдоль оси излучения;
- возможность изменения плотности мощности излучения на заготовке как за счет мощности излучения лазера, так и за счет размера зоны облучения (путем перемещения линзы). При этом изменяется температура, достигаемая в зоне обработки, а, следовательно, и характеристики получаемых зондов.

Однако вместе с тем данная схема обладает и рядом недостатков:

- требуется высокая точность синхронизации запуска и вращения заготовки в обоих суппортах. При невыполнении этого условия может происходить как облом заготовки в момент начала вращения, так и перекручивание получаемого в результате обработки острия наноинструмента;
- так как зона воздействия – не сплошная, а соответствует перемещающемуся по поверхности источнику (из-за чего не обеспечивается равномерный нагрев со всех сторон), то в полученных образцах может наблюдаться осевая несимметрия острия (см. рис. 2).

Результат вытяжки структурированного волокна на такой установке представлен на рис. 3. Диаметр острия равен 629,5 нм.

Для решения указанных проблем была предложена схема для вытяжки с использованием тороидального зеркала.

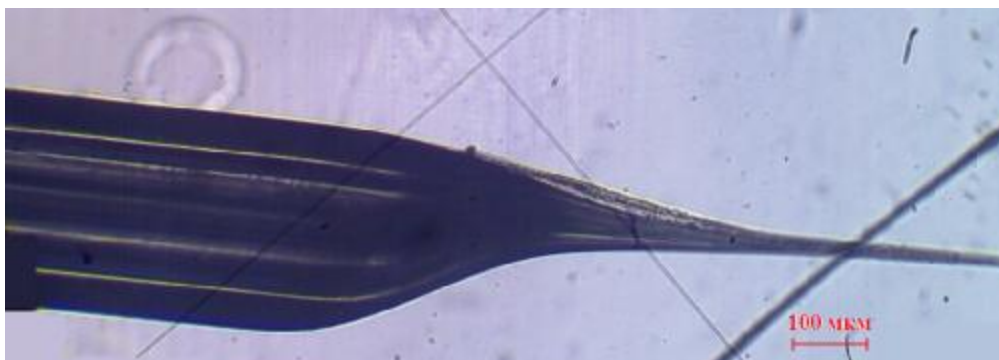


Рис. 2. Микрофотография структурированного волокна с нарушением осевой симметрии

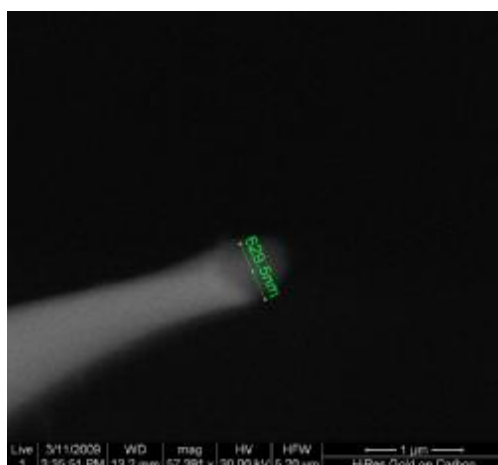


Рис. 3. Изображение на электронном микроскопе острия структурированного волокна, вытянутого на установке с вращением заготовки

Лазерная установка для вытяжки с тороидальным зеркалом

Данная схема появилась как развитие схемы со сферическим зеркалом. В начальном варианте вместо тороидального зеркала было установлено сферическое, однако в этом случае излучения падало на заготовку под углом, и в процессе изготовления получалось два разных образца. Только один из них отвечал требованиям по форме и размеру острия [1].

Схема установки представлена на рис. 4. Излучение лазера перенаправляется глухим зеркалом, проходит затвор, позволяющий оперативно перекрывать излучение, приводится коническим элементом. Далее излучение перенаправляется на тороидальное зеркало еще одним глухим зеркалом, имеющим отверстие для прохода заготовки. Тороидальное зеркало фокусирует излучение в зону обработки, причем схема настроена так, что излучение на заготовку падает перпендикулярно, позволяя получать два идентичных наноинструмента.

В схеме используется импульсный CO_2 лазер фирмы SYNRAD (частота генерации до 20 кГц). Он позволяет получать излучение мощностью до 10 Вт. Расходимость излучения составляет 4 мрад. Оптическая схема позволяет создать размер фокусного пятна 40 мкм и глубину фокуса 1,5 мм, однако, учитывая расходимость лазера, реально можно получить размер пятна в фокусе 200 мкм [2]. Из-за больших, чем в предыдущей схеме, потерь на оптических элементах достижимая плотность мощности составляет $10,6 \text{ Вт/мм}^2$. В данном случае заготовка не вращается, что накладывает меньшие требования на соосность суппортов.

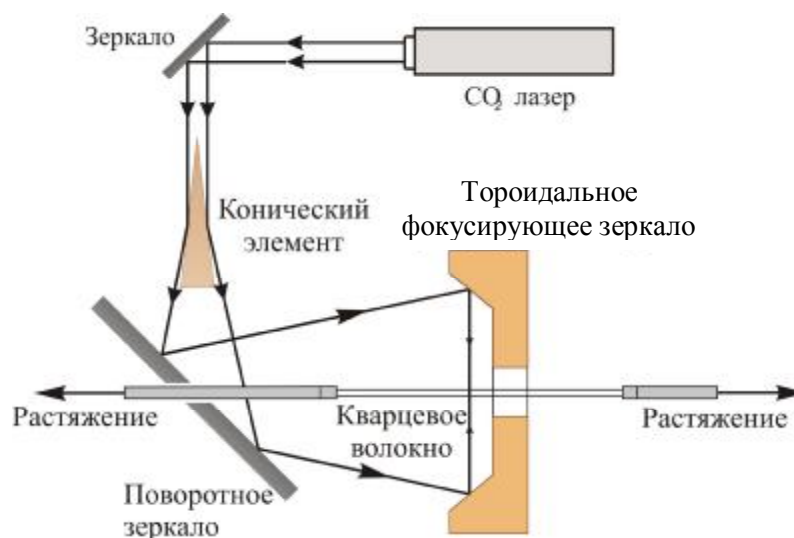


Рис. 4. Схема лазерной установки для вытяжки с тороидальным зеркалом [1]

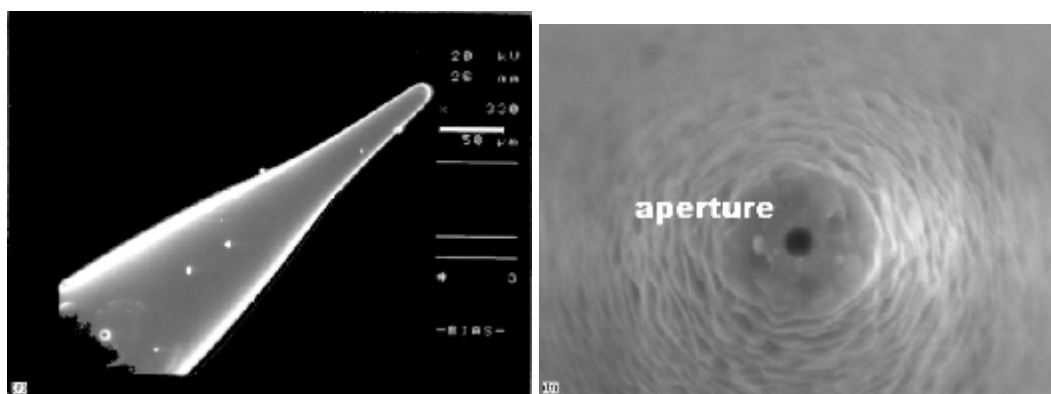


Рис. 5. SEM фотография ближнепольного зонда, полученного на схеме для вытяжки с тороидальным зеркалом [3]

Данная схема обладает следующими достоинствами.

- Оптическая схема создает кольцевую зону обработки, благодаря чему обеспечивается равномерный нагрев заготовки со всех сторон, что позволяет избежать осевой асимметрии.
- Излучение падает на заготовку перпендикулярно, что позволяет из одной заготовки изготавливать сразу два идентичных нанoinструмента.
- Точность изготовления выше, чем в предыдущей схеме.

Вместе с тем у нее есть и недостатки:

- сложность юстировки;
- невозможность регулировать размер зоны воздействия;
- плотность мощности излучения в зоне воздействия регулируется только мощностью излучения лазера;
- менее эффективное использование мощности лазера (при одинаковой мощности излучения лазера создается меньшая плотность мощности излучения за счет большей площади воздействия)

Результат полученного на данной установке ближнепольного оптического зонда представлен на рис. 5 [3].

Выводы

Рассмотренные выше схемы могут применяться для создания различных типов инструментов для зондовой микроскопии. Однако каждая схема обладает своими особенностями.

Схема для лазерной вытяжки с вращением заготовки требует большей точности юстировки механических элементов, однако позволяет создавать большую плотность мощности в зоне обработки. Размер зоны обработки можно легко изменять простым перемещением линзы. Такая схема может применяться для создания зондов на основе нанопипеток, металлостеклянных зондов, а также кантилеверов.

Схема для лазерной вытяжки на основе тороидального зеркала создает кольцевую зону обработки. В связи с этим, при прочих равных условиях, площадь облучаемой зоны получается больше, а плотность мощности – меньше. Вместе с тем точность изготовления у этой схемы выше. Установка требует более сложной юстировки оптических элементов, но, вместе с тем, накладывает меньше требований на соосность суппортов благодаря тому, что заготовка не вращается, а только растягивается. Недостатком этой схемы является невозможность изменения размеров зоны обработки. Такая схема может применяться для создания зондов на основе различных типов волокон.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение».

Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору В.П. Вейко и д.т.н., профессору Е.Б. Яковлеву за ценную помощь в работе и написании статьи, а также Зыонг Ван Зунгу за предоставленные материалы и результаты.

Литература

1. Зыонг Ван Зунг. Исследование лазерного формирования комбинированных нанозондов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 19 с.
2. Математическое моделирование процесса лазерной вытяжки микропипеток / Зыонг Ван Зунг [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46. – № 6. – С. 42–45.
3. Veiko V.P., Voznesensky N.B., Voronin Y.M., Voznesenskya N.N., Markovkina N.N., Chuiko V.A. Laser-based micropipettes: design, technology and applications // SPIE. – 2000. – V. 4157. – P.174–182.

Матыжонок Виктор Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Victoor@yandex.ru

Петров Андрей Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, aa_petrov@lastech.ifmo.ru

УДК 621.373: 535

НЕАДИАБАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЯРИТОННЫХ ЛАЗЕРАХ

Р.М. Архипов, В.С. Егоров, И.А. Чехонин

В настоящее время большой интерес вызывает возможность создания поляритонных лазеров при комнатных температурах. Механизм генерации таких систем основан на представлениях о поляритонах – квазичастицах, которые являются суперпозицией фотона с каким-либо резонансным возбуждением состояния вещества при условии сильной связи между электромагнитным полем и веществом. Предложен новый эффективный неадиабатический способ возбуждения поляритонных лазеров с помощью лазерного излучения в режиме фазовой синхронизации мод (FM mode-locking), исследованы их нелинейные свойства.

Ключевые слова: поляритон, поляритонный лазер, сильная связь.

Введение

Среди новых источников света у исследователей в оптоинформатике особый интерес вызывают поляритонные лазеры. Эти устройства на основе экситонных переходов в квантовых ямах или точках, помещенных в микрорезонатор, могут иметь широкое применение в оптоэлектронике. В связи с этим проводится интенсивное исследование таких систем. Возможность получения генерации излучения с использованием поляритонов была показана в работах [1–3]. Механизм генерации связан с четырехфотонным рассеянием одиночного фемтосекундного лазерного импульса накачки. В работах [4, 5] рассматривается механизм возникновения квазиравновесного конденсата поляритонов как следствие термализации газа поляритонов при рассеянии поляритонов на фононах и столкновениях с экситонами.

Ранее эффект поляритонной генерации наблюдался в лазерной физике, в газовой фазе в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии. Он был назван эффектом «конденсации» спектра или «автозахватом частоты» [6–8, 12–15]. Эффект возникает при условии сильной связи (strong coupling) между электромагнитным полем и веществом в резонаторе лазера, содержащем ячейку с поглощающим веществом, имеющим узкие линии поглощения. Явление заключается в том, что при выполнении ряда условий возникает сильное когерентное излучение вблизи линии поглощения (рис. 1). Эффект объясняется на основе полуклассического подхода, в котором используется система уравнений Максвелла–Блоха [6, 7]. Ранее этот подход применялся при анализе эффектов сверхизлучения в инвертированных протяженных средах [9].

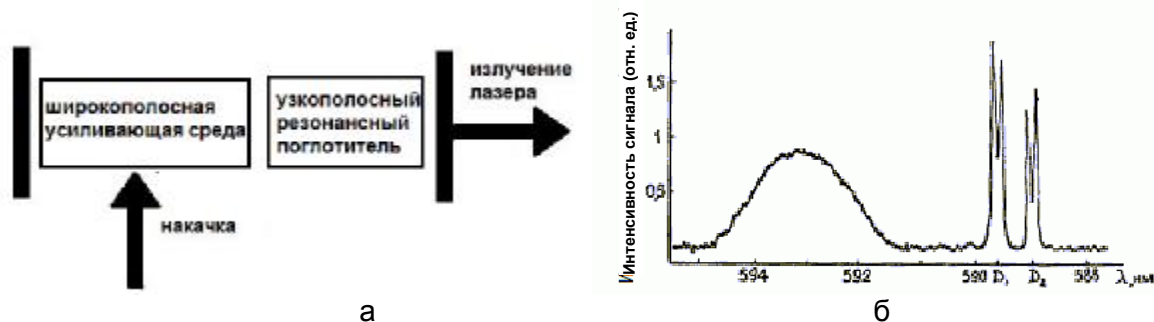


Рис. 1. Эффект «конденсации» спектра: (а) схема эксперимента; (б) спектр «конденсации» в генерации лазера на красителях с резонансно поглощающими парами натрия в резонаторе. Отчетливо виден дублет «конденсации» вблизи каждой из двух линий натрия D1 и D2

В настоящее время используются очень неэффективные, на наш взгляд, способы возбуждения генерации в поляритонных лазерах с помощью одиночных импульсов лазерного излучения. На основе полуклассического подхода нами предлагается новый, более эффективный, способ возбуждения поляритонных мод в оптических микрорезонаторах с помощью излучения, периодически модулированного по фазе.

В данной работе были рассмотрены следующие задачи:

- выполнено исследование поляритонных мод резонатора, их нелинейных свойств и времен жизни. Эти моды возбуждаются источником заданной поляризации Ps ;
- рассмотрен новый механизм возбуждения поляритонной генерации при накачке системы двухуровневых частиц с помощью излучения лазера с фазовой синхронизацией мод (FM mode-locking) на основе анализа связанной системы – мода резонатора и ансамбль двухуровневых частиц. Рассмотрение одномодовой задачи оправдано тем, что микрорезонаторы, используемые в оптоинформационных поляритонных лазерах, имеют размеры порядка длины световой волны.

Эти задачи решаются с помощью численного решения системы уравнений Максвелла–Блоха, которая имеет вид [10, 16, 17]

$$\frac{d^2}{dt^2} E + \frac{1}{\tau} \cdot \frac{dE}{dt} + \omega_r^2 \cdot E = -4\pi \cdot \frac{d^2}{dt^2} P, \quad (1.1)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} P + \frac{2}{T_2} \cdot \frac{dP}{dt} + \omega_{12}^2 \cdot E = \frac{2 \cdot \omega_{12} d_{12}^2}{\hbar} \cdot E(t) \cdot N(t), \quad (1.2)$$

$$\frac{dN}{dt} + \frac{1}{T_1} \cdot (N - N_0) = -\frac{2}{\hbar \cdot \omega_{12}} \cdot E(t) \cdot \frac{dP}{dt}. \quad (1.3)$$

Здесь $E(t)$ – напряженность электрического поля в резонаторе, $P(t)$ – поляризация, $N(t)$ – разность заселенностей, τ – время жизни излучения в резонаторе, ω_r – частота резонатора, ω_{12} – частота резонансного перехода вещества, T_1 – время релаксации разности заселенностей, T_2 – время релаксации поляризации, d_{12} – дипольный момент перехода, N_0 – разность заселенностей при отсутствии электрического поля.

Возбуждение поляритонных мод источником с заданной поляризацией

Уравнения (1.1)–(1.2) описывают колебания двух связанных осцилляторов – $E(t)$ и $P(t)$. Собственные частоты такой системы и есть частоты поляритонных мод резонатора, которые в линейном случае ($N=N_0$) даются выражением

$$\Omega_{\pm} = \frac{1}{2} \left[(\omega_r + \omega_{12}) + \left(\frac{1}{2\tau} + \frac{1}{T_2} \right) i \pm \sqrt{(\omega_r - \omega_{12})^2 + 4\omega_{coop}^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right)^2 + (\omega_r - \omega_{12}) \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right) i} \right]. \quad (1.4)$$

Здесь ω_{coop} – кооперативная частота среды [6–8]:

$$\omega_{coop} = \sqrt{2\pi\omega_{12} \frac{d_{12}^2}{\hbar} N_0}. \quad (1.5)$$

Условие критической связи между $E(t)$ и $P(t)$ определяет условие сильной связи поля и вещества (strong coupling) [6–8] и задается неравенством

$$\omega_{coop} \gg \frac{1}{4} \left| \frac{1}{\tau} - \frac{2}{T_2} \right|. \quad (1.6)$$

При $\omega_r = \omega_{12}$, как следует из (1.4), $\text{Re}(\Omega_{\pm}) = \omega_{12} \pm \omega_{coop}$.

Переходя к медленным амплитудам $E(t)$ (1.7) и $P(t)$ (1.8) и вводя источник заданной поляризации $Ps(t)$, получаем систему уравнений Максвелла–Блоха для поляризации $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$ и разности заселенности $\mathbf{w}$ единичного атома [16]:

$$E(t) = A(t) \cdot \cos(\omega t) + B(t) \cdot \sin(\omega t), \quad (1.7)$$

$$P(t) = U(t) \cdot \cos(\omega t) + V(t) \cdot \sin(\omega t) + Ps(t) \cdot \cos(\omega t), \quad (1.8)$$

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{1}{2 \cdot \tau} \cdot A(t) - \frac{B \cdot \omega}{2} \cdot \left(1 - \frac{\omega_r^2}{\omega^2}\right) - 2\pi\omega N_0 d_{12} v(t) - 4\pi \frac{dP_s}{dt}, \quad (1.9)$$

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{1}{2\tau} \cdot B(t) + \frac{A\omega}{2} \cdot \left(1 - \frac{\omega_r^2}{\omega^2}\right) + 2\pi\omega N_0 d_{12} u(t) + 2\pi\omega Ps(t), \quad (1.10)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{T_2} \cdot u(t) + \frac{v(t)}{2\omega} \cdot (\omega_{12}^2 - \omega^2) - \frac{\omega_{12} d_{12} w(t) B(t)}{\hbar\omega}, \quad (1.11)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{T_2} \cdot v(t) - \frac{u(t)}{2\omega} \cdot (\omega_{12}^2 - \omega^2) + \frac{\omega_{12} d_{12} w(t) A(t)}{\hbar\omega}, \quad (1.12)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{T_1} \cdot (w-1) - \frac{d_{12} A(t) v(t) \omega}{\hbar\omega_{12}} + \frac{d_{12} B(t) u(t) \omega}{\hbar\omega_{12}}. \quad (1.13)$$

Здесь $U(t)=d_{12}N_0u(t)$, $V(t)=d_{12}N_0v(t)$, $N(t)=N_0w(t)$. Амплитуда поляризации заданного источника $Ps(t)$ берется в виде функции, близкой к прямоугольной:

$$Ps(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{(t-1,1\tau_p)^{200}}{\tau_p^{200}}\right). \quad (1.14)$$

Примеры численного решения данной системы уравнений при разных P_0 представлены на рис. 2. Параметры расчета: $\omega_r = \omega_{12} = 3 \times 10^{15}$ рад/с. Частота источника Ps $\omega = \omega_{12} - \omega_{coop}$ совпадает с одной из поляритонных мод резонатора, $T_1 = T_2 = 20$ нс, $d_{12} = 6,3 \times 10^{-18}$ ед. СГСЭ, $N_0 = 10^{13}$ см⁻³, $\omega_{coop} = 8,4 \times 10^{10}$ рад/с, $\tau = 5$ нс, $\tau_p = 70$ нс.

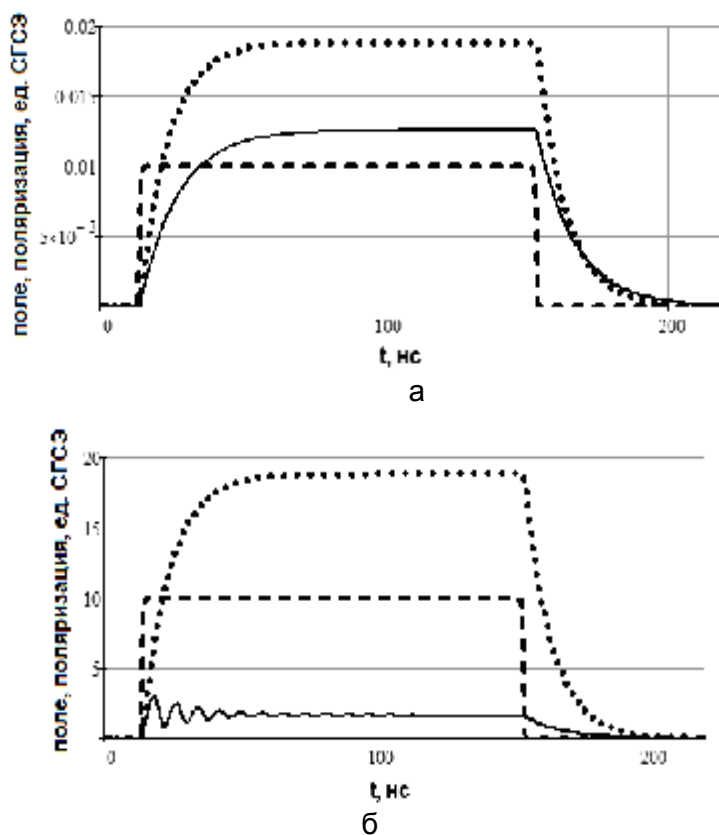


Рис. 2. Пример численного решения: а – $P_0=10^{-10}$ ед. СГСЭ, б – $P_0=10^{-7}$ ед. СГСЭ. Точечная линия – огибающая $E(t)$ без двухуровневых атомов, сплошная линия – огибающая $E(t)$ в заполненном атомами резонаторе, пунктирная линия – прямоугольная огибающая импульса источника заданной поляризации $Ps(t)$, умноженная на 10^8 ед. СГСЭ

Анализ решений показывает, что:

- при накачке системы прямоугольными импульсами нарастание и спад излучения в линейном режиме (при малых P_0) носит экспоненциальный характер (рис. 2, а, б);
- при выполнении (1.6) времена нарастания и затухания излучения поляритонной моды практически могут быть в два раза больше времени τ нарастания и затухания поля для пустого резонатора, не содержащего атомную среду (при $T_2 \gg \tau$);
- при больших значениях P_0 нарастание излучения имеет особенности (рис. 2, б). На начальном этапе в среде происходит заметное изменение разности заселенностей, что ведет к изменению мгновенной частоты $\Omega_{\pm}$ поляритонной моды. Как следствие, в излучении на этапе нарастания до момента достижения стационарного состояния возникают затухающие пульсации $E(t)$. Это сопровождается такими явлениями, как гистерезис, оптическая бистабильность [11].

Неадиабатическое возбуждение поляритонного лазера излучением лазера с синхронизованными модами

В целом ряде экспериментов появление «конденсации» спектра сопровождалось синхронизацией мод в лазере [12–15]. В связи с этим интересно рассмотреть задачу о возбуждении поляритонных мод резонатора в режиме фазовой синхронизации мод лазера накачки (FM mode-locking).

Источник накачки поляритонного лазера берется в виде заданного источника поля $Es(t)$ с модуляцией фазы:

$$Es(t) = E_0 \cos(\omega_{12}t + \Delta_0 t + \Theta \cdot \sin(\Omega_m t)). \quad (2.1)$$

Мгновенная отстройка частоты $\omega(t)$ от частоты перехода ω_{12} дается выражением:

$$\Delta(t) \equiv \omega(t) - \omega_{12} = \Delta_0 \cdot (1 + m \cos(\Omega_m t)), \quad m \equiv \frac{\Theta \cdot \Omega_m}{\Delta_0}. \quad (2.2)$$

Источник накачки $Es(t)$ имеет широкий, линейчатый, эквидистантный спектр с частотным интервалом между компонентами, равным Ω_m .

При выбранном типе модуляции (2.2) в моменты уменьшения мгновенной отстройки частоты поля $|\Delta(t)|$, при определенных условиях, изменения поляризации $P(t)$ и разности заселенности $N(t)$ будут происходить ступенчатым образом (см. рис. 3). Такие резкие, ступенчатые изменения принято называть *неадиабатическими* [16].

При совпадении двух любых частот спектра $Es(t)$ с поляритонными частотами $\Omega_{\pm}$ процесс возбуждения повторяется периодически, что приводит к быстрому резонансному росту поля $E(t)$ (рис. 3). Это делает применение фазовой модуляции поля накачки $Es(t)$ эффективным инструментом возбуждения и управления излучением поляритонных лазеров. Детальный анализ описанного процесса приведен ниже.

Аналогично, переходя к медленным огибающим, имеем:

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{1}{2\tau} \cdot A(t) - 2\pi\omega_{12}N_0d_{12}v(t), \quad (2.3)$$

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{1}{2\tau} \cdot B(t) + 2\pi\omega_{12}N_0d_{12}u(t), \quad (2.4)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{T_2} \cdot u(t) + \frac{d_{12}w(t)}{\hbar} \cdot (E_0 \sin(\Delta_0 t + \Theta \sin(\Omega_m t)) - B(t)), \quad (2.5)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{T_2} \cdot v(t) + \frac{d_{12}w(t)}{\hbar} \cdot (E_0 \cos(\Delta_0 t + \Theta \sin(\Omega_m t)) + A(t)), \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} = & -\frac{1}{T_1} \cdot (w-1) - \frac{d_{12}A(t)v(t)}{h} + \frac{d_{12}B(t)u(t)}{h} - \\ & - \frac{d_{12}E_0v(t)}{h} \cdot \cos(\Delta_0 t + \Theta \sin(\Omega_m t)) - \frac{d_{12}E_0u(t)}{h} \cdot \sin(\Delta_0 t + \Theta \sin(\Omega_m t)). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Пример численного решения системы уравнений и спектры поля накачки $Es(t)$ и генерации $E(t)$ приведены на рис. 3 и 4 ($T_1 = T_2 = 20$ нс, $d_{12} = 6,3 \times 10^{-18}$ ед. СГСЭ, $N_0 = 2 \times 10^{12}$ см $^{-3}$, $\omega_{coop} = 3,76 \times 10^{10}$ рад/с, $\tau = 100$ нс, $E_0 = 21$ ед. СГСЭ, $\Omega_m = 2\omega_{coop}$, $m = 0,99$, $\Delta_0 = 2035 \omega_{coop}$).

На рис. 3 показано возбуждение поляритонного поля $E(t)$ при отсутствии инверсии заселенностей $N(t)$, что отличает его от лазерного излучения. Динамика $N(t)$ имеет существенно неадиабатический характер. Рост поля $E(t)$ сменяется его уменьшением со временем, что обусловлено нелинейной зависимостью частот поляритонных мод $\Omega_{\pm}$ от амплитуды действующего поля (как показано ранее).

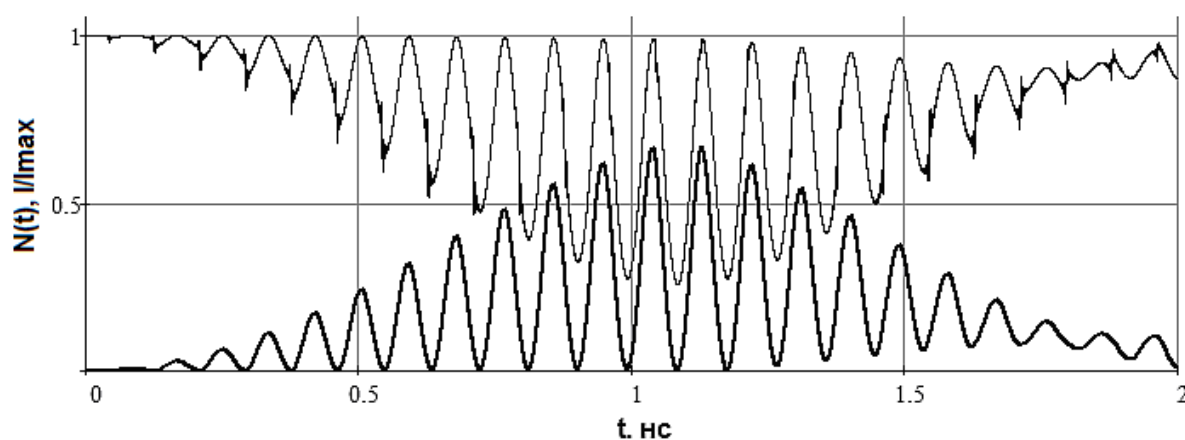


Рис. 3. Верхняя линия – $N(t)$, нижняя – интенсивность поляритонной генерации $I(t)=|E(t)|^2$ (в отн. ед.)

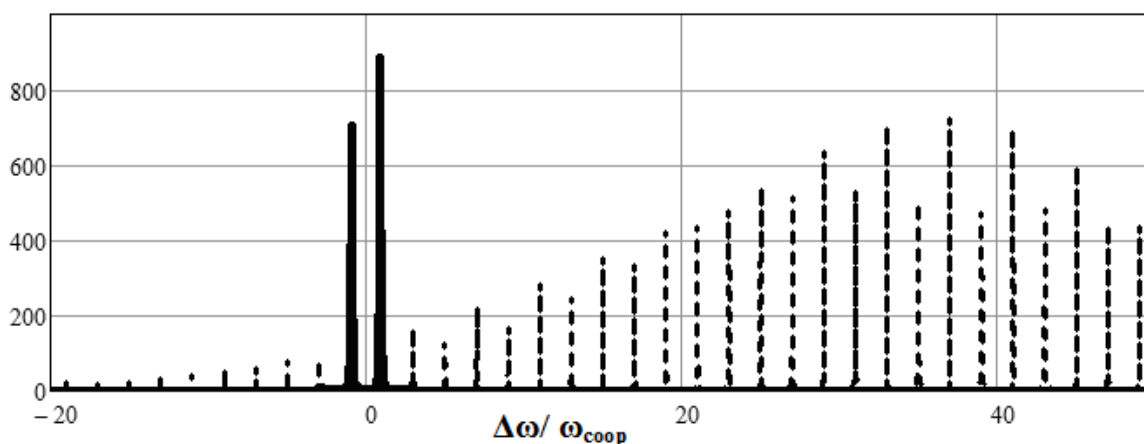


Рис. 4. Сплошная линия – спектр поляритонного излучения $E(t)$ вблизи частоты ω_{12} резонанса среды, пунктирные линии – широкополосный спектр поля источника накачки $Es(t)$

Заключение

Показано, что в линейном режиме времена возбуждения и затухания поляритонных мод могут быть в два раза больше соответствующих времен для пустого резонато-

ра. В нелинейном режиме возбуждение мод может сопровождаться затухающими осцилляциями поля, эффектами гистерезиса и бистабильности.

На основе решений уравнений Максвелла–Блоха показана возможность эффективной генерации и управления параметрами поляритонного лазера при его возбуждении фазово-модулированным излучением лазера накачки (FM mode-locking). Эффективность нового предложенного неадиабатического режима возбуждения поляритонного лазера обусловлена тем, что для накачки используется мощность всех синхронизованных мод лазера накачки.

Применение неадиабатического режима возбуждения поляритонного лазера позволяет значительно снизить мощность лазера накачки, что особенно существенно для применений поляритонных лазеров в оптоэлектронных и оптоинформационных интегральных приборах.

Литература

1. Saba M., Ciuti C., Bloch J., Thierry-Mieg V., Andre R., Le Si Dang, Kundermann S., Mura A., Bongiovanni G., Staehli J. L., Deveaud B. High-temperature ultrafast polariton parametric amplification in semiconductor microcavities // *Nature*. – 2001. – V. 395. – P. 731–735.
2. Saba M., Kundermann S., Ciuti C., Guillet T., Staehli J. L., Deveaud B. Polariton amplification in semiconductor microcavities // *Phys. stat. sol. B*. – 2003. – V. 238. – № 3. – P. 432–438.
3. Bajoni D., Wertz E., Senellart P., Miard A., Semenova E., Lemaitre A., Sagnes I., Bouchoule S., Bloch J. Excitonic Polaritons in Semiconductor Micropillars // *Acta Physica Polonica A*. – 2008. – V. 114. – P. 933–943.
4. Kasprzyk J., Richard M., André R., Le Si Dang. Bose-Einstein condensation in semiconductors: myth or reality? // *Journal of the European Optical Society*. – 2008. – V. 3. – № 08023.
5. A. Imamoglu, R.J. Ram, S. Pao, Y. Yamamoto. Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: Exciton-polariton lasers // *Phys. Rev. A*. – 1996. – V. 53. – № 6. – P. 4250–4253.
6. Васильев В.В., Егоров В.С., Чехонин И.А. Параметрическое возбуждение кооперативных эффектов в опытах по внутрирезонаторной спектроскопии // *Оптика и спектроскопия*. – 1985. – Т. 58. – В. 5. – С. 944.
7. Васильев В.В., Егоров В.С., Чехонин И.А. Лазеры и лазерные системы на основе кооперативных эффектов в оптически плотных резонансных средах без инверсии заселенностей (обзор) // *Оптика и спектроскопия*. – 1994. – Т. 76. – В. 1. – С. 146–160.
8. Bagayev S.N., Vasil'ev V.V., Egorov V.S., Lebedev V.N., Mekhov I.B., Moroshkin P.V., Fedorov A.N., Chekhonin I.A. Coherent light sources under strong field–matter coupling in an optically dense resonant medium without population inversion // *International Journal Laser Physics*. – 2005. – V. 15. – № 7. – P. 975–982.
9. Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. Волны поляризации и сверхизлучение в активных средах // *УФН*. – 1989. – Т. 159. – В. 2. – С. 193–257.
10. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. *Физическая оптика*. – М.: Наука, 2004. – 654 с.
11. Ораевский А.Н. Резонансные свойства системы – «мода резонатора – двухуровневые атомы» и частотная бистабильность // *Квантовая электроника*. – 1999. – Т. 29. – № 2. – С. 137–140.
12. Гамалий В.Ф., Свириденков Э.А., Топтыгин Д.Д. Спектр генерации лазера с узкополосным внутрирезонаторным поглощением и временной модуляцией коэффициента усиления // *Квантовая электроника*. – 1988. – Т. 15. – № 12. – С. 2457–2467.

13. Баев В.М., Беликова Т.П., Варнавский О.П., Гамалий В.Ф., Коваленко С.А., Свириденков Э.А. Авто модуляция интенсивности излучения лазера при наличии в резонаторе сильных линий поглощения // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 42. – В.10. – С. 416–418.
14. Колеров А.Н. Спектральные и временные характеристики излучения перестраиваемого лазера при полной конденсации спектра // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 12. – В. 18. – С. 477–483.
15. Baev V.M., Eschner J., Weiler A. Intracavity Spectroscopy with Modulated Multimode Lasers // Appl. Phys. B. – 1989. – V. 49. – P. 315–322.
16. Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. – М.: Мир, 1978. – 220 с.
17. Ярив А. Квантовая электроника. – М.: Сов. радио, 1980. – 488 с.

<i>Архипов Ростислав Михайлович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет, студент, arkhipm@mail.wplus.net
<i>Егоров Валентин Семенович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор, valentin_egorov@mail.ru
<i>Чехонин Игорь Анатольевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, chekhonor@mail.ru

УДК 621.224.24-253.5(045)

**РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАБОЧЕГО КОЛЕСА РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ РО-230****В.П. Золотаревич, Н.В. Югов**

В работе рассматривается построение физико-математической модели проточной части рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины для расчета гидродинамических течений в проточной части рабочего колеса. Расчеты в трехмерной постановке сравниваются с расчетами в осесимметричной постановке и с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: гидротурбина, рабочее колесо, направляющий аппарат, вычислительная гидродинамика, метод конечных объемов.

Введение

В последнее время в промышленности возникает потребность в замене рабочих колес гидротурбин электростанций вследствие их естественного износа. При проведении модернизации имеется возможность установить новые рабочие колеса с лучшими показателями крутящего момента, к.п.д., кавитационной устойчивости и т.д. Имеющиеся средства отработки и модернизации прототипов не позволяют достаточно точно предсказать изменения характеристик турбины при изменениях геометрии рабочего колеса, а также универсальную характеристику турбины, что требует обычно дорогостоящих лабораторных исследований. В связи с этим необходимо разработать физико-математические модели, которые позволяют для измененной геометрии рабочего колеса предсказать универсальную характеристику и оценить эффективность предложенных изменений геометрии рабочего колеса без проведения дорогостоящих лабораторных исследований.

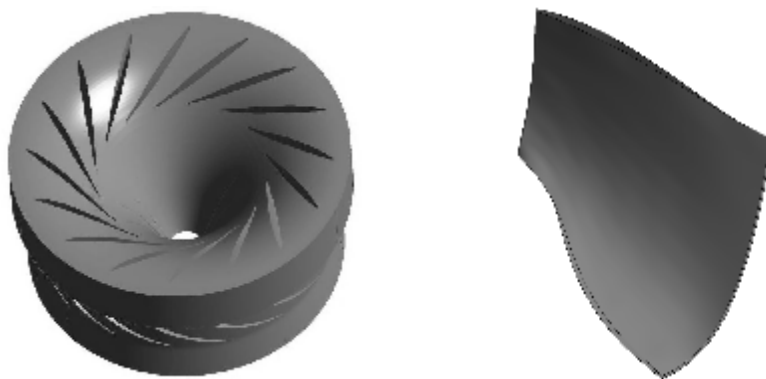


Рис. 1. Общий вид проточной части гидротурбины в районе рабочего колеса
и профиль одной лопасти рабочего колеса

Наиболее современным подходом в решении задач расчета гидродинамических течений является использование методов вычислительной гидродинамики. В данной работе представлены результаты численного моделирования течений в проточной части радиально-осевой гидротурбины в районе рабочего колеса. На рис. 1 приведен общий вид проточной части гидротурбины в районе рабочего колеса и показан профиль одной лопасти рабочего колеса.

Аналогичные расчеты проводились зарубежными авторами [1, 2]. В этих работах моделируется часть проточной части турбины в районе рабочего колеса без учета направляющего аппарата, а в качестве граничных условий на входе в рабочее колесо используются экспериментальные значения. В данной работе в качестве входных данных используются результаты расчетов, полученные в осесимметричной постановке.

Основные уравнения

Физико-математическая модель проточной части строилась на основе численного решения системы уравнений Навье–Стокса, которые состоят из уравнения сохранения массы (1) и усредненного уравнения сохранения количества движения (2):

$$\operatorname{div} \rho \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{Div}(\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \operatorname{Div}(\mu \operatorname{Grad} \mathbf{U} + \mu (\operatorname{Grad} \mathbf{U})^T - \rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}). \quad (2)$$

Здесь ρ – плотность жидкости; $\mathbf{U}$ – вектор поля скоростей, p – давление, μ – кинематическая вязкость, а слагаемое $-\rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}$ представляет собой тензор напряжений Рейнольдса. Для замыкания системы уравнений (1) и (2) необходимо вычислить тензор напряжений Рейнольдса. Наиболее часто употребляемым приближением, используемым для вычисления тензора напряжений Рейнольдса, является гипотеза турбулентной вязкости, согласно которой тензор напряжений Рейнольдса связан с тензором деформаций аналогичного модели несжимаемой ньютоновской жидкости, т.е. можно записать:

$$-\rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} = \mu_t (\operatorname{Grad} \mathbf{U} + (\operatorname{Grad} \mathbf{U})^T), \quad (3)$$

где μ_t – турбулентная вязкость. Тогда уравнение (2) можно переписать в виде

$$\operatorname{Div}(\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \operatorname{Div}(\mu_{\text{eff}} \operatorname{Grad} \mathbf{U} + \mu_{\text{eff}} (\operatorname{Grad} \mathbf{U})^T), \quad (4)$$

где $\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu$ – эффективная вязкость.

Для определения турбулентной вязкости была использована стандартная k - ϵ модель турбулентности. Для k - ϵ модели турбулентности турбулентная вязкость определяется на основе следующего уравнения:

$$\mu_t = 0,09 \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (5)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, ϵ – коэффициент затухания турбулентности. Значения k и ϵ определяются из решения следующих уравнений переноса:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{U} k) = \operatorname{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon, \quad (6)$$

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{U} \epsilon) = \operatorname{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon), \quad (7)$$

где $P_k = \mu_t \operatorname{Grad} \mathbf{U} (\operatorname{Grad} \mathbf{U} + (\operatorname{Grad} \mathbf{U})^T)$. Значения эмпирических констант приведены в табл. 1.

σ_k	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
1,0	1,3	1,44	1,92

Таблица 1. Эмпирические константы для стандартной k - ϵ модели турбулентности

В случае нахождения решения во вращающейся системе координат к уравнению (4) необходимо добавить слагаемые, которые описывают центробежное и кориолисово ускорение:

$$\text{Div}(\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \text{Div}(\mu_{\text{eff}} \text{Grad } \mathbf{U} + \mu_{\text{eff}} (\text{Grad } \mathbf{U})^T) - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{U}. \quad (8)$$

Для дискретизации основных уравнений (1), (4) или (8) используется метод конечных объемов (finite control volumes) [3]. Расчетная область разбивается на ряд ячеек, называемых конечными объемами. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведено построение конечного объема для двумерной сетки. Разбиение на конечные объемы в случае пространственной сетки происходит аналогично.

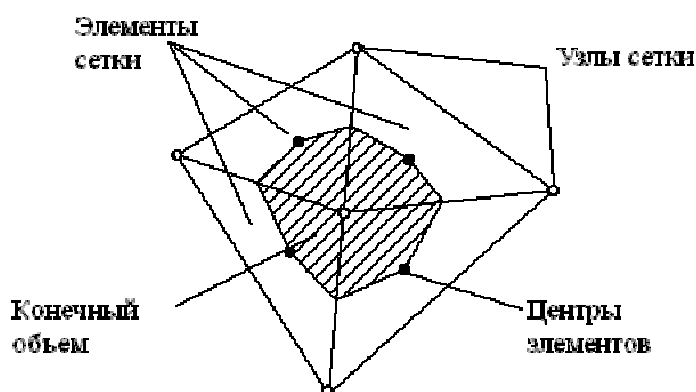


Рис. 2. Разбиение расчетной области на конечные объемы

Для каждого конечного объема основные уравнения (1), (2) или (4), а также уравнения модели турбулентности (6) и (7) записываются в виде законов сохранения, после чего происходит их дискретизация. Полученную нелинейную систему уравнений решают с помощью современных итерационных методов.

Граничные условия

При расчетах проточной части рабочего колеса без учета направляющего аппарата одной из проблем является необходимость корректно задать граничные условия на входе в рабочее колесо. В зарубежных публикациях, посвященных численному моделированию потоков в проточных частях гидротурбин, для задания граничных условий на входе в рабочее колесо обычно используются экспериментальные данные. В связи с отсутствием экспериментальных данных было решено использовать для этого результаты осесимметричной задачи. В работах Ф.Т. Заболотного [4] показано, что распределения скоростей на входе в рабочее колесо, полученные на основе решения осесимметричной задачи, близки к экспериментальным.

По результатам расчета осесимметричной задачи были получены аппроксимации в виде полиномов для радиальной, осевой и окружной абсолютной скорости в зависимости от координаты z для оптимального режима работы рабочего колеса. Общий вид аппроксимации компонент абсолютной скорости можно записать в следующем виде:

$$C = a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z^1 + a_0. \quad (9)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициентов соответствующих полиномов для радиальной составляющей абсолютной скорости (C_r), осевой составляющей абсолютной скорости C_z и окружной составляющей абсолютной скорости (C_u).

	C_r	C_z	C_u
a_3	-173,9	0,0	0,0
a_2	30,45	-2,16	8,78
a_1	-1,86	2,19	-0,08
a_0	-0,8	0,0	2,15

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимации полинома составляющих абсолютных скоростей

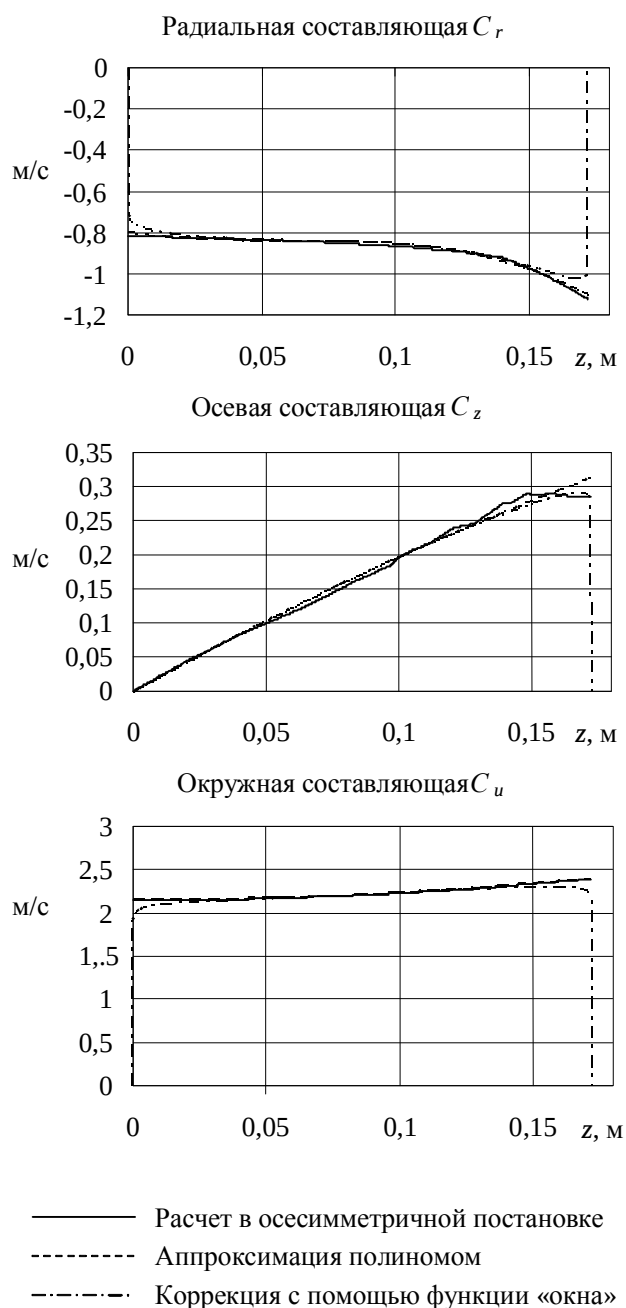


Рис. 3. Распределение компонент абсолютной скорости на входе в рабочее колесо турбины

В трехмерной постановке задача решается с учетом вязкости воды. Это приводит к особенному рассмотрению течений вблизи стенок проточной части. Для учета влияния пограничного слоя на входные граничные условия в расчет закладывалась зависимость (9), умноженная на специальную функцию «окна», которая позволяла получить на стенках расчетной области нулевое значение скорости. Функция «окна» задавалась в следующем виде:

$$W = A|4\zeta(1 - \zeta)|^n, \quad (10)$$

где $\zeta = \frac{z}{z_{\max}}$ – безразмерная координата. Таким образом, выражение для компонент скорости, которое использовалось в расчетах, имеет вид произведения выражений (9) и (10). Параметры A и n в выражении (10) подбирались исходя из максимальной близости профиля скорости к результатам осесимметричной задачи и сохранения заданного расхода во входном сечении проточной части. В результате для параметров были получены значения $A = 1,02$, $n = 0,02$. На рис. 3 приведены зависимости компонентов абсолютной скорости от координаты z .

В качестве граничного условия в выходном сечении проточной части задавалась величина усредненного статического давления:

$$\bar{p}_{\text{вых}} = \frac{1}{S} \int_S p dS. \quad (11)$$

На стенках проточной части задавалось условие «прилипания» потока, т.е. скорость потока полагалась равной нулю. Для моделирования течений в пристеночной области и учета эффектов пограничного слоя использовался метод пристеночных функций [5].

Результаты расчетов

Расчет проводился для двух режимов турбины: близкого к оптимуму универсальной характеристики турбины (режим 1) и вне его (режим 2). В табл. 3 приведены расход и частота вращения режимов, а также результаты расчета крутящего момента, действующего на одну лопасть рабочего колеса.

Режим	Расход	Частота	Крутящий момент,	
			расчет	эксперимент
1	0,46 м ³ /с	67 об/мин	36,3 Н·м	36,8 Н·м
2	0,39 м ³ /с	85 об/мин	24 Н·м	23,2 Н·м

Таблица 3. Результаты расчета крутящего момента на лопасти рабочего колеса для расчетных режимов работы турбины

Задача решалась в циклосимметричной постановке, т.е. моделировалась только часть проточной части, соответствующая одной лопасти. На границах области задавались условия циклосимметрии.

На рис. 4 приведены результаты расчета компонент абсолютной скорости в зависимости от координаты средней линии M меридионального сечения проточной части турбины. Из рисунков видно хорошее совпадение результатов расчета в трехмерной и осесимметричной постановках для осевой составляющей абсолютной скорости. Более высокие значения компонентов радиальной составляющей абсолютной скорости в трехмерной постановке по сравнению с осесимметричной объясняются тем, что в осе-

симметричной постановке не учитывается стеснение в межлопастном канале, т.е. толщина лопастей рабочего колеса. Для режима 1, близкого к оптимальному, наблюдается полное раскручивание потока, т.е. на выходе с рабочего колеса окружная скорость близка к нулю, в отличие от режима 2, где окружная скорость на выходе из рабочего колеса составляет 0,8 м/с.

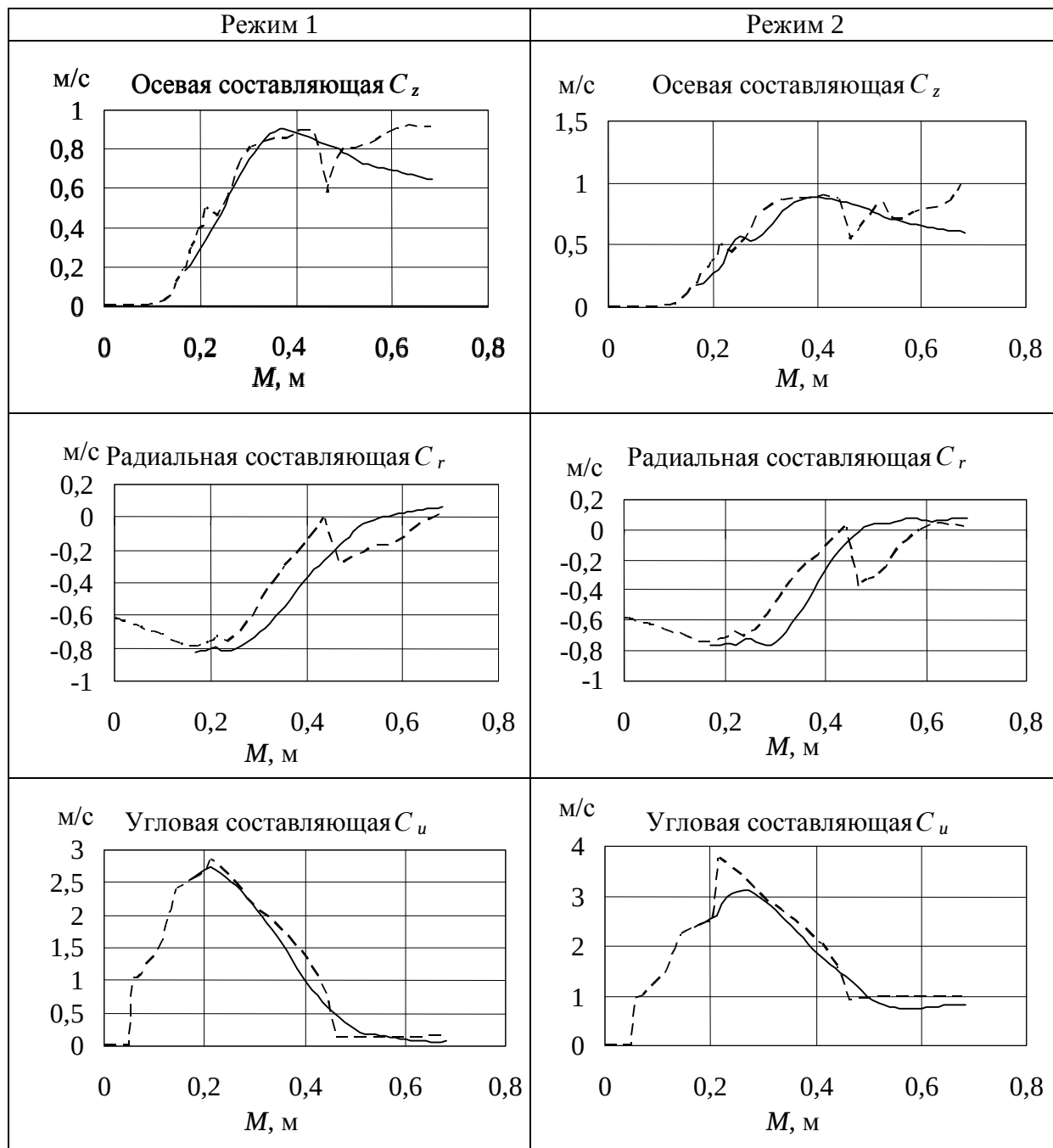
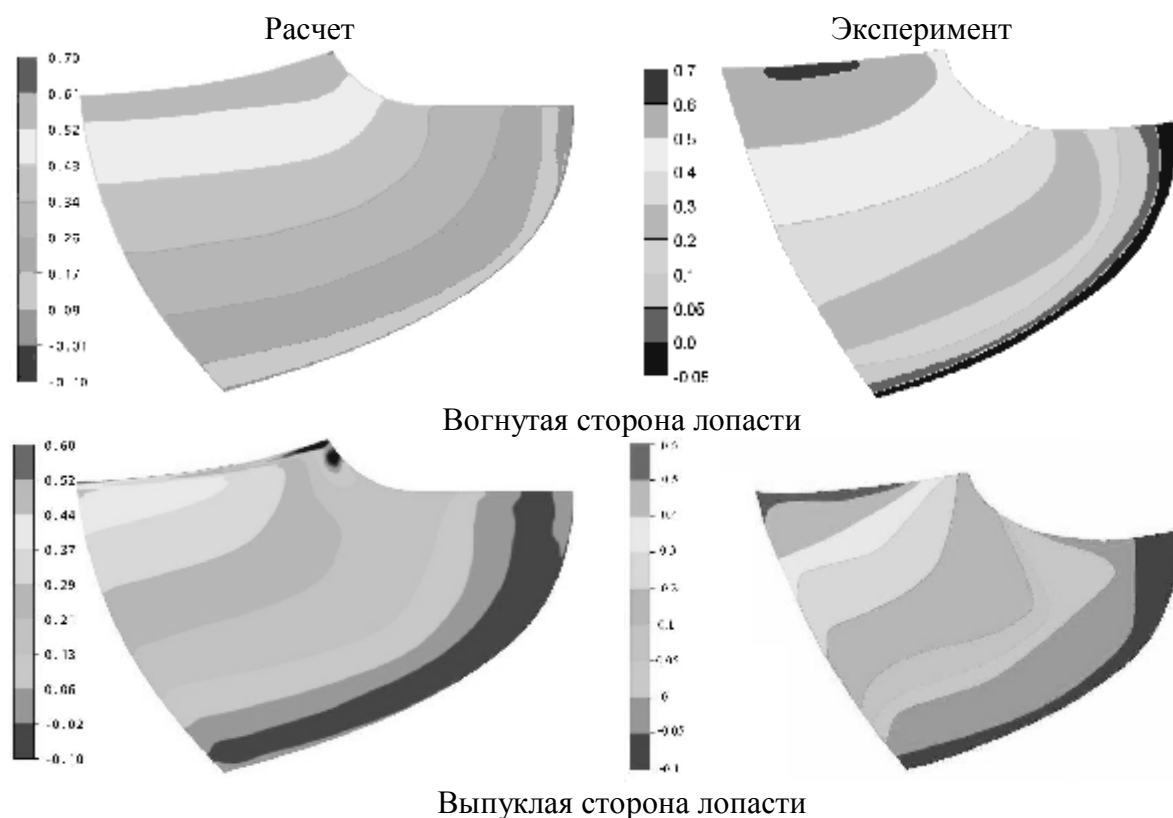
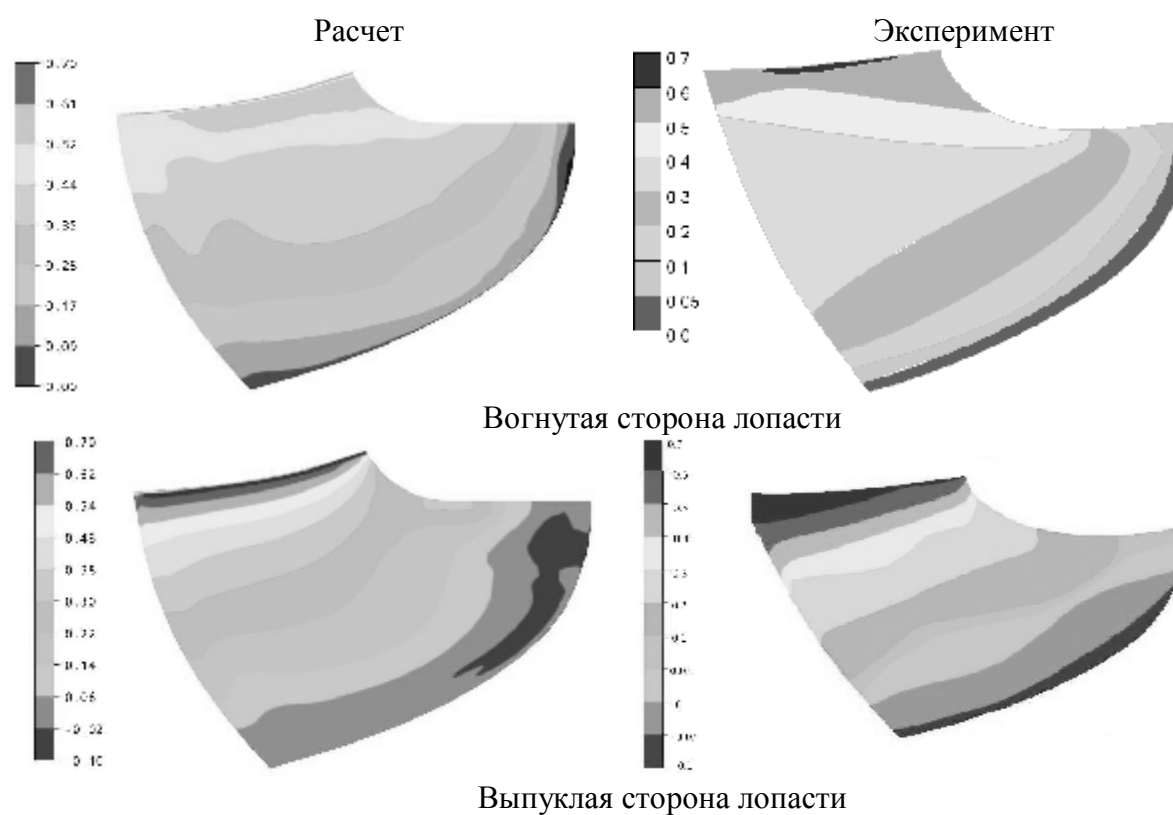


Рис. 4. Зависимость проекций абсолютной скорости от координаты средней линии меридионального сечения проточной части: сплошная линия – расчет в трехмерной постановке, пунктирная линия – расчет в осесимметричной постановке

Рис. 5. Коэффициент давления $[p]$ для режима 1 турбиныРис. 6. Коэффициент давления $[p]$ для режима 2 турбины

На рис. 5 и 6 приведено сравнение коэффициентов давления на лопастях рабочего колеса для режимов 1 и 2 соответственно, полученных в ходе модельных испытаний на Ленинградском металлическом заводе, с расчетными данными в трехмерной постановке. Давление указано в единицах коэффициента давления, определяемого по формуле

$$[p] = \frac{p - p_0}{\rho g H},$$

где p – давление, g – ускорение свободного падения, p_0 – атмосферное давление, H – приведенный напор, равный 1 м. Из рисунков видно, что экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются между собой.

Заключение

Построенная физико-математическая модель проточной части радиально-осевой гидротурбины позволяет выполнить расчеты гидродинамических параметров проточной части турбины в районе рабочего колеса: крутящего момента, распределения радиальной, осевой и окружной скоростей, давлений и т.д. В качестве граничных условий на входе в проточную часть можно использовать результаты расчета осесимметричной задачи. Полученные результаты могут быть использованы для изменения геометрии лопасти рабочего колеса при его модернизации.

Литература

1. Nilsson H. Numerical Investigations of Turbulent Flow in Water Turbines. – Gothenburg: Chalmers University of Technology, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, 2002.
2. Numerical flow analysis of the GAMM turbine at nominal and off-design operating conditions / L. Gros, J.L. Kueny, F. Avellan, and L. Bellet // Proc. of the XIX IAHR Symposium, Hydraulic Machinery and Cavitation. – 1998. – P. 121–128.
3. Versteeg, H. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method / H. Versteeg, W. Malalasekera. – Longman, 1995.
4. Заболотный Ф.Т. Расчет установившегося осесимметричного вихревого течения несжимаемой невязкой жидкости в радиально-осевой турбомашине // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – № 3. – 1979.
5. Численное моделирование течений в турбомашинах. / С.Г. Черный и др. – Новосибирск: Наука, 2006. – 202 с.

Золотаревич Валерий Павлович

Югов Николай Васильевич

- Северо-Западный государственный заочный технический университет, аспирант, zolotarevich@nwpi.ru
- Северо-Западный государственный заочный технический университет, доктор технических наук, профессор, директор Инновационного научного межкафедрального центра компьютерных инженерных технологий, caecentercit@nwpi.ru

УДК 621.317.7.027.3; 621.319.027.3

ТЕОРИЯ СВЕРХБЫСТРОГО ВКЛЮЧЕНИЯ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ**В.В. Тогатов, П.А. Гнатюк, Д.С. Терновский**

Рассмотрен режим сверхбыстрого включения высоковольтного МОП-транзистора, при котором время переключения прибора не превышает единиц наносекунд. Дано объяснение механизма сверхбыстрого включения, предложена его математическая модель. Приведены результаты прямых экспериментов, подтверждающих механизм сверхбыстрого включения.

Ключевые слова: МОП-транзистор, высоковольтная техника, импульсная техника, техника наносекундного диапазона, электрооптический затвор.

Введение

При формировании высоковольтных импульсов напряжения с наносекундным фронтом используются электронные коммутаторы, построенные на основе различных физических механизмов [1, 2]. В последнее время появилась информация о разработке высоковольтных модуляторов с наносекундным фронтом, построенных на основе высоковольтных МОП-транзисторов [3]. Известно, что типовые времена включения этих транзисторов составляют десятки наносекунд, в то время как фронт импульсов напряжения на выходе модуляторов не превышает единиц наносекунд. В известной нам литературе объяснения механизма такого быстрого включения МОП-транзисторов не дано. Данная статья посвящена анализу режима сверхбыстрого включения МОП-транзистора и его реализации при включении полевого прибора.

Анализ режима сверхбыстрого включения

Проанализируем процесс включения МОП-транзистора, работающего в активном режиме, когда темп нарастания тока стока i_D и его установившееся значение ограничиваются самим транзистором, а не внешней цепью. На рис. 1 показана схема включения МОП-транзистора Q с омической нагрузкой R_L в стоке в цепь постоянного напряжения V_H . Схема дополнена элементами L_D и L_S , учитывающими индуктивности выводов транзистора и токоподводящих дорожек в цепях стока и истока. На схеме также показаны межэлектродные емкости C_{GS} , C_{GD} и C_{DS} . Здесь и далее используются следующие сокращения для обозначения индексов: G – Gate (затвор), D – Drain (сток), S – Source (исток), T – Transistor (транзистор), L – Load (нагрузка), H – High (высокое напряжение), In – Input (входное напряжение), Out – Output (выходное напряжение), F – Forward (прямое напряжение), R – Reverse (обратное напряжение), Del – Delay (задержка), Th – Threshold (пороговое напряжение), Sat – Saturation (режим насыщения), St – Steady (установившееся значение).

На затвор транзистора подаются прямоугольные импульсы напряжения V_{In} с амплитудой V_F , причем предполагается, что к моменту прихода импульса на затворе имелось отрицательное смещение $V_{GS} = -V_R$. В режиме максимального быстрого действия будем считать источник входного напряжения идеальным источником ЭДС.

На этапе задержки емкость C_{GS} , заряженная к моменту включения до обратного напряжения V_R , резонансно перезаряжается через индуктивность в цепи истока L_S . Если напряжение, подаваемое в цепь затвора, равно V_F и сопротивление в цепи затвора близко к нулю, то ток истока в момент окончания задержки ($t = t_{Del}$) оказывается равным

$$i_S(t_{Del}) = \sqrt{\frac{C_{GS}}{L_S} [(V_F + V_R)^2 - (V_F - V_{Th})^2]}. \quad (1)$$

Здесь V_{Th} – пороговое напряжение, определяющее момент окончания задержки $V_{GS}(t_{Del}) = V_{Th}$. Как будет показано ниже, увеличение тока $i_S(t_{Del})$ принципиально важно для реализации режима сверхбыстрого включения МОП-транзистора.

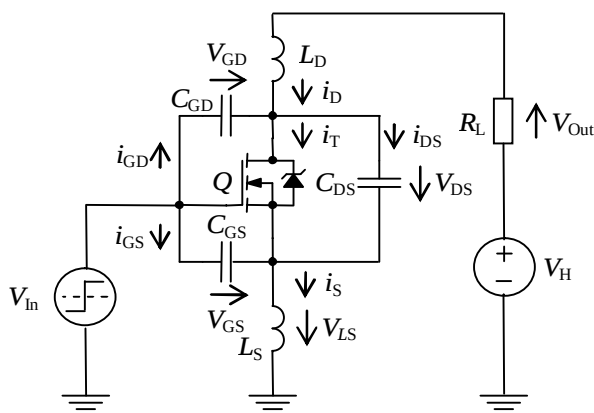


Рис. 1. Схема включения МОП-транзистора Q с омической нагрузкой R_L в стоке в цепь постоянного напряжения V_H

После окончания этапа задержки начинается рост тока стока. При анализе процесса включения будем использовать кусочно-линейную аппроксимацию передаточной характеристики МОП-транзистора. Согласно этой аппроксимации, ток транзистора i_T равен

$$i_T = \begin{cases} 0, & V_{GS} \leq V_{Th} \\ S(V_{GS} - V_{Th}), & V_{GS} > V_{Th} \end{cases},$$

где S – крутизна транзистора, V_{GS} – напряжение на емкости C_{GS} . В стационарном режиме ток i_T равен токам стока i_D и истока i_S . Согласно принятой аппроксимации, ток i_T определяется только напряжением V_{GS} на емкости C_{GS} и не зависит от токов в емкостях C_{GD} и C_{DS} . Их влияние на ток стока $i_D(t)$ будет рассмотрено ниже. При выводе переходной характеристики тока $i_T(t)$ воспользуемся следующими соотношениями:

$$V_F = V_{GS} + V_{LS}, \quad V_{LS} = L_S \frac{di_S}{dt}, \quad V_{GS} = V_{Th} + \Delta V_{GS},$$

$$i_S = i_T + i_{GS}, \quad i_T = S\Delta V_{GS}, \quad i_{GS} = C_{GS} \frac{d\Delta V_{GS}}{dt}.$$

В этих выражениях ΔV_{GS} – превышение напряжения V_{GS} над пороговым V_{Th} , V_{LS} – напряжение на индуктивности истока L_S . Комбинируя эти выражения, получим уравнение, определяющее переходную характеристику тока $i_T(t)$ МОП-транзистора:

$$\frac{d^2 \Delta V_{GS}}{dt^2} + \frac{S}{C_{GS}} \frac{d\Delta V_{GS}}{dt} + \frac{1}{L_S C_{GS}} \Delta V_{GS} = \frac{V_F - V_{Th}}{L_S C_{GS}}. \quad (2)$$

Сформулируем начальные условия задачи, используя законы коммутации для емкостной и индуктивной цепей:

$$\Delta V_{GS}(0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta V_{GS}}{dt}(0) = \frac{i_S(t_{Del})}{C_{GS}}. \quad (4)$$

Решая уравнение (2) с начальными условиями (3), (4) и переходя затем к току $i_T(t) = S\Delta V_{GS}(t)$, получим:

$$i_T(t) = I_F - e^{-\delta t} \left[I_F \left(\operatorname{ch} \gamma t + \frac{\delta}{\gamma} \operatorname{sh} \gamma t \right) - \frac{2\delta}{\gamma} i_S(t_{\text{Del}}) \operatorname{sh} \gamma t \right]. \quad (5)$$

В этом выражении $\delta = \frac{S}{2C_{GS}}$, $\gamma = \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{L_S C_{GS}}}$, $I_F = S(V_F - V_{Th})$ – установившееся значение тока. При выводе уравнения (5) за начало отсчета ($t = 0$) принят момент окончания этапа задержки t_{Del} .

Выражение (5) можно существенно упростить, если использовать приближенное равенство $\gamma = \frac{S}{2C_{GS}} - \frac{1}{SL_S}$. При этом для значений параметров, характерных для мощных полевых приборов, ошибка в определении γ будет заведомо ниже 1 %. Пренебрегая также членами второго порядка малости, приходим к следующему выражению для тока транзистора:

$$i_T(t) = I_F \left(1 - e^{-\frac{t}{SL_S}} \right) + i_S(t_{\text{Del}}) e^{-\frac{t}{SL_S}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при $t = 0$ ток i_T скачком увеличивается до значения $i_S(t_{\text{Del}})$. Этот результат является принципиальным, так как определяет режим сверхбыстрого включения МОП-транзистора. Физический смысл такого режима заключается в том, что до тех пор, пока ток стока не достигнет величины $i_S(t_{\text{Del}})$, отрицательная обратная связь, обусловленная индуктивностью L_S , в приборе отсутствует.

Уравнение (6) правильно отражает факт наличия процесса сверхбыстрого включения. Вместе с тем вытекающее из этого уравнения скачкообразное изменение тока i_T в момент $t = 0$ является идеализацией реального процесса быстрого роста тока. Механизм роста тока стока на этапе сверхбыстрого включения определяется обратной связью по току i_T , которая реализуется в соответствии с выражением $i_{GS} = i_S - i_T$, где i_{GS} – ток в емкости C_{GS} . Из-за индуктивного характера цепи истока ток истока i_S на начальной стадии роста тока i_T меняется незначительно, оставаясь близким к $i_S(t_{\text{Del}})$. Следовательно, по мере роста тока i_T ток i_{GS} соответственно уменьшается. Это приводит к замедлению темпа роста напряжения V_{GS} , а, значит, и тока $i_T = S \Delta V_{GS}$. Как только ток i_T достигнет величины тока истока $i_S(t_{\text{Del}})$, заряд емкости C_{GS} прекратится, что приведет к прекращению роста тока i_T . В дальнейшем токи стока и истока изменяются синхронно с постоянной времени $\tau = SL_S$. Это изменение может происходить в сторону как повышения, так и снижения тока i_T в зависимости от величины напряжения V_{GS} в момент ограничения тока i_T на уровне $i_S(t_{\text{Del}})$ ($t = t_0$). Если $V_{GS}(t_0) > V_F - V_{Th}$, то ток i_T снижается с постоянной времени $\tau = SL_S$ от $i_S(t_{\text{Del}})$ до $S(V_F - V_{Th})$. В противном случае происходит аналогичное увеличение тока стока до той же величины.

Определим влияние емкостей затвор–сток C_{GD} и сток–исток C_{DS} (рис. 1) на переходную характеристику тока стока $i_D(t)$, исходя из следующих равенств:

$$i_D = i_T + i_{DS} - i_{GD}, \quad i_{GD} = C_{GD} \frac{dV_{GD}}{dt}, \quad i_{DS} = C_{DS} \frac{dV_{DS}}{dt},$$

$$V_{GD} = V_F - V_H + R_L i_D, \quad V_{DS} = V_H - R_L i_D.$$

В двух последних равенствах пренебрегли напряжениями на индуктивностях стока и истока, которые в высоковольтных схемах малы по сравнению с напряжением на нагрузке. После элементарных преобразований получим:

$$\frac{di_D}{dt} + \frac{1}{R_L(C_{GD} + C_{DS})} i_D = \frac{1}{R_L(C_{GD} + C_{DS})} i_T, \quad (7)$$

где $i_T(t)$ определено в (5). Начальное условие задачи – нулевое:

$$i_D(0) = 0.$$

Можно, проинтегрировав уравнение (7), получить его точное решение. Однако на этапе сверхбыстрого включения, не превышающего нескольких наносекунд, в качестве первого приближения определим реакцию тока стока $i_D(t)$ на скачок тока $i_T = i_S(t_{Del}) = \text{const}$:

$$i_D = i_S(t_{Del}) \left[1 - e^{-\frac{t}{R_L(C_{GD} + C_{DS})}} \right]. \quad (8)$$

Как следует из выражения (8), для реализации режима сверхбыстрого включения емкости C_{GD} и C_{DS} должны быть минимальны.

В ряде применений имеет место включение МОП-транзистора на емкостную нагрузку C_L , например, на электрооптический затвор. В этом случае переходная характеристика выходного напряжения будет представлена в виде

$$V_{Out}(t) = \frac{1}{C_L + C_{GD} + C_{DS}} \int_0^t i_T dt. \quad (9)$$

Если, как и в случае омической нагрузки, в качестве первого приближения переходной характеристики принять реакцию выходного напряжения $V_{Out}(t)$ на скачок тока $i_T = i_S(t_{Del}) = \text{const}$, то придем к линейному росту выходного напряжения:

$$V_{Out}(t) = \frac{i_S(t_{Del})}{C_L + C_{GD} + C_{DS}} t. \quad (10)$$

Возможность реализации режима сверхбыстрого включения МОП-транзистора подтверждена нами прямыми экспериментами. В схеме, приведенной на рис. 2, исследовался процесс включения высоковольтного МОП-транзистора Q_2 (STP8NK100) на омическую нагрузку $R_L = 20$ Ом при напряжении источника питания $V_H = 600$ В.

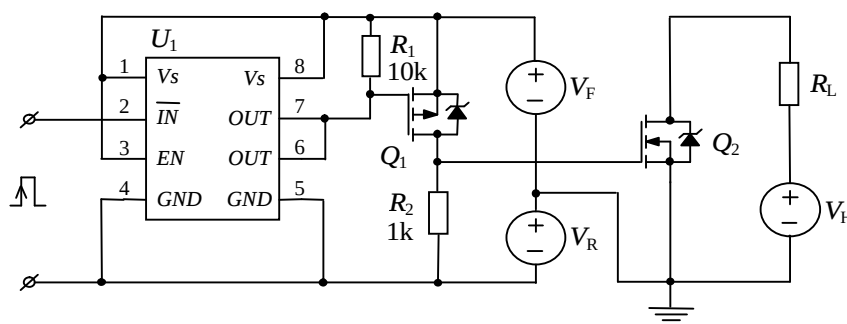


Рис. 2. Схема включения высоковольтного МОП-транзистора Q_2 с омической нагрузкой R_L в стоке в цепь постоянного напряжения V_H .

Q_1 – IRF7416, Q_2 – STP8NK100, U_1 – IXDN409SI

На рис. 3 приведены четыре осциллограммы включения транзистора Q_2 . При снятии всех осциллограмм на затвор транзистора подавались импульсы прямого напряжения с равной амплитудой $V_F = 6,5$ В. При этом напряжения отрицательного смещения на затворе в момент включения были различны и равны 0, 5, 10 и 18 В. Во всех четырех случаях транзистор работал в активном режиме без захода в режим насыщения. Каждая

из осциллограмм имеет два явно выраженных участка. Первый – режим сверхбыстрого включения, не превышающий 2–4 нс, второй – установление стационарного состояния с постоянной SL_S . На первых двух осциллограммах в период установления происходит рост тока стока, на двух последних – снижение до установившегося значения $(i_D)_{St}$. Это означает, что в первых двух случаях ток истока в конце этапа задержки $i_S(t_{Del})$ ниже установившегося значения $(i_D)_{St}$, а в двух последних превосходит установившееся значение.

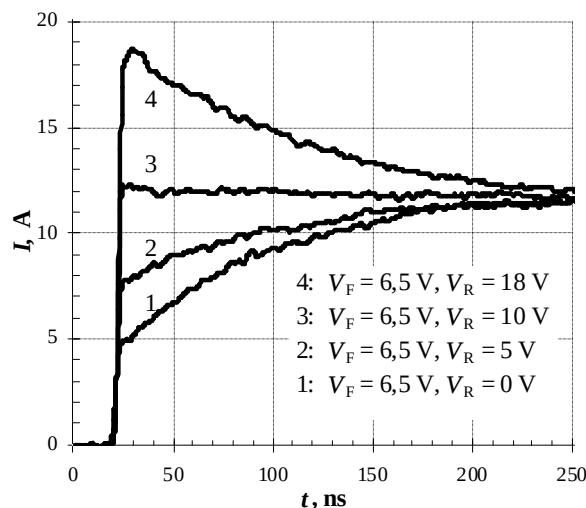


Рис. 3. Осциллограммы тока при включении транзистора Q2 (STP8NK100) на омическую нагрузку $R_L = 20 \text{ Ом}$

На рис. 4 приведена осциллограмма включения того же транзистора на нагрузку 40 Ом при напряжении источника 600 В, прямом затворном напряжении $V_F = 6 \text{ В}$ и отрицательном смещении 18 В. Как видно из осциллограммы, ограничение тока в схеме осуществляется при токе стока $(i_D)_{Sat} = 14,5 \text{ А}$, а установившееся значение тока стока в активном режиме работы $(i_D)_{St} = 7 \text{ А}$. Значение тока истока в момент окончания задержки $i_S(t_{Del})$, рассчитанное по формуле (1), составляет 16,6 А. Поскольку $i_S(t_{Del}) > (i_D)_{Sat}$, то на этапе сверхбыстрого включения происходит ограничение тока стока на уровне $(i_D)_{Sat}$, т.е. осуществляется переход транзистора в режим насыщения. Это состояние поддерживается до тех пор, пока емкость C_{GS} не разрядится до напряжения, соответствующего току $(i_D)_{Sat}$. Начиная с этого момента, транзистор переходит в активный режим, и ток стока с постоянной SL_S снижается до установившегося значения $(i_D)_{St} = 7 \text{ А}$.

На рис. 4 приведена также осциллограмма тока стока при включении того же транзистора на нагрузку 40 Ом при прямом затворном напряжении, равном пороговому напряжению $V_F = V_{Th} = 4,7 \text{ В}$ и отрицательном смещении 18 В. В рамках общепринятых представлений ток стока в этом режиме по определению должен быть близок к нулю. В то же время, как видно из осциллограммы, амплитуда импульса тока стока составила 11 А, что может быть объяснено только в рамках концепции сверхбыстрого включения. Значение тока истока в момент окончания задержки $i_S(t_{Del})$, рассчитанное по формуле (1), оказалось равным 15,7 А, что хорошо согласуется с результатом эксперимента.

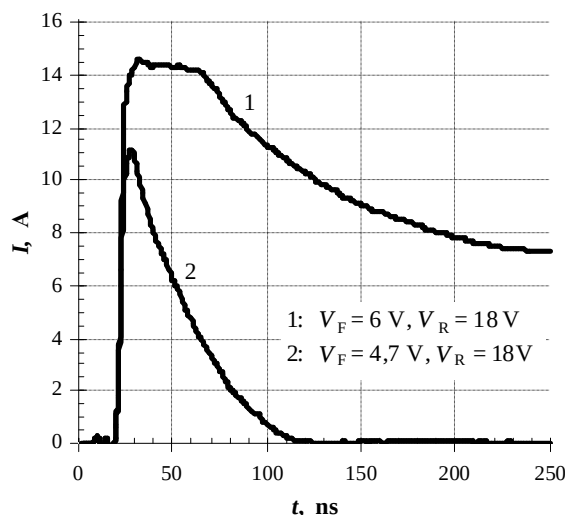


Рис. 4. Осциллограммы тока при включении транзистора Q2 (STP8NK100) на омическую нагрузку $R_L = 40 \text{ Ом}$

Таким образом, рассмотренные экспериментальные зависимости на рис. 3–4 хорошо укладываются в концепцию сверхбыстрого включения МОП-транзистора.

Режим сверхбыстрого включения использован нами при создании высоковольтных модуляторов для управления электрооптическими затворами [4]. Импульсы напряжения, формируемые этими модуляторами, при амплитуде 2–6 кВ характеризуются длительностью фронта 2–4 нс.

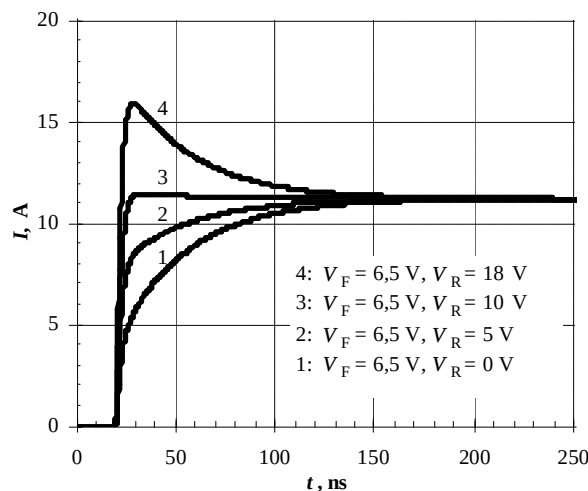


Рис. 5. Расчет переходных характеристик тока стока при включении МОП-транзистора Q2 (STP8NK100) на омическую нагрузку $R_L = 20 \text{ Ом}$

Для проверки предложенной математической модели проведен расчет переходных характеристик тока стока МОП-транзистора $i_D(t)$ в тех же режимах, что и в рассмотренном эксперименте (рис. 5). Ток стока находился в результате решения уравнения (7), в котором в качестве $i_T(t)$ использовалось выражение (5). Значения параметров транзистора STP8NK100 при расчете приняты следующими: $C_{GS} = 2,4 \text{ нФ}$, $C_{GD} + C_{DS} = 100 \text{ пФ}$, $L_S = 5 \text{ нГн}$, $V_{Th} = 5 \text{ В}$, $S = 7 \text{ А/В}$. Из сравнения кривых на рис. 3 и 5 следует, что расчетные и экспериментальные кривые хорошо согласуются как по форме, так и по порядку измеряемых величин. Некоторое различие сравниваемых кривых вполне объясняется ограничениями принятой модели МОП-транзистора.

Заключение

Показано, что в процессе включения МОП-транзистора в общем случае реализуются два режима: режим сверхбыстрого включения, не превышающий нескольких наносекунд, и режим медленного включения с постоянной установления SL_S . Временной границей этих режимов является момент времени, когда величина тока стока (точнее, тока i_T) достигает величины тока истока.

Установлено, что за счет предварительной накачки тока в индуктивности истока, осуществляемой по цепи затвора, максимальный ток стока в режиме сверхбыстрого включения может достигать десятков ампер.

Справедливость механизма сверхбыстрого включения и его математической модели подтверждены прямыми экспериментами.

Литература

1. Grekhov I.V., Kardo-Sysoev A.F. Subnanosecond Current Drops in Delayed Breakdown of Silicon P-N Junctions // Sov. Tech. Phys. Lett. – 1979. – V. 5. – № 8. – P. 395–396.
2. Grekhov I.V., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F., Shenderoy S.V. Power drift step-recovery diodes // Solid-State Electronics. – 1985. – V. 28. – № 6. – P. 597–599.
3. Behlke Power Electronics GmbH, Germany, Fast High Voltage Transistor Switches [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.behlke.de/>, своб.
4. Тогатов В.В., Гагарский С.В., Гнатюк П.А., Терновский Д.С. Высоковольтный импульсный модулятор с наносекундным фронтом // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 6. – С. 134–135.

- Тогатов Вячеслав Вячеславович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, v.togatov@mail.ru
- Гнатюк Петр Анастасьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, gnyatyuk@mail.ru
- Терновский Дмитрий Сергеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр техники и технологий, аспирант, dm-ternovsky@mail.ru

УДК 665.7.032.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЩЕННОГО
ПРОЦЕССА СЛОЕВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БУРОГО УГЛЯ
НА ВОЗДУШНОМ И КИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ****И.О. Михалев, С.Р. Исламов**

Выполнено экспериментальное исследование обращенного процесса слоевой газификации бурого угля на воздушном и кислородном дутье. Определены целевые режимы использования данного технологического процесса на воздушном дутье. Установлено существенное ускорение процесса газификации при переходе к кислородному дутью. Сформулированы способы интенсификации обращенного процесса газификации в зависимости от конкретной цели его применения.

Ключевые слова: уголь, обращенное дутье, слоевая газификация, интенсификация.

Введение

Обращенный процесс слоевой газификации угля (спутная подача топлива и окислителя) [1] имеет несколько принципиально важных отличий от широко известного классического способа со встречной подачей топлива и окислительного дутья. Во-первых, получаемый газ не содержит продуктов пиролиза, во-вторых, при определенных режимах можно производить частичную газификацию угля, т.е. его карбонизацию. В настоящее время эти особенности представляют значительный практический интерес в применении к переработке дешевых марок углей как с целью получения генераторного газа, не забалластированного смолами, так и с целью получения заменителя определенных марок классического кокса. Однако обращенный процесс имеет сравнительно низкую производительность. По этой причине в прошлом веке в период наиболее активного использования процессов газификации угля данная технология выбыла из конкурентной борьбы, что, в свою очередь, обусловило резкое снижение исследовательского интереса к этой теме и отсутствие достаточно подробных экспериментальных данных на сегодняшний день. Так, в работах [2, 3] частичная газификация угля практически не рассматривается. Автор [2] при аналогичной рассматриваемой в настоящей статье схеме организации процесса взаимодействия топлива с окислителем исследует технологию сжигания твердого топлива. В литературе, где подробно изучается газификация угля [3–5], обращенный процесс рассматривается только на качественном уровне; основное внимание, как правило, уделяется прямому процессу газификации. В этой связи необходимо отметить практически полное отсутствие количественных данных о процессе газификации с обращенным дутьем для различных видов угля. Тем более отсутствуют данные о влиянии состава подаваемого дутья на характеристики процесса газификации.

В условиях современной рыночной конъюнктуры отношение к обращенному процессу газификации угля, также известному в настоящее время как процесс «ТЕРМОКОКС-С», радикально изменилось [6]. Это вызывает необходимость детального исследования ее закономерностей как с целью непосредственного применения в промышленности, так и с целью поиска путей интенсификации технологического процесса.

Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов

Газификатор представляет собой вертикальный реактор шахтного типа периодического или непрерывного действия. В настоящем исследовании использован реактор

периодического действия диаметром 300 мм со стационарным слоем дробленого угля, в котором зажигание слоя осуществляется сверху, подача воздуха – снизу. При определенных условиях, спустя некоторое время после зажигания, в верхней части слоя формируется тепловая волна¹, которая затем перемещается навстречу дутью примерно с постоянной скоростью. Для измерения температуры слоя угля внутри засыпки равномерно с шагом 180 см стационарно размещены 7 защищенных ХА термопар с диаметром термочувствительного элемента 5,3 мм. Непрерывный анализ продуктового газа выполнялся с помощью газоанализатора «ГАММА-100».

В исследовании использован бурый уголь разреза «Бородинский» (марка 2Б) – наиболее перспективное сырье для обращенного процесса газификации. Характеристики угля, использованного в исследовании, приведены в таблице. Для оценки влияния фракционного состава угля и расхода воздуха на характеристики процесса газификации использованы узкие фракции 1–3, 3–5 и 5–8 мм (в дальнейшем просто «фракции»), а также широкая фракция 3–10 мм с равномерным распределением размеров частиц (далее для краткости – «полифракция»). Размеры частиц выбраны из соображений минимизации их термического сопротивления с целью обеспечения максимальной скорости переработки угля. Исследованный диапазон расходов воздуха охватывает область режимов от частичной карбонизации до полной газификации угля: 0,015–0,125 м³/(м²·с). Для изучения влияния расхода кислородного дутья на характеристики процесса использовалась фракция 3–5 мм. В качестве дутья был использован технический кислород. Изученный диапазон расходов кислорода в силу ограничений оборудования несколько уже, чем в случае воздушного дутья: 0,015–0,048 м³/(м²·с).

W_t^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	C^{daf} , %	O^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	Q_i^r , МДж
30,0	4,9	47,5	73,8	20,43	4,8	0,78	0,18	17,7

Таблица. Технический и элементный состав угля марки 2Б разреза «Бородинский»

В зависимости от фракционного состава сырья, расхода и типа дутья были получены следующие характеристики процесса газификации:

- скорость перемещения фронта тепловой волны по слою угля;
- скорость потери массы угля;
- удельный выход, химический состав и калорийность получаемого газа;
- выход твердого продукта (в процентах от массы угля) и его калорийность;
- максимальные температуры в тепловой волне.

Особое внимание в исследовании было уделено определению скорости обращенного процесса газификации, представляющей собой количество массы, переходящей из твердой фазы в газ в единицу времени, отнесенное к единице площади сечения реактора. Скорость процесса изменяется во времени при использовании реактора периодического действия, постепенно приближаясь к стационарному значению.

Исходная масса угля в расчетной зоне была известна из начальных условий эксперимента, а масса твердого остатка определялась как произведение массы исходного угля в данной зоне на коэффициент интегрального выхода твердого остатка (доля от массы исходного угля). Скорость газификации, кг/(м²·с), рассчитывалась как разность ме-

¹ Тепловая волна, по существу, представляет собой температурную проекцию волны физико-химических превращений, где происходит полное превращение вещества исходного угля в горючий газ и среднетемпературный кокс. Для краткости далее термином «фронт тепловой волны» будем обозначать переднюю границу волны физико-химических превращений.

жду этими массами, отнесенная ко времени прохождения фронтом тепловой волны рассматриваемого участка и к площади сечения реактора.

Результаты экспериментов

Характер изменения скорости газификации угля и фронта тепловой волны в исследованных режимах приведен на рис. 1. На рис. 2 представлены графики изменения выхода горючего газа и твердого продукта газификации в зависимости от фракции угля и расхода дутья. Для сравнения на графиках приведены соответствующие характеристики для промышленного процесса карбонизации, реализованного на заводе «Карбоника-Ф», г. Красноярск. На заводе используется уголь марки 2Б разреза «Бородинский» фракции 5–15 мм (далее для краткости – «широкая полифракция»).

Данные по скоростям процесса и фронта тепловой волны для кислородного дутья и фракции угля 3–5 мм представлены на рис. 3. На рис. 4 показаны графики соответствующего изменения выхода горючего газа и твердого продукта газификации.

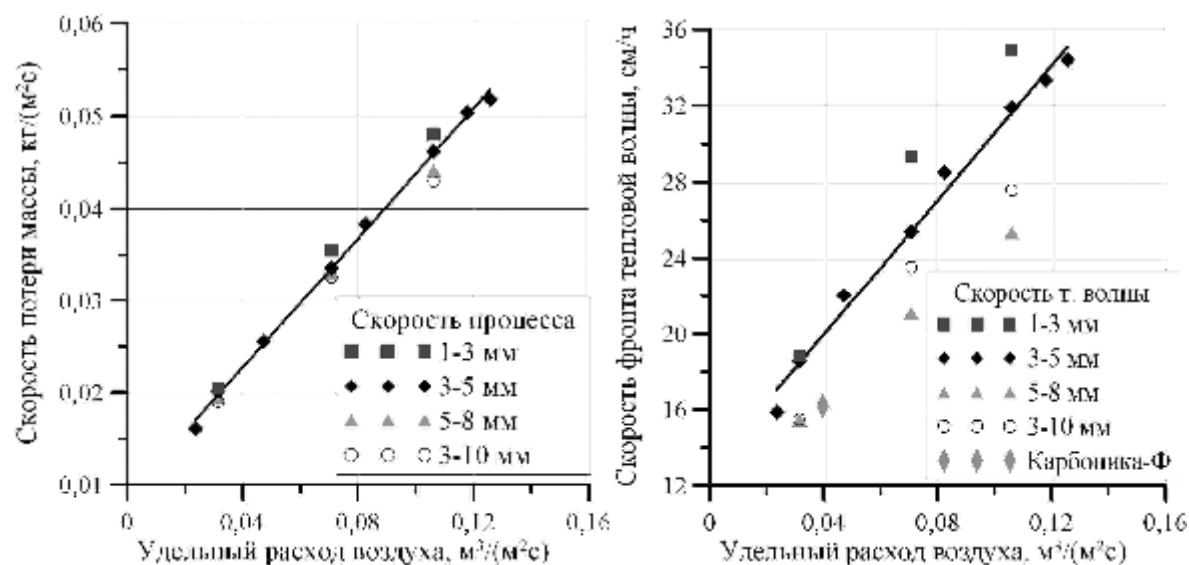


Рис. 1. Скорость процесса и скорость тепловой волны, воздушное дутье

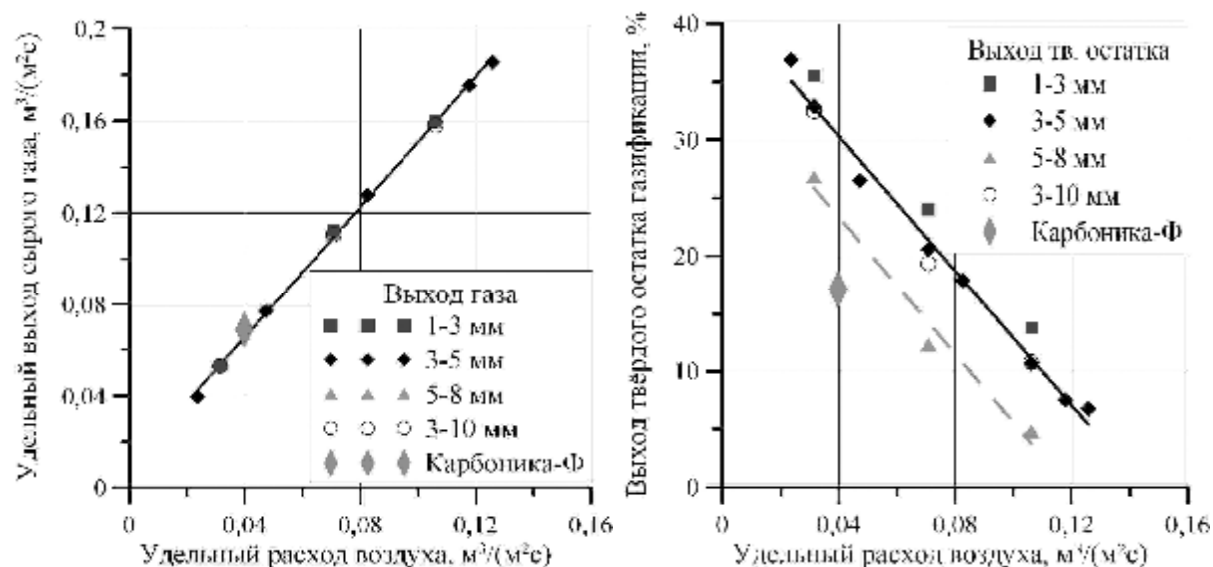


Рис. 2. Производительность реактора по горючему газу и твердому остатку, воздушное дутье

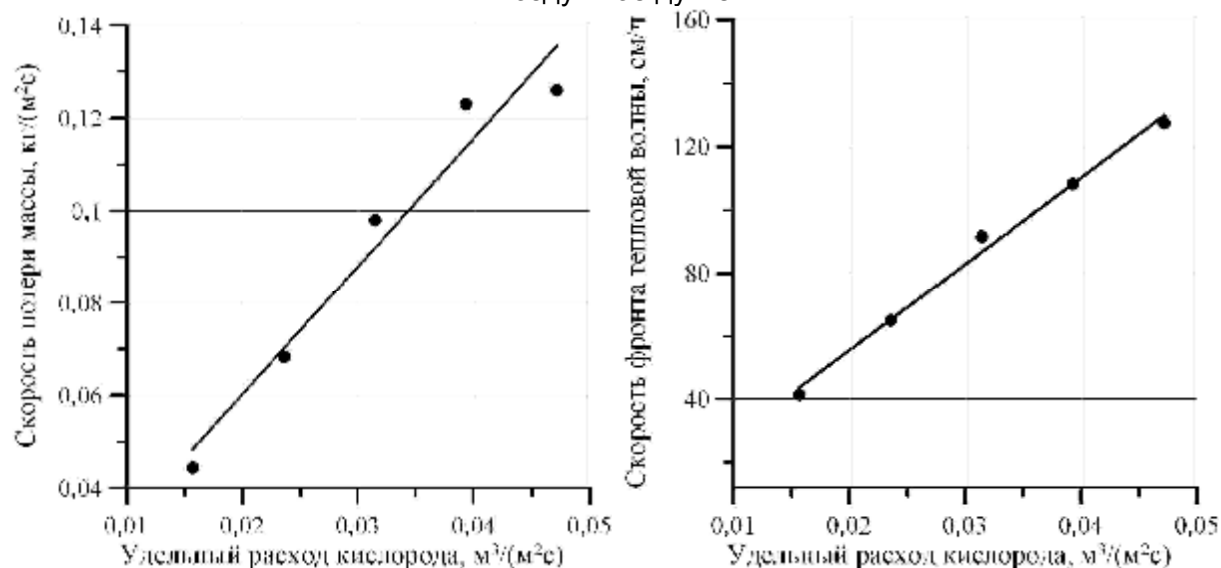


Рис. 3. Скорость процесса и скорость фронта тепловой волны, кислородное дутье

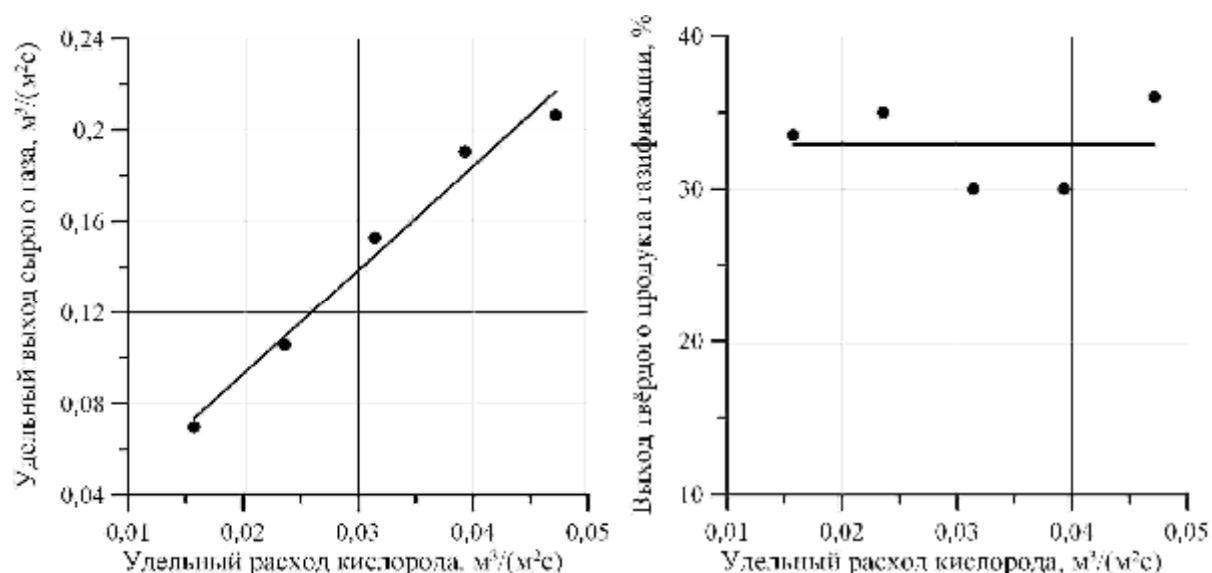


Рис. 4. Производительность реактора по горючему газу и твердому остатку, кислородное дутье

Обсуждение результатов

Скорость процесса газификации угля линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха (рис. 1). При этом она слабо зависит от фракционного состава сырья: можно видеть, что значения скорости процесса для исследованных фракций во всем диапазоне расходов воздуха практически укладываются в коридор погрешности. Одновременно со скоростью процесса увеличивается и скорость движения фронта тепловой волны. Важно отметить, что скорость волны возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха, а при одинаковом расходе дутья – с уменьшением размера фракции. Это не противоречит слабой зависимости суммарной скорости процесса от фракционного состава сырья: скорость тепловой волны, по сути, определяет пропорцию между масса-

ми газового и твердого продуктов газификации. Чем выше скорость тепловой волны при одном и том же расходе воздуха (чем меньше фракция сырья), тем больше процентный выход твердого продукта. Полифракция в области низких расходов дутья по скорости тепловой волны близка к фракции 5–8 мм, имеющей такой же средний размер частиц (6,5 мм). Однако с увеличением расхода дутья скорость тепловой волны для полифракции все сильнее отклоняется в сторону показателей более мелких фракций. Данные для широкой полифракции свидетельствуют о существовании нижнего предела скорости тепловой волны вблизи значений для фракции 5–8 мм, по крайней мере, в зоне карбонизации: существенное расширение и укрупнение фракции не приводит к дальнейшему уменьшению скорости тепловой волны в связи с этим параметром.

Удельный выход продуктового газа линейно возрастает с увеличением расхода дутьевого воздуха и не зависит от фракционного состава сырья (рис. 2). Калорийность газа в случае мелких фракций и полифракции имеет максимум в области больших расходов воздуха, чем в случае крупной фракции. При этом абсолютное значение максимума для фракции 3–5 мм выше, чем для фракции 5–8 мм. Следовательно, использование мелкой фракции позволяет получить более калорийный газ при большем расходе воздуха, чем в случае крупной фракции, с большей адиабатной температурой сгорания (благодаря повышенной температуре процесса), т.е. интенсифицировать процесс.

Выход твердого продукта газификации тем выше, чем меньше размер фракции (рис. 2). Полифракция по выходу твердого продукта во всем диапазоне расходов ближе к фракциям 1–3 и 3–5 мм. Данные по широкой полифракции дают основание предполагать дальнейшее снижение выхода твердого продукта газификации с увеличением среднего размера частиц угля.

Как видно из рис. 2, при низких значениях расхода дутьевого воздуха (приблизительно $0,022\text{--}0,047\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$) реализуется режим карбонизации, т.е. неполной газификации исходного угля. Выход твердого остатка в этом случае максимален, максимальна и его калорийность. Очевидно, что указанный диапазон может быть рекомендован для целевого получения среднетемпературного кокса. Горючий газ в этом случае является побочным продуктом.

При больших значениях расхода дутья (приблизительно $0,100\text{--}0,125\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$) реализуются режимы, близкие к полной газификации исходного угля: достигается максимальный выход горючего газа и максимум его калорийности за счет наибольших концентраций горючих компонентов.

Между этими зонами находится область смешанных режимов, в которых кокс и горючий газ производятся в соизмеримых количествах. Однако и физико-химические характеристики, и удельные выходы обоих продуктов сравнительно невысоки. При увеличении расхода воздуха за пределы зоны полной газификации процесс газификации постепенно трансформируется в процесс горения угля. Эти области режимов не представляют интереса с точки зрения практического использования изучаемого процесса.

С приближением концентрации окислителя в дутье к 100% при том же расходе дутья скорость процесса возрастает в 4–5 раз (см. рис. 1 и 3). Производимый при использовании кислородного дутья газ практически не содержит азота, поэтому после несложной переработки может быть использован в качестве синтез-газа при производстве синтетических углеводородов. Одновременно с газом во всем диапазоне исследованных расходов дутья производится постоянное и сравнительно большое количество среднетемпературного кокса (рис. 4). (Разброс значений выхода твердого продукта на рис. 4 обусловлен повышенной относительно воздушного дутья погрешностью эксперимента.) Получаемый с использованием кислородного дутья твердый продукт несколько уступает по качеству коксу, производимому в процессе карбонизации с ис-

пользованием воздушного дутья, однако по-прежнему обладает достаточно высокой и примерно постоянной калорийностью (порядка 25 МДж/кг) и может быть использован в качестве технологического топлива. Калорийность газа с увеличением расхода кислорода также остается примерно постоянной. Обнаружение изменений в обратном процессе слоевой газификации угля, возникающих при переходе от воздушного дутья к кислородному, легло в основу патента [7]. Новая технология слоевой газификации с обратным кислородным дутьем получила название «ТЕРМОКОКС-О₂».

Следует отметить качественное изменение характера поведения обратного процесса газификации на кислородном дутье по сравнению с использованием воздушного дутья. Выход твердого продукта при трехкратном увеличении расхода кислорода остается постоянным (рис. 4). При этом линейно возрастают скорость тепловой волны и выход продуктового газа. Качественно изменяется и сам газ. Напомним, в случае использования воздушного дутья с возрастанием выхода газа пропорционально уменьшался выход твердого продукта. По-видимому, подобное поведение процесса в случае использования кислородного дутья связано с возрастанием скорости выхода летучих компонентов из твердой фазы при повышении максимальной температуры процесса. При этом скорость перемещения высокотемпературной области по слою угля также возрастает, а, значит, уменьшается время нагрева частиц. Однако глубина проработки частиц топлива остается постоянной за счет более интенсивного нагрева при меньшем времени его воздействия. Таким образом, при повышении расхода дутьевого кислорода сохраняется баланс между подводимым окислителем и топливом (выходящими из угля летучими), что приводит к постоянству калорийности газа, а также калорийности и выхода твердого продукта. К сожалению, инерционность термопар на данном этапе не позволила при столь высоких скоростях процесса с достаточной точностью определить максимальную температуру в тепловой волне: это является задачей дальнейших исследований.

Заключение

Исследовано влияние расхода дутьевого воздуха, фракционного состава угля и расхода дутьевого кислорода на процесс слоевой газификации бурого угля с обратным дутьем. Определены диапазоны расходов дутьевого воздуха для целевых режимов работы слоевого газификатора. Изучены особенности технологических процессов в каждом из диапазонов, предложены способы их интенсификации. Обнаружен эффект существенного ускорения процесса при переходе к максимальной концентрации окислителя в дутье. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы газификаторов бурого угля с обратным воздушным дутьем на действующих заводах в России и Монголии, а также при проектировании новых предприятий на основе технологий «ТЕРМОКОКС-С» и «ТЕРМОКОКС-О₂» для бурых углей.

Литература

1. Пат. 2288937 РФ. Способ получения металлургического среднетемпературного кокса / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов (РФ). – № 2005132548/04; заявлено 24.10.2005; опубл. 10.12.2006, бюл. 34.
2. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – 2-е изд. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 396 с.
3. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива – М.: Металлургиздат, 1957. – 288 с.
4. Газификация угля / Г.-Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус. – М.: Недра, 1986. – 175 с.
5. Химические вещества из угля / Под ред. Ю. Фальбе. – М.: Химия, 1980. – 616 с.

6. Исламов С.Р. Современные процессы энерготехнологической переработки угля // Актуальные проблемы энергетики: м-лы III Междунар. науч.-практич. конф. – Екатеринбург: «ИРА УТК», 2007. – С. 88–90.
7. Пат. 2345116 РФ. МПК C10B 57/00, C10J 3.02 Способ получения кокса и синтез-газа при переработке угля / С.Р. Исламов, С.Г. Степанов, И.О. Михалев (РФ). – № 2007131530; заявлено 21.08.2007; опубл. 27.01.2009, бюл. 3.

<i>Михалев Игорь Олегович</i>	–	Сибирский федеральный университет, магистр техники и технологий, аспирант, инженер ООО «Энерготехнологическая компания «Сибтермо», Igor.O.Mikhaliyov@gmail.com
<i>Исламов Сергей Романович</i>	–	ООО «Энерготехнологическая компания «Сибтермо», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, генеральный директор

УДК 53.084.2

**ФОРМИРОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ НАНОВИСКЕРОВ
НА ВЕРШИНАХ ЗОНДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ
МИКРОСКОПИИ****А.О. Голубок, А.В. Ковров, В.В. Левичев, И.С. Мухин, О.А. Приходько**

В настоящее время широко распространены такие методы роста вискерров, как рост в установках молекулярно-пучковой эпитаксии, рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений, выращивание вискерров методами электролиза, электропереноса, метод лазерной абляции и т.д. В данной работе предложено расширение метода неконтролируемого самоорганизованного роста ансамбля вискерров под действием электронного пучка. Предлагаемый метод предполагает контролирование геометрии роста и свойств вискерров. Данную технологию роста одиночных вискерров можно применять в атомно-силовой микроскопии – создание суперзондов для исследования структур с развитым рельефом (глубокие каналы и впадины), для формирования острия при создании катодов и нанопинцетов.

Ключевые слова: вискеры, зондовая микроскопия, кантилевер, электронная микроскопия, рост вискерров.

Введение

Диагностические возможности сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) во многом определяются параметрами используемых нанозондов. В качестве стандартных зондов обычно используются острые металлические иглы для работы в режиме СТМ и кремниевые кантилеверы для работы в режиме ССМ [1]. Для улучшения пространственного разрешения или для решения специализированных задач создают зонды с особыми параметрами, формируя, например, на конце зонда нитевидные кристаллы – нановискеры (НВ).

В настоящее время известны различные варианты технологии выращивания систем ориентированных нитевидных кристаллов [2, 3]. Например, известен способ выращивания НВ на плотно упакованных гранях монокристаллических подложек [4]. Первоначально на поверхность подложки в определенном порядке наносятся частицы растворителя. Затем осуществляется рост НВ по механизму «пар–жидкость–кристалл» [5] путем осаждения материала на поверхность при нагреве из паровой фазы через частицы растворителя. Известен также метод формирования одиночного НВ на вершине острия кремниевого кантилевера [6]. В этом методе на исходную поверхность зонда первоначально напыляется несколько слоев необходимого материала. Затем на поверхность зонда фокусируется электронный пучок. В области фокусировки возникает зарождение НВ. Управление ростом НВ осуществляется посредством механического перемещения зонда относительно фокуса электронного пучка. Недостатком такой технологии является необходимость выполнения достаточно трудоемкой процедуры по напылению нескольких слоев материалов на исходный зонд, а также определенная ограниченность в управлении динамикой процесса и контролировании параметров роста НВ. Целью данной работы было развитие метода формирования одиночных НВ на вершинах зондов СЗМ.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Эксперименты проводились в рабочей камере растрового электронного микроскопа (РЭМ) Inspect FEI.

Максимальное ускоряющее напряжение составляло 30 кВ, диаметр сфокусированного электронного пучка – 2 нм. Исходный СЗМ-зонд (1) размещается на столике (2) РЭМ. Ниже зонда располагается мишень (3), представляющая собой металлическую поверхность с углеродным покрытием. Электронный пучок (4) фокусируется на вершине зонда, и осуществляется сканирование по области с небольшой площадью. При этом производится экспонирование как участка зонда (1), так и участка расположенной ниже мишени (3). В зоне экспонирования на поверхности зонда происходит зарождение НВ (5), наблюдаемое на экране РЭМ в режиме вторичных электронов. Задавая направление и скорость перемещения пучка электронов относительно неподвижного зонда, а также площадь экспонирования, ускоряющее напряжение и ток пучка, можно управлять ростом НВ.

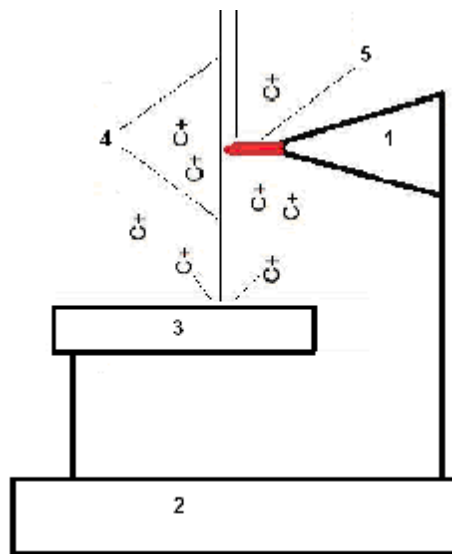


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для формирования одиночного нановискера на вершине зонда СЗМ. На рисунке: 1 – исходный зонд СЗМ, 2 – столик РЭМ, 3 – мишень с углеродным покрытием, 4 – пучок электронов, 5 – растущий НВ

Результаты эксперимента

Было обнаружено, что под действием сфокусированного электронного пучка на облучаемой поверхности происходит нарастание материала. При длительной экспозиции нарастание материала наблюдается на площади, значительно превышающей область сканирования. При смещении электронного пучка наблюдается рост НВ вдоль направления смещения. Обнаружено, что в большинстве случаев рост начинается практически мгновенно, причем скорость роста не постоянна, а зависит от тока пучка и ускоряющего напряжения. Элементный состав растущего материала был исследован с помощью рентгеновского микроанализатора. Как видно из рис. 2, в спектре присутствуют ярко выраженный углеродный пик и пик от алюминиевой подложки мишени.

В результате экспериментов выявлено следующее.

1. Рост НВ наблюдается при малых площадях сканирования $S < 25 \times 25 \text{ нм}^2$, причем при уменьшении размеров площади сканирования уменьшается и латеральный размер НВ.
2. Латеральный размер НВ значительно превышает размер площадки экспозиции (сканирования). Наименьший диаметр НВ, выращенного в экспериментах, составлял около 50 нм, а длина превышала 1 мкм.
3. В некоторых случаях рост начинается практически мгновенно.

4. Рост НВ продолжается и на больших расстояниях от начальной точки зарождения уса, при этом отмечается замедление скорости роста по мере увеличения длины НВ.
5. В большинстве экспериментов (кроме нескольких исключений) рост НВ происходил линейно без разветвлений.
6. При увеличении ускоряющего напряжения пучка скорость роста НВ также увеличивается. При малых энергиях электронов рост вообще не наблюдается.
7. Рост НВ происходит на поверхности различных материалов (вольфрам, платина, алюминий, железо, арсенид галлия и др.).
8. Без мишени рост НВ не наблюдается. В нескольких экспериментах наблюдался рост НВ без мишени, однако скорость роста при этом была значительно меньше.

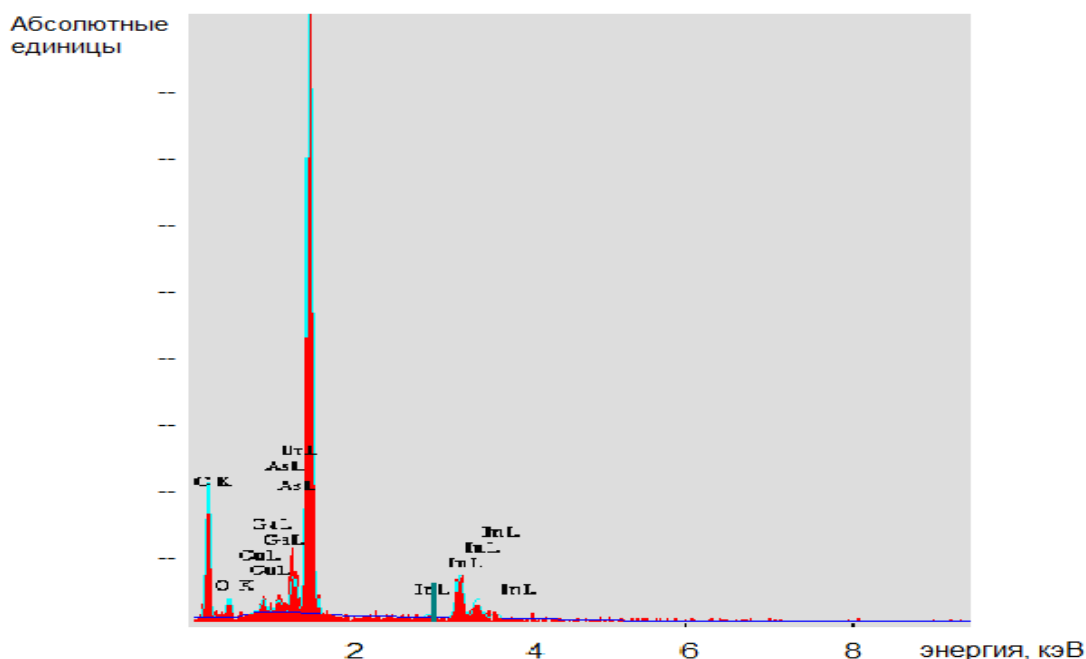


Рис. 2. Данные рентгеноспектрального микроанализа материала НВ

На рис. 3, а, б, представлены РЭМ-изображения углеродных НВ, выращенных на вершине вольфрамовой иглы и на вершине пирамидки кремниевого кантилевера соответственно. На рис. 3, в, представлено РЭМ-изображение углеродного НВ, выращенного на нановискере из GaAs. Предложенный метод позволяет получать НВ на любых поверхностях. Из рис. 3, в, г, видно, что длина НВ составляет около 1200 нм, диаметр вершины НВ составляет приблизительно 50 нм (рис. 3, г), а отношение длины выращенного НВ к диаметру – 24.

Выращенные на вершинах пирамид кантилеверов НВ были протестированы в атомно-силовом микроскопе (АСМ) при помощи калибровочной тест-решетки, представляющей собой упорядоченный ансамбль сверхтонких игл на плоской поверхности (рис. 4). Данная решетка предназначена для определения формы рабочей части СЗМ зондов при условии, что радиус зондов больше, чем радиус заострения игл. Период тест-решетки составлял 2 мкм, а радиус заострения игл имел величину около 2 нм, что позволяет хорошо прописывать кончик зонда. На рис 5, а, б, представлены АСМ изображения НВ, полученные с помощью тест-решетки.

В процессе исследований было выращено 10 вискеро-в на вершинах пирамидок кремниевых кантилеверов. Измерения диаметров НВ, выполненные с помощью РЭМ и АСМ, показали удовлетворительное соответствие результатов, полученных разными

методами. Диаметры вершин НВ лежали в диапазоне 150–50 нм. Длина НВ, измеренная с помощью РЭМ, составляла 1000 нм и более. Таким образом, с использованием описанной технологии удалось получить НВ с минимальным диаметром вершины порядка 50 нм и с отношением длины к диаметру более 20.

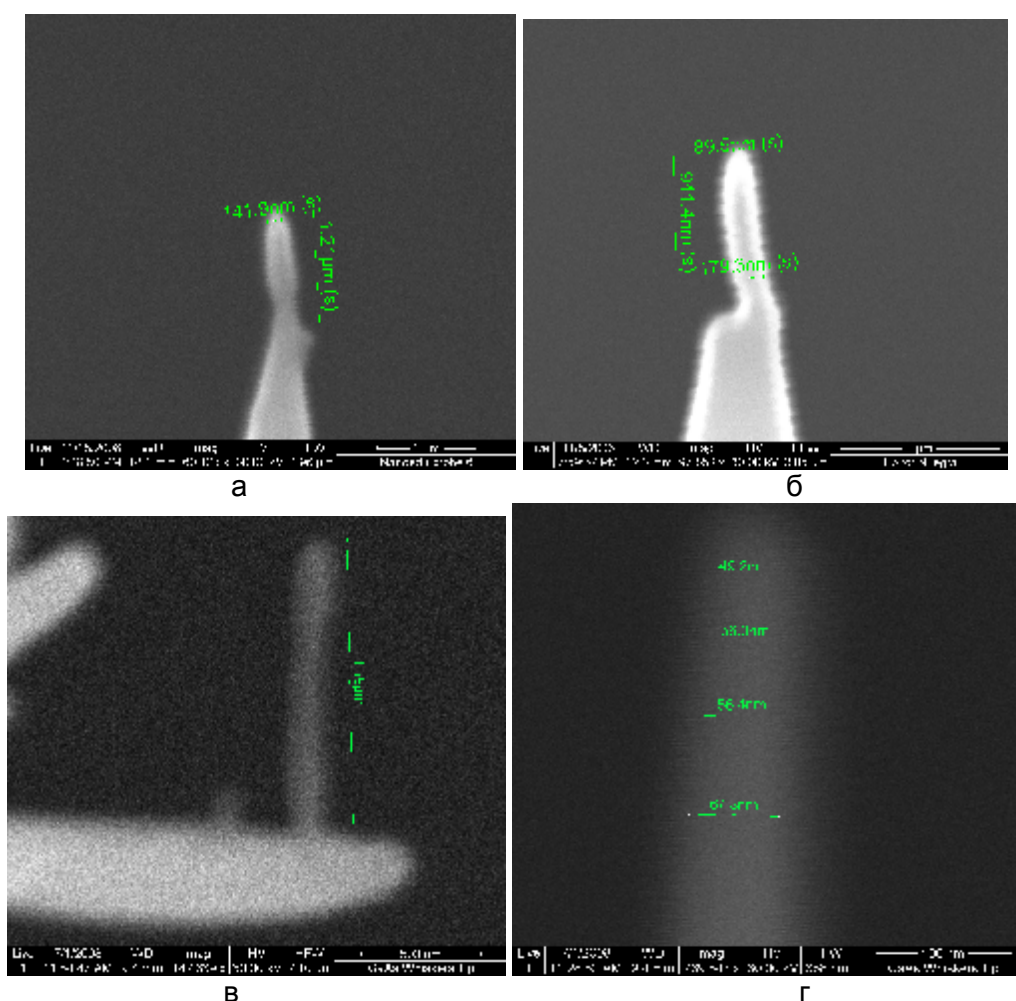


Рис. 3. РЭМ-изображения углеродных НВ: а – НВ, выращенный на W зонде (масштаб 1 мкм), б – НВ, выращенный на Si зонде (масштаб 1 мкм), в – НВ, выращенный на вискере GaAs (масштаб 500 нм), г – увеличенное изображение рис. 3, в (масштаб 100 нм)

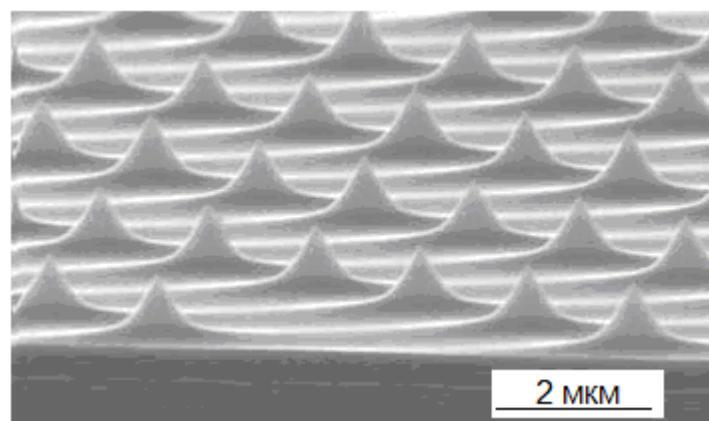


Рис. 4. РЭМ-изображение тест-решетки [1]

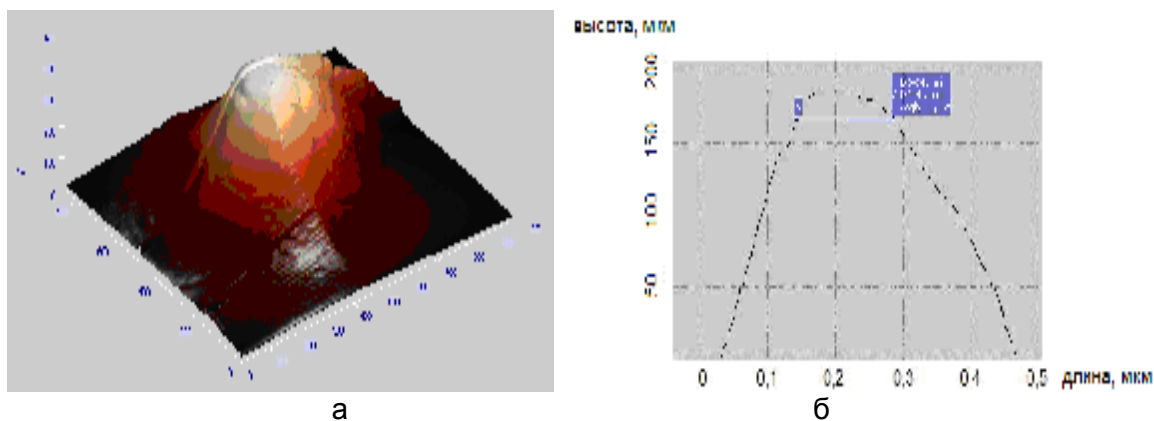


Рис. 5. а – трехмерное изображение вершины нановискера в АСМ (одно деление по каждой из осей составляет 100 нм), б – поперечное сечение АСМ изображения

Обсуждение результатов

Принимая во внимание полученные результаты, можно предложить следующий механизм роста НВ на вершине исходного зонда СЗМ. Под действием электронного пучка с энергией более 20 кэВ с поверхности мишени выбиваются положительно заряженные ионы углерода (энергия электронов значительно превосходит энергию ионизации атомов углерода). Таким образом, в пространстве около зонда СЗМ образуется «облако» из заряженных ионов углерода. В месте экспозиции пучка образуется отрицательно заряженная область, которая притягивает к себе положительные ионы углерода. Эта область и есть точка зарождения НВ. При перемещении места экспозиции электронного пучка в пространстве НВ как бы «тянется» за пучком. При этом растет одиночный (неразветвленный) НВ с диаметром 50–150 нм. Нагрев облучаемой электронным пучком области можно не принимать во внимание, поскольку грубые оценки сверху показывают, что происходит лишь незначительный (порядка единиц градусов) локальный разогрев. Тот факт, что в нескольких случаях наблюдался медленный рост НВ даже в отсутствии мишени, мы связываем с наличием остаточных углеродных покрытий на столике РЭМ и стенках камеры. Изменяя направление и скорость перемещения электронного пучка, площадь экспозиции, энергию и ток пучка, можно управлять процессом роста НВ за счет изменения пространственного положения зоны роста и скорости подачи материала в эту зону.

С поверхности подложки под действием электронного пучка летит, кроме ионов углерода, и атомарный углерод, а также оксид углерода. Большинство атомов, выбиваемых с поверхности подложки, летит ровно вверх, к кончику зонда. Поэтому возможен рост НВ из атомов углерода, которые осаждаются на кончике зонда. С поверхности подложки отрывается, в том числе, и оксид углерода, который, долетая до поверхности зонда, разлагается под действием электронного пучка. Эти механизмы тоже могут давать вклад в рост НВ.

Заключение

Описанная в работе технология позволяет выращивать одиночные углеродные НВ на вершинах СЗМ-зондов. Зонды, модифицированные по предложенной технологии, имеют высокое отношение длины к диаметру (более 20), что делает их перспективными для визуализации узких и глубоких каналов с вертикальными стенками. Используя данный метод, можно выращивать нанообъекты сложной формы, например, СЗМ-зонды в виде двух перпендикулярно расположенных острий. На основе таких зондов

может быть создана методика визуализации поверхности дна и стенок глубоких микроканалов.

НВ, выращенный на вершине металлической иглы по описанной выше технологии, представляет собой удобный объект для исследования методом туннельной спектроскопии. Используя иглу с НВ на вершине в качестве иглы СЗМ, легко создать туннельный контакт «игла с НВ – подложка». Если характеристики туннельного контакта «игла–подложка» измерены заранее, то, измеряя зависимость туннельного тока и его производных от напряжения в системе с НВ, можно получить информацию об электронной энергетической структуре НВ.

Следует провести дальнейшие исследования, направленные на поиск параметров, влияющих на латеральный размер НВ с целью уменьшения радиуса закругления его вершины. Это необходимо для создания СЗМ-зондов с высоким пространственным разрешением. Представляется также перспективным исследование состава и свойств НВ в зависимости от состава покрытия мишеней.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение», а также грантом компании Карл Цейс.

Литература

1. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 21–33.
2. Wagner R.S., Ellis W.C. Vapour-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth // Appl. Phys. Lett. – 1964. – V. 4. – № 5. – P. 89–90
3. Сыркин В.Г. Материалы будущего. – М.: Наука, 1990. – С. 5–91.
4. Патент 3535538 США / Lynch Gordon.
5. Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
6. Патент 2220429 РФ. Способ формирования сенсорного элемента сканирующего зондового микроскопа / Быков В.А., Саунин С.А., Михайлов Г.М., Аристов В.В., Дремов В.В.

<i>Голубок Александр Олегович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
<i>Ковров Александр Владимирович</i>		Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, shapun@mail.ru
<i>Левичев Вадим Вячеславович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, преподаватель, levichev.vadim@mail.ru
<i>Мухин Иван Сергеевич</i>	–	Академический физико-технологический университет РАН, студент, imukhin@yandex.ru
<i>Приходько Олег Анатольевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, oap4@pochta.ru

УДК 621.395.74

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯДРА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ
С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРИОРИТЕЗАЦИЕЙ
НЕОДНОРОДНОГО ТРАФИКА****Т.И. Алиев, И.Е. Никульский, В.О. Пяттаев**

Для ядра городской мультисервисной телекоммуникационной сети, ориентированной на передачу трех видов трафика (голос, видео и данные), разработаны математические модели в терминах теории массового обслуживания. Исследование характеристик функционирования (среднего значения и джиттера задержки кадров разных типов) проводится на основе комбинированного подхода, предполагающего совместное применение аналитических и имитационных методов. На основе многочисленных модельных экспериментов при различных предположениях о характере трафика и процесса обработки кадров в узлах выполнен подробный анализ характеристик функционирования сети при использовании способа управления трафиком на основе относительных приоритетов.

Ключевые слова: мультисервисная сеть, неоднородный трафик, характеристики качества обслуживания (QoS), сетевая задержка, джиттер задержки, относительные приоритеты, аналитическое и имитационное моделирование.

Введение

При переходе от традиционных телекоммуникационных сетей к мультисервисным сетям связи (МСС) следующего поколения (NGN – Next Generation Networks) возникает множество технологических, методологических и других проблем, среди которых центральное место занимает проблема обеспечения требуемого качества обслуживания (QoS – Quality of Service) для различных видов трафика и, особенно, для речи. Технологической основой построения мультисервисных сетей является стек протоколов IP/MPLS/Ethernet [1], реализующий пакетную передачу и коммутацию всех видов трафика. Для прогнозирования качества обслуживания на этапе сетевого планирования широкое применение находят методы математического моделирования проектируемой сети.

Основные подходы к оценке качества обслуживания сетей IP специфицированы в Рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [2], в соответствии с которой основными показателями качества обслуживания мультимедийного трафика служат средняя сетевая задержка передачи пакета (кадра) u_N и ее вариация (джиттер) σ_N . В то же время большинство исследований подобного рода сетей ограничиваются в основном подробным анализом средней задержки, а анализ джиттера проводится без учета приоритетного механизма управления трафиком в узлах сети. В данной работе с использованием комбинированного подхода к исследованию QoS, предполагающего совместное применение аналитических и имитационных методов, выполнена оценка и детальный анализ показателей качества обслуживания неоднородного трафика с управлением в узлах сети на основе относительных приоритетов.

Объект исследования

Сложность и большая размерность мультисервисных сетей приводят к необходимости применения в качестве основного подхода к исследованию МСС принципа декомпозиции, основанного на делении сети в соответствии с ее иерархической организацией на уровни с последующим их отдельным исследованием. В современных МСС

можно выделить следующие уровни: доступа, агрегирования доступа, ядра МСС и агрегирования услуг.

Ядро (магистраль) МСС является самым мощным и высокопроизводительным фрагментом сети, обеспечивающим перенос и коммутацию больших потоков данных, поступающих от нижних иерархических уровней, а также от уровня агрегирования услуг [3]. Для получения высокой производительности и низких значений задержки на рассматриваемом участке сети применяются высокоскоростные оптические каналы связи, а также специализированные высокопроизводительные маршрутизаторы, использующие технологию MPLS.

В зависимости от передаваемой нагрузки, производительности используемых маршрутизаторов и требуемых значений задержки могут быть выбраны разные варианты топологии ядра сети (рис. 1), различающиеся производительностью, способностью выравнивания нагрузки и стоимостью. Такими топологиями являются: кольцо (рис. 1, а); частичносвязная (рис. 1, б); полносвязная (рис. 1, в).

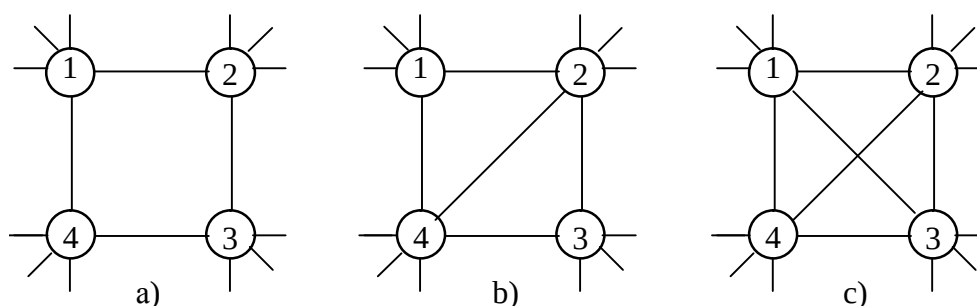


Рис. 1. Топологии ядра МСС

В качестве протокольной единицы в исследуемой сети рассматривается кадр Ethernet. Процесс передачи кадров в рассматриваемом фрагменте сети сводится к следующему. Потоки кадров с присоединенными метками поступают от граничных маршрутизаторов на входы портов маршрутизаторов ядра сети. В соответствии с применяемыми процедурами дифференцированного обслуживания различных классов трафика, реализуемыми в узлах MPLS, поступающие потоки на основе анализа аппаратно-программными средствами маршрутизаторов меток, присоединенных к кадрам, разделяются на три очереди, соответствующие трем рассматриваемым классам обслуживания. Эти очереди различаются длинами поступающих в них кадров, а также приоритетами их обслуживания. Выбираемые из очередей кадры передаются в соответствующие выходные порты маршрутизаторов и далее по каналам связи – на другие маршрутизаторы ядра сети.

Модели ядра и узла МСС

Модель ядра МСС (рис. 2), представленная в виде графа разомкнутой сети массового обслуживания (СеМО), соответствует наиболее общей полносвязной топологии. Узел 0 СеМО отображает внешнюю среду, в качестве которой выступают уровни агрегирования доступа и агрегирования услуг, а узлы 1–4 – обработку кадров в маршрутизаторах ядра МСС и их передачу по каналам связи. Маршруты передаваемых кадров описываются в модели вероятностями передач p_{ij} ($i, j = \overline{0,4}$), причем $\sum_{j=0}^4 p_{ij} = 1$ для всех $i = \overline{0,4}$.

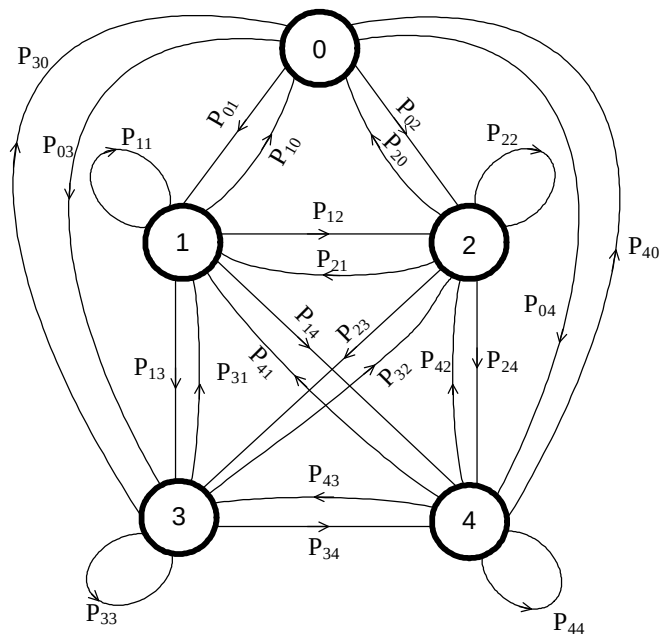


Рис. 2. Граф модели ядра МСС

Таким образом, рассмотренный фрагмент сети представляет собой систему, включающую большое число распределенных взаимосвязанных ресурсов, выполняющих действия с заявками (кадрами). При этом заявки могут передаваться и перераспределяться между этими ресурсами.

Модель узла (маршрутизатора) может быть представлена в виде разомкнутой трехфазной СеМО (рис. 3). В фазе 1 выполняется прием поступающих с интенсивностью Λ кадров Ethernet в накопитель, анализ меток и распределение кадров по трем очередям: 1) речевые (VoIP – Voice over IP); 2) видео (IPTV); 3) данные (DoIP – Data over IP). В фазе 2 реализуется передача кадров в выходные порты маршрутизатора в соответствии с маршрутной таблицей и присвоенными очередям приоритетами. В фазе 3 осуществляется передача кадров к другим маршрутизаторам ядра или к пограничным маршрутизаторам, расположенным в сети агрегирования доступа или в сети агрегирования услуг.

Большинство современных маршрутизаторов используют параллельную обработку кадров сверхбыстродействующими аппаратными средствами, поэтому время обработки кадров незначительно (несколько микросекунд), а основной вклад в задержку вносят время передачи и время ожидания в очередях.

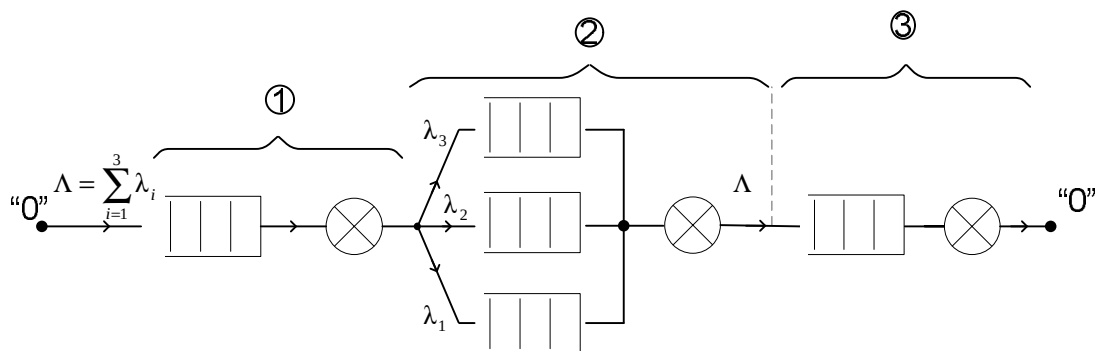


Рис. 3. Модель узла МСС

Исследование модели ядра сети выполнялось с применением аналитических и статистических методов при следующих предположениях и допущениях, принятых на основе анализа характеристик современного сетевого оборудования, используемого для построения МСС, и протоколов передачи данных в сетях NGN. Из внешней среды поступают кадры трех типов: 1) VoIP (речь) с интенсивностью $\lambda_1 = 0,12\Lambda$; 2) IPTV (видео) с интенсивностью $\lambda_2 = 0,2\Lambda$; 3) DoIP (данные) с интенсивностью $\lambda_3 = 0,68\Lambda$, где Λ – суммарная интенсивность потока кадров, варьируемая величина при аналитических расчетах и проведении имитационных экспериментов. Кадрам разных типов назначены приоритеты, причем наивысший приоритет имеют кадры VoIP, а самый низкий – кадры DoIP.

Обслуживание в первой фазе – беспriorитетное со средней длительностью $b_1 \approx 0,5$ мкс, включающей время приема кадра в буфер приемника. Обслуживание во второй фазе – с относительными приоритетами, причем длительности обслуживания кадров разных типов равны $b_{21} = 0,5$ мкс, $b_{22} = 1$ мкс, $b_{23} = 3$ мкс соответственно. Длительность обслуживания в третьей (беспriorитетной) фазе $b_3 \approx 0,5$ мкс.

Аналитическое моделирование МСС

Аналитическое моделирование базируется на математическом аппарате теории массового обслуживания и толерантном преобразовании разомкнутых СеМО, позволяющем свести задачу расчета неоднородной приоритетной СеМО к расчету независимых одноканальных систем массового обслуживания (СМО) M/G/1, что в терминах символики Кендалла [4] означает: поступающие заявки (кадры) разных типов образуют простейшие (марковские) потоки (M – Markovian), а длительности обслуживания заявок распределены по произвольному закону общего вида (G – General). Таким образом, в качестве базовой математической модели, отображающей обработку кадра в одной фазе узла, будем рассматривать СМО типа M/G/1 с неоднородным потоком заявок и, в общем случае, приоритетным обслуживанием. Для расчета базовой модели воспользуемся результатами, полученными в [5].

Средняя задержка кадров типа k ($k = 1, 2, 3$) в приоритетной фазе i определяется как среднее время пребывания заявок в СМО типа M/G/1 с относительными приоритетами [5]:

$$u_{ik} = w_{ik} + b_{ik}, \quad (1)$$

где b_{ik} – среднее время обработки кадров; w_{ik} – среднее время ожидания в очереди:

$$w_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})(1 - R_{ik})}. \quad (2)$$

Джиттер задержки кадров типа k ($k = 1, 2, 3$) представляет собой среднеквадратическое отклонение времени пребывания заявок и определяется как

$$\sigma_{ik} = \sqrt{w_{ik}^{(2)} + 2w_{ik}b_{ik} + b_{ik}^{(2)} - u_{ik}^2}, \quad (3)$$

где $b_{ik}^{(2)}$ и $w_{ik}^{(2)}$ – вторые начальные моменты времени обслуживания и ожидания в очередях соответственно:

$$w_{ik}^{(2)} = \frac{\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(3)}}{3(1 - R_{ik-1})^2(1 - R_{ik})} + \frac{\sum_{j=1}^k \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)} \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})^2(1 - R_{ik})^2} + \frac{\sum_{j=1}^{k-1} \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)} \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1 - R_{ik-1})^3(1 - R_{ik})}. \quad (4)$$

В выражениях (2)–(4) используются следующие обозначения: $R_{ik} = \sum_{j=1}^k \rho_{ij} = \sum_{j=1}^k \lambda_{ij} b_{ij}$ – частичная суммарная нагрузка, создаваемая первыми k классами ($k = 1, 2, 3$), причем $R_0 = 0$; λ_{ij} – интенсивность потока заявок типа j ; $b_{ij}^{(2)}$ и $b_{ij}^{(3)}$ – соответственно второй и третий начальные моменты времени обслуживания заявок типа $j = \overline{1, 3}$ в фазе $i = \overline{1, 3}$.

Значения $b_{ij}^{(2)}$ и $b_{ij}^{(3)}$ могут быть получены экспериментальным путем в процессе измерения реальных параметров обработки данных в маршрутизаторах или рассчитаны для заданных априори конкретных законов распределений.

Для фаз, в которых реализуется бесприоритетная обработка кадров, после преобразования выражений (1)–(4) получим следующие формулы для расчета среднего значения и джиттера задержки кадров типа k :

$$u_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)}}{2(1-R_i)} + b_{ik}; \quad \sigma_{ik} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(3)}}{3(1-R_i)} + \frac{\left(\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} b_{ij}^{(2)}\right)^2}{4(1-R_i)^2} + b_{ik}^{(2)} - b_{ik}^2},$$

где $R_i = R_{i3}$ – суммарная нагрузка системы. Среднее значение и джиттер задержки кадров типа k в узле определяются по формулам

$$u_y = \sum_{i=1}^3 u_{ik}, \quad \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sigma_{ik}^2}.$$

Средняя сетевая задержка и ее джиттер вычисляются через соответствующие значения узловых характеристик:

$$u_N = \sum_{j=1}^N \alpha_j u_j, \quad \sigma_N = \sqrt{\sum_{j=1}^N \alpha_j \sigma_j^2}, \quad (5)$$

где N – число узлов в сети; σ_j – джиттер задержки в узле $j = \overline{1, N}$; u_j – средняя задержка заявки в узле j ; α_j – коэффициент передачи для узла j СеМО. Коэффициенты передач α_j , используемые в выражениях (5), вычисляются на основе матрицы вероятностей передач путем решения системы линейных алгебраических уравнений

$$\alpha_j = \sum_{i=0}^N p_{ij} \alpha_i, \quad (j = 0, 1, \mathbf{K}, N)$$

с учетом того, что $\alpha_0 = 1$. Выражения (1)–(5) получены для стационарного режима функционирования сети, в которой узлы и каналы связи абсолютно надежны.

С использованием предложенных аналитических моделей сети и узла выполнен анализ влияния различных типовых топологий (рис. 1) на характеристики качества функционирования ядра МСС. При этом связность сегментов сети представленных топологий задавалась соответствующими матрицами вероятностей передач:

$$P_a = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,5 & 0 & 0,25 & 0 & 0,25 \\ 0,5 & 0,25 & 0 & 0,25 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,25 & 0 & 0,25 \\ 0,5 & 0,25 & 0 & 0,25 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}; \quad P_b = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,64 & 0 & 0,18 & 0,19 & 0 \\ 0,44 & 0,19 & 0 & 0,25 & 0,18 \\ 0,64 & 0 & 0,18 & 0 & 0,18 \\ 0,44 & 0,19 & 0,19 & 0,18 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix};$$

$$P_c = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,57 & 0 & 0,14 & 0,14 & 0,15 \\ 0,57 & 0,14 & 0 & 0,14 & 0,15 \\ 0,57 & 0,14 & 0,14 & 0 & 0,15 \\ 0,57 & 0,14 & 0,14 & 0,15 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

В результате расчета характеристик передачи кадров с использованием выражений (1)–(5) при различных входных параметрах получены зависимости средней сетевой задержки ядра МСС от интенсивности входного потока заявок для различных топологий (рис. 4, а) и зависимости средней задержки в узлах для различных типов трафика от интенсивности входного потока заявок (рис. 4, б). Анализ полученных результатов показывает, что минимальная сетевая задержка характерна для топологий с большей связностью. С ростом загрузки сети (за счет интенсивности поступления кадров) увеличивается различие между значениями задержек для кольцевой и полносвязной топологий, которое может достигать 100% и более. Кроме того, для кадров VoIP, обладающих самым высоким относительным приоритетом, обеспечивается достаточно хорошее качество обслуживания в узле, т.е. небольшое время задержки, даже при возникновении перегрузок сети, когда суммарная нагрузка становится больше единицы. Это свойство, называемое защитой от перегрузок, обеспечивается за счет существенного увеличения задержки низкоприоритетных кадров DoIP, время ожидания которых в узле резко возрастает.

При достижении суммарной нагрузки, создаваемой кадрами всех трех типов, значения 1 время ожидания кадров 3-го типа (DoIP) начинает увеличиваться, что, в конечном счете, при ограниченной емкости буферной памяти узла приводит к отказу в обслуживании, при этом приоритетные кадры типа 1 (VoIP) и типа 2 (IPTV) продолжают обслуживаться и имеют конечное время ожидания. Дальнейшее увеличение нагрузки может привести к потере кадров IPTV, когда создаваемая кадрами VoIP и IPTV нагрузка достигнет значения 1. Отметим, что при беспriorитетном обслуживании защита от перегрузок отсутствует для всех типов кадров.

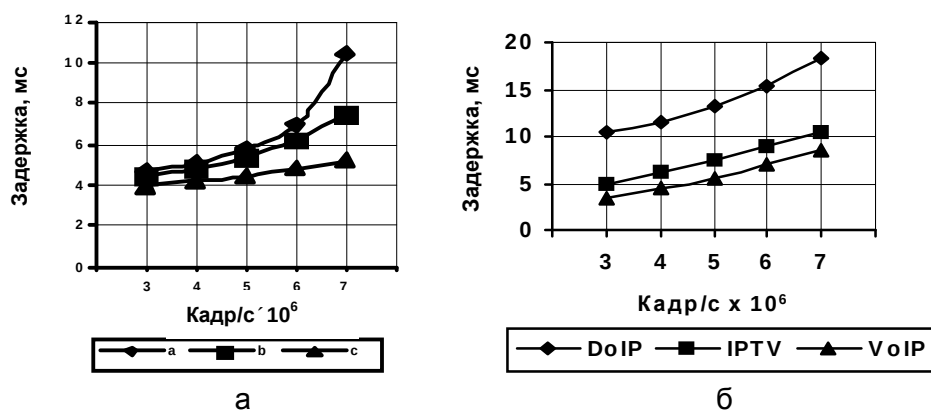


Рис. 4. Задержка для различных топологий МСС (а) и типов трафика (б)

Приоритетное обслуживание обеспечивает существенное снижение задержки для высокоприоритетных типов трафика VoIP и IPTV как в узлах сети, так и в ядре МСС. Полученные с использованием выражения (3) значения джиттера задержки для трафика данных (DoIP) с наименьшим приоритетом значительно превышают значения для высокоприоритетных типов трафика и меняются нелинейно с ростом нагрузки (рис. 5).

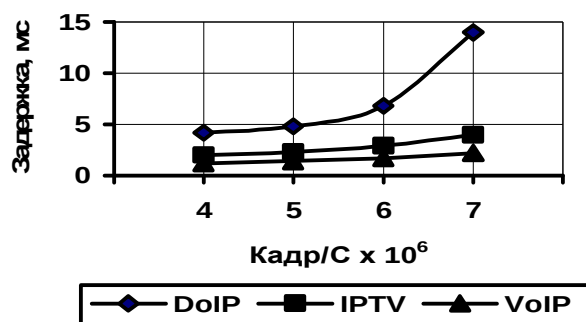


Рис. 5. Джиттер задержки для различных типов трафика

Имитационное моделирование МСС

Для оценки различий между результатами аналитического моделирования при использовании предположения о пуассоновском характере входного потока и при потоках, отличных от пуассоновских, была разработана имитационная модель узла (рис. 3) с неоднородным потоком заявок и приоритетным обслуживанием в среде GPSS World. В модели была заложена возможность выбора следующих законов распределений интервалов между поступлением заявок входного потока: пуассоновского, Эрланга и гиперэкспоненциального. Эти же распределения использовались для интервалов обработки кадров во всех фазах модели узла ядра ММС (рис. 3).

На рис. 6 представлены результаты аналитического и имитационного моделирования, показывающие зависимости средних задержек кадров разных типов в узле ядра МСС от интенсивности входного потока.

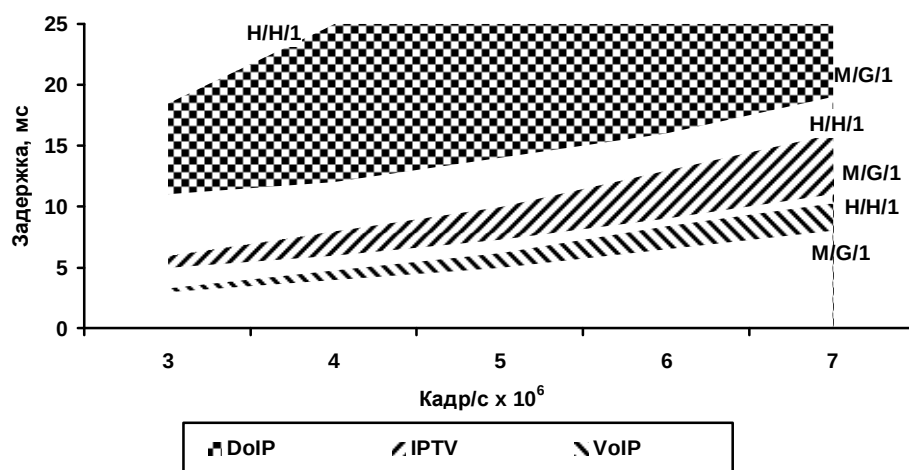


Рис. 6. Сопоставление результатов имитационного и аналитического моделирования

Три заштрихованные области для трех видов трафика с различными приоритетами обслуживания кадров в узле МСС характеризуют области значений задержек кадров при различных законах распределений потоков поступающих кадров и длительностей их обработки в узле МСС.

Нижние границы заштрихованных областей соответствуют результатам моделирования с пуассоновской моделью входного потока (M/G/1). В этом случае результаты аналитического и имитационного моделирования практически не отличаются. Верхние границы этих областей соответствуют результатам имитационного моделирования при

использовании наиболее тяжелого режима – гиперэкспоненциального распределения интервалов во входном потоке и гиперэкспоненциального распределения интервалов обслуживания, что в терминах символики Кендалла обозначается как СМО H/H/1. Основанием для выбора гиперэкспоненциального распределения с коэффициентом вариации, равным 3, может служить то, что это распределение позволяет смоделировать наиболее тяжелый режим функционирования ядра МСС. Это объясняется следующими обстоятельствами. С одной стороны, при гиперэкспоненциальном распределении интервалов между поступающими в сеть кадрами существует большая вероятность появления небольших интервалов, что приводит к группированию поступающих кадров и созданию в некоторые периоды времени больших нагрузок. Так, например, при гиперэкспоненциальном распределении вероятность того, что интервалы между поступающими в сеть кадрами будут меньше среднего значения, превышает 0,8, в то время как для пуассоновского потока эта вероятность равна 0,63. С другой стороны, наличие так называемого «тяжелого хвоста» гиперэкспоненциального распределения, означающего, что вероятность появления больших значений случайной величины значительно отличается от нуля, может вызывать большие задержки при обработке кадров в узлах. Кроме того, такое распределение в ряде случаев с высокой степенью адекватности отражает характер входного потока и обслуживания в IP-сетях.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наименьшие расхождения результатов моделирования при различных предположениях о характере трафика и обслуживания кадров в узлах наблюдаются в областях малых нагрузок для трафика с высоким приоритетом VoIP, чувствительного к задержкам. В области больших нагрузок для этого трафика расхождения увеличиваются и составляют 1,6–1,8 раз. Для эластичного (малочувствительного к задержкам) трафика DoIP с наименьшим приоритетом расхождения могут составлять 2–8 раз в зависимости от уровня загрузки.

Заключение

Выполненные исследования с использованием разработанных аналитических и имитационных моделей ядра МСС показали, что использование приоритетной обработки кадров в узлах не только обеспечивает для наиболее чувствительного трафика VoIP наименьшую среднюю задержку, но и позволяет минимизировать джиттер задержки. При этом различие между характеристиками высокоприоритетного трафика при разных законах распределений интервалов между поступающими кадрами и времени их обработки лежит в приемлемых для практики пределах для значений загрузки узлов и каналов связи в интервале от 0,1 до 0,7. Последнее обстоятельство дает основание полагать, что данные модели могут быть использованы для оценочных расчетов сегментов мультисервисных сетей в режимах малых и средних нагрузок при потоках заявок, отличных от простейшего. Дальнейшие исследования представляется целесообразным направить на поиск приближений для моделей СМО типа G/G/1 с неоднородным потоком заявок и приоритетным обслуживанием, что позволит проводить анализ качества обслуживания в современных сетях с произвольным распределением интервалов во входном потоке и обслуживания, в том числе использовать распределения, обладающие свойствами самоподобия.

Литература

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технологии и протоколы MPLS. – СПб: БХВ–Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.: ил.

2. ITU-T Recommendation Y.1541 (02/2006) – Network performance objectives for IP-based services.
3. Aliev T.I., Nikulsky I.Y., Pyattaev V.O. Modeling of packet switching network with relative prioritization for different traffic types // ICAT. – 2008, Feb. 17–20. – S. 2174–2176.
4. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
5. Алиев Т.И. Характеристики дисциплин обслуживания заявок с несколькими классами приоритетов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1987. – № 6. – С.188–191.
6. Руководство пользователя по GPSS World / Пер. с англ. – Казань: «Мастер Лайн», 2002. – 384 с.

<i>Алиев Тауфик Измаилович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, alive@d1.ifmo.ru
<i>Никольский Игорь Евгеньевич</i>	–	Ленинградский отраслевой НИИ связи (ФГУП ЛОНИИС), кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, nikul@loniis.org
<i>Пяттаев Владислав Олегович</i>	–	Ленинградский отраслевой НИИ связи (ФГУП ЛОНИИС), кандидат технических наук, зам. генерального директора, pvo@loniis.org

УДК 004.627

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОТЕРЯМИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО КВАНТОВАНИЯ Ю.В. Лужков, А.Ю. Тропченко

Предложен метод вычисления значений коэффициентов вектора квантования для схем сжатия изображений с потерями, основанный на использовании весового критерия. Проведено сравнение базовой схемы JPEG и ее модификации на основе разработанного метода. Данная модификация превосходит схему JPEG на 10–25 %. Произведено обобщение метода для схем сжатия на основе адаптивной сегментации.

Ключевые слова: сжатие изображений, адаптивное квантование, весовой критерий, JPEG.

Введение

На сегодняшний день широко распространены схемы сжатия на основе спектральных преобразований сигнала. Среди таких преобразований – дискретное косинусное преобразование (ДКП), дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) и некоторые другие. Вследствие широкой распространенности таких схем сжатия актуальным становится следующий вопрос: возможно ли модифицировать существующую схему компрессии таким образом, чтобы повысить степень сжатия, не меняя при этом алгоритм декомпрессии? Решение этой задачи позволит вносить изменения в существующие программы-компрессоры, не заботясь о наличии у пользователей специального (модифицированного) программного обеспечения для декомпрессии изображений.

В описываемых алгоритмах сжатия используются некоторые параметры по умолчанию. Например, в формате JPEG (Joint Photographic Experts Group) [1] к таким параметрам относятся матрицы квантования и таблицы Хаффмана: они сохраняются в заголовке сжатого файла, и формат допускает самостоятельное определение пользователем их значений, что является одним из путей повышения степени компрессии.

На сегодняшний день известно несколько методов определения векторов квантования коэффициентов спектра. С. Ву и А. Гершо в работе [2] предлагают метод на основе пошагового изменения его значений. Изначально все коэффициенты инициализируются максимальными значениями. На каждом шаге производится уменьшение одного из коэффициентов на некоторую величину. Поскольку оптимизация вектора проводится только в направлении уменьшения коэффициентов, ее можно назвать односторонней.

Х. Фунг и К. Паркер в работе [3] предлагают двусторонний метод оптимизации: на очередном шаге алгоритма коррекция коэффициента может производиться как в сторону уменьшения его значения, так и в сторону увеличения.

В работе [4] предлагается метод вычисления вектора квантования, основанный на *RD*-оптимизации. Схема имеет принципиальное отличие от пошаговых односторонних и двусторонних схем: вычисления значений вектора квантования проводятся сразу для многих значений битрейта R или значений искажения D , а выбор нужного набора коэффициентов осуществляется в самом конце из множества вариантов.

Все описанные схемы используют в качестве оценки битрейта энтропийную функцию, аппроксимирующую результат сжатия. Поскольку битрейт в значительной степени зависит от применяемых методов вторичного сжатия (например, статистического кодирования или кодирования длин серий), энтропийная функция не является универсальной и должна определяться для конкретной схемы сжатия.

В данной работе предлагается метод вычисления вектора квантования, не использующий энтропийные оценки. Он основан на сборе статистической информации о сигнале, которая оценивается с помощью специального критерия. Коэффициенты вектора квантования вычисляются в соответствии со значениями данного критерия. Благодаря этому алгоритм вычисления вектора является универсальным и может быть использован во многих схемах компрессии без существенных изменений.

Вычисление вектора квантования на основе весового критерия

Известно, что энергия сигнала распределяется между спектральными коэффициентами неравномерно. Более того, существует выраженная зависимость распределения энергии от номера спектральной позиции в окне сканирования. Идея предлагаемого метода заключается в том, чтобы квантовать коэффициенты на данной спектральной позиции n с шагом квантования Δ , значение которого зависит от степени значимости этой спектральной позиции с точки зрения распределения энергии спектра. Таким образом, необходимо определить функцию шага квантования $\Delta(\vec{z}, n)$, где $\vec{z}$ – вектор спектральных коэффициентов.

Чтобы оценить значимость каждой спектральной позиции n для всех M одинаковых по размеру блоков с номерами $m = 0, 1, \dots, M-1$, вводится специальный весовой критерий T . В работе [5] рассмотрено несколько способов его задания и отмечено, что в ряде случаев выгоден способ вычисления критерия на основе максимальных значений амплитуд спектральных коэффициентов $z_{n,m}$:

$$T_n = \max |z_{n,m}|. \quad (1)$$

Пример зависимости величины критерия T (его целочисленные значения упорядочены по убыванию) от номера позиции n спектрального коэффициента приведен на рис. 1. Сплошная линия соответствует составляющей яркости Y , пунктир – хроматическим составляющим Cb и Cr .

Рассмотрим вопрос определения функции шага квантования $\Delta(\vec{z}, n)$. Пусть ее значения должны быть ограничены диапазоном $[a_1, a_2]$, $0 \leq a_1 < a_2$. Введем функцию от T :

$$E(T) = a_1 + \frac{f(T_{\max}) - f(T_n)}{f(T_{\max}) - f(T_{\min})} (a_2 - a_1), \quad (2)$$

где f – корректирующая функция. Поскольку любой T_n в общем случае зависит от всех элементов исходного спектрального вектора $\vec{z}$, функция E также зависит от $\vec{z}$. Фактически это есть функция шага квантования сигнала $\Delta(\vec{z}, n)$. Введем обозначение $f(\vec{z}, n) = f(T_n)$. Тогда формула (2) окончательно принимает следующий вид:

$$\Delta(\vec{z}, n) = \Delta(T) = a_1 + \frac{f(\vec{z}, n_{\max}) - f(\vec{z}, n)}{f(\vec{z}, n_{\max}) - f(\vec{z}, n_{\min})} (a_2 - a_1). \quad (3)$$

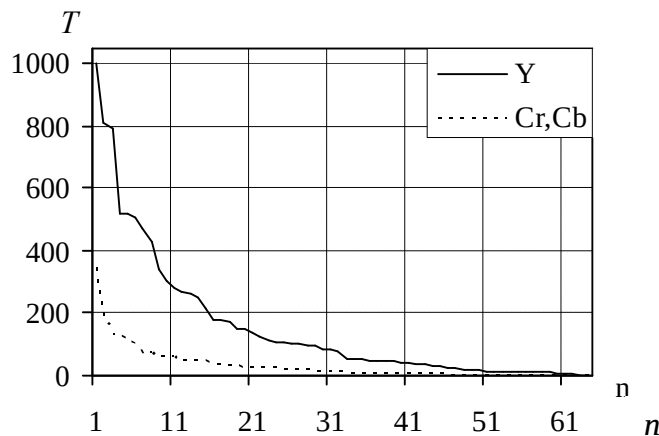


Рис. 1. График зависимости $T(n)$

Результаты сжатия тестовых изображений «Lena» и «Oldman» представлены на рис. 2 как зависимость величины среднеквадратической ошибки (RMSE) значения пикселя от среднего числа бит на пиксель в сжатом изображении. Сплошные линии соответствуют базовой схеме JPEG, пунктир – модифицированной схеме, шаг квантования в которой вычисляется по формуле (3) с использованием критерия максимальных амплитуд (1).

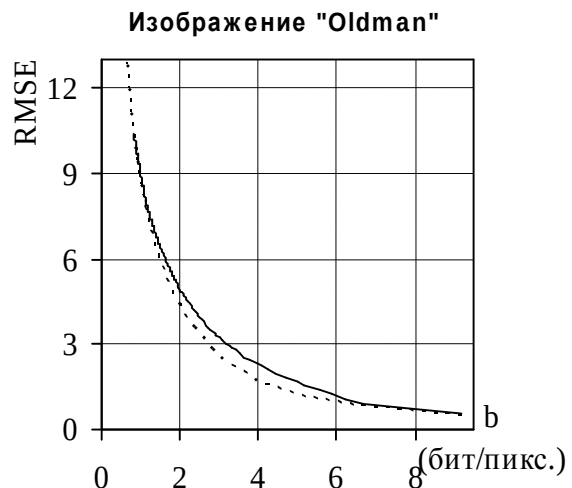
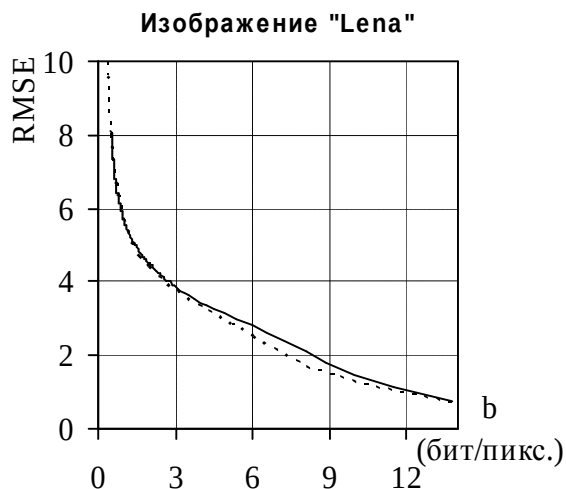
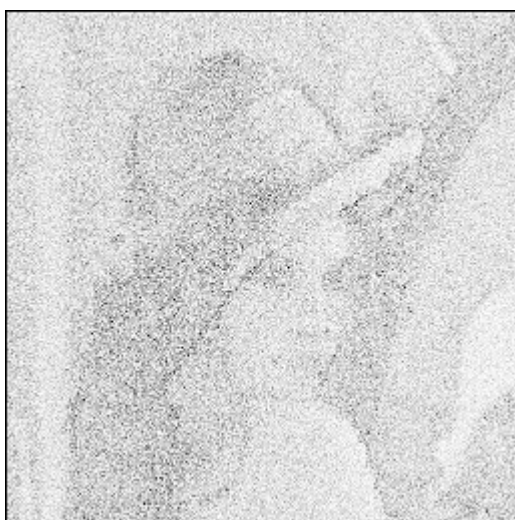


Рис. 2. Результаты компрессии тестовых изображений

Для визуальной оценки качества сжатия рассмотрим разностные изображения. На рис. 3 и 4 приведены разностные изображения для двух цветковых плоскостей. Изображения слева соответствуют стандартной схеме JPEG, справа – модифицированной схеме на основе весового критерия.

Разностные изображения получены вычитанием восстановленного рисунка Q из исходного изображения P для каждого i -го пикселя: $D_i = 255 - a|P_i - Q_i|$, где a – коэффициент масштаба, при этом чем темнее пиксель разностного изображения, тем больше ошибка. Как видно, высокочастотные области изображений, сжатых по модифицированной схеме, искажены незначительно, что обусловлено адаптивным выбором шага квантования для разных частот.

В таблице приведены численные результаты сжатия для четырех тестовых изображений. Как видно из представленных данных, при использовании модифицированной схемы величина среднеквадратической ошибки (RMSE) сокращается до 30 %.



Базовая схема

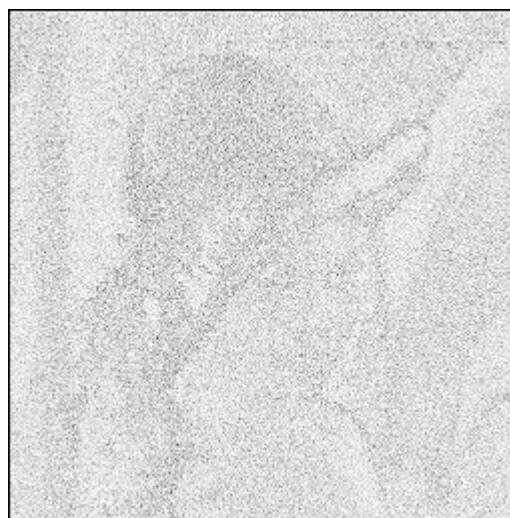


Модифицированная схема

Рис. 3. Разностные изображения для цветовой плоскости Y



Базовая схема



Модифицированная схема

Рис. 4. Разностные изображения для цветовой плоскости Cb

Изображение	Базовая схема JPEG		Модифицированная схема		Сокращение RMSE, %
	Средн. число бит на пикс.	RMSE	Средн. число бит на пикс.	RMSE	
«Lena»	5,979	2,813	6,034	2,531	10
«Baboon»	11,606	2,95	11,7	2,134	27
«Peppers»	7,402	3,07	7,357	2,555	17
«Oldman»	4,104	2,222	4,105	1,696	24

Таблица. Результаты экспериментов

Выигрыш в сжатии особенно значителен для изображений, на которых присутствуют разные, не всегда однородные участки, соответствующие различным частотным составляющим.

Применение адаптивного квантования совместно с адаптивной сегментацией

Широко распространенными являются схемы сжатия, использующие адаптивную сегментацию на основе разбиения и слияния областей [6]. Обобщим предложенный метод адаптивного квантования для таких схем сжатия.

Пусть дано изображение H с линейными размерами $H_x \times H_y$, разбитое на M прямоугольных непересекающихся областей H_m , $m = 0, M-1$, причем размерность m -ой области – $H_x^m \times H_y^m$. Требуется найти матрицу квантования Δ размерности $\Delta_x \times \Delta_y$.

Аналогично ранее описанному подходу, каждому элементу матрицы квантования поставим в соответствие весовой критерий T .

Поскольку области имеют разный размер, можно использовать масштабирование прямоугольной матрицы сегмента в матрицу квантования, причем конкретный спектральный коэффициент входит в формулу вычисления критерия T с некоторым коэффициентом, в общем случае зависящим от размеров изображения и данной локальной области:

$$a_m = f(H_x, H_y, H_x^m, H_y^m).$$

Простейший вариант вычисления a_m основан на соотношении площадей сегмента и рисунка:

$$a_m = \frac{H_x^m H_y^m}{H_x H_y}.$$

Поскольку размерность матрицы квантования в общем случае не равна размерности данного сегмента, каждый спектральный коэффициент линейно масштабируется на соответствующую позицию матрицы:

$$z_{x,y} \sim \Delta_{i,j}, \quad i = \left\lfloor \frac{x\Delta_x}{H_x} \right\rfloor, \quad j = \left\lfloor \frac{y\Delta_y}{H_y} \right\rfloor.$$

При этом вместо спектрального значения $z_{x,y}$ в выражения для вычисления T подставляется $a_m z_{x,y}$. Таким образом, каждый сегмент вносит свой вклад в вычисле-

ние значений критерия пропорционально своему весу (в простейшем случае вес – это площадь).

Подход не исключает реализацию масштабирования коэффициентов матрицы квантования для различных сегментов с целью улучшения визуального восприятия изображения.

Основные результаты и выводы

Предложен метод вычисления векторов квантования на основе весового критерия. Представлены экспериментальные данные для ряда тестовых изображений, также приведены разностные изображения для визуальной оценки ошибки компрессии, проведен анализ полученных результатов. Разработанный метод позволяет сократить размер сжатого файла в среднем на 10–25% по сравнению с неадаптивными схемами. При использовании разработанного метода в схеме JPEG необходимо внести изменения только в программу сжатия. Для декомпрессии изображений достаточно использовать стандартный JPEG-декомпрессор.

Произведено обобщение разработанного метода для схем сжатия на основе адаптивной сегментации.

Литература

1. Wallace G.K. The JPEG still picture compression standard // IEEE Trans. Consumer Electronics. – 1992. – Vol. 38. – № 1. – P. 18–34.
2. Wu S.W., Gersho A. Rate-constrained picture-adaptive quantization for JPEG baseline coders // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1993. – Vol. 5. – P. 389–392.
3. Fung H.T., Parker K.J. Design of image-adaptive quantization tables for JPEG // J. of Electronic Imaging. – 1996. – Vol. 4. – № 2. – P. 144–150.
4. Ratnakar V., Livny M. RD-OPT: an efficient algorithm for optimizing DCT quantization tables // Proceedings of the Conference on Data Compression. – 1995. – P. 332–341.
5. Лужков Ю.В. Метод адаптивного скалярного квантования в схемах необратимого сжатия изображений // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – Вып. 3. – С. 12–16.
6. Shukla R., Dragotti P.L., Do M., Vetterli M. Improved quadtree algorithm based on joint coding for piecewise smooth image compression // IEEE International Conference on Multimedia and Expo. – 2002. – Vol. 1. – P. 637–640.

Лужков Юрий Валерьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, luzhkov@inbox.ru

Тропченко Александр Ювенальевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, tau@d1.ifmo.ru

УДК 621.397.13.037.372

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМАХ ВЕЩАНИЯ НА МОБИЛЬНЫЕ ТЕРМИНАЛЫ

А.Ф. Перегудов, К.Ф. Гласман, А.В. Белозерцев, Е.Н. Гриненко

Представлены результаты экспериментальных исследований по мультимодальной оценке качества телевизионных материалов, предназначенных для мобильных и портативных устройств. Для обеспечения достаточного интегрального качества в условиях ограниченной полосы пропускания каналов связи требуется решение оптимизационной задачи и выработка специальных рекомендаций. Дальнейшее повышение качества мультимедийных приложений в системах телевизионного вещания на мобильные терминалы возможно при использовании динамического мультиплексирования и адаптивного (зависящего от содержания передаваемых материалов) распределения скоростей видео- и аудиопотоков в пределах постоянной полосы пропускания канала.

Ключевые слова: мобильное телевидение, оценка качества, мультимодальная оценка, компрессия.

Введение

К производству и доставке телевизионных материалов и другой мультимедийной продукции на портативные и мобильные терминалы предъявляются особые требования, что обусловлено ограниченной полосой пропускания каналов передачи данных. Для достижения высокой степени компрессии данных при минимальном ухудшении качества должна быть решена соответствующая задача оптимизации. Такая оптимизация традиционно проводилась отдельно для каждого из компонентов (изображения и звука) с использованием известных методов оценки их качества [1–3], но без учета восприятия качества аудиовизуального произведения в целом (мультимодального качества). Можно предположить, что учет особенностей мультимодального восприятия позволит решить задачу оптимизации более эффективно [4–6].

Первой задачей настоящей работы является изучение влияния частных параметров видео- и аудиоряда, т.е. скоростей видео- и аудиопотоков, четкости (пространственного разрешения изображения), геометрических размеров и контраста изображения, наличия цветовой компоненты (цветное или черно-белое изображение), громкости звукового сопровождения, на субъективное восприятие мультимодального качества. Вторая задача – исследование влияния содержания аудиовизуального произведения на восприятие мультимодального качества.

Результаты исследования могут быть использованы при анализе характеристик мультимодального качества и поиске путей повышения качества новых мультимедийных приложений, предназначенных для портативных и мобильных устройств.

На кафедре видеотехники Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения была проведена серия экспериментов по субъективной экспертной оценке мультимодального (интегрального) качества аудиовизуальной продукции различного содержания. В качестве экспертов-наблюдателей в эксперименте участвовало около 60 студентов СПбГУКиТ.

Эксперимент по мультимодальной оценке качества аудиовизуальных материалов

Тестовые материалы и условия проведения эксперимента

В качестве тестовых материалов выбраны три разноплановых сюжета: программа новостей, музыкальный видеоклип и спортивный репортаж. Сюжеты существенно отличаются детальностью и динамикой изображения и характеристиками звукового сопровождения. Так, фрагмент программы новостей представляет собой изображение диктора («говорящая голова») с небольшим количеством мелких деталей и низкой ин-

тенсивностью движения в кадре; звуковое сопровождение – голос диктора. Спортивный сюжет (соревнования по лыжероллингу) характеризуется высокой детальностью и динамикой изображения, сопровождаемого речью комментатора на фоне шума спортивных соревнований. Музыкальный клип представляет собой видеоряд со средней детальностью и интенсивностью движения в кадре в сопровождении сюжетно связанного музыкального аудиоряда.

Из исходных материалов формировались аудиовизуальные последовательности длительностью 10–15 с. При формировании тестовых клипов производилась компрессия изображения по стандарту H.264 (Main Profile, Level 5.1) и компрессия звука в соответствии с форматом MP3 с помощью свободно распространяемого программного кода MediaCoder v.0.6.1 [7]. Были сформированы тестовые последовательности с различными степенями компрессии и соответственно различными скоростями видео- и аудиопотоков. Остальные параметры тестовых последовательностей (разрешение, размеры и контраст изображения и др.) имели те же значения, что и в эталонных (некомпрессированных) последовательностях. Порядок предъявления последовательностей, временные интервалы и другие условия проведения эксперимента соответствовали Рекомендации ITU-R BT.500-11 [1].

Методика эксперимента и шкала оценок

В эксперименте использовался усовершенствованный метод оценки качества с двойным стимулом и фиксацией результатов на шкале ухудшений (методика DSIS [1]). Группе наблюдателей последовательно предъявлялись пары аудиовизуальных последовательностей; каждая пара включает эталонную некомпрессированную последовательность и тестовую последовательность с тем же содержанием, но искаженную артефактами видео- и аудиокомпрессии. Предлагалось сравнить мультимодальное (интегральное) качество тестовой последовательности с качеством эталонной и выставить оценку по пятибалльной шкале ухудшений. Всего в случайном порядке предъявлялось 25 пар последовательностей с различными значениями скоростей потоков видео- и аудиоданных, соответствующими широкому диапазону изменения мультимодального качества (от эталонного уровня, соответствующего наивысшей оценке, до уровня минимальных оценок). После окончания эксперимента для каждого сочетания параметров вычислялась усредненная по всем экспертам оценка.

Оценка восприятия мультимодального качества должна основываться на общем, интегральном впечатлении от просмотра аудиовизуальной последовательности. Для построения шкалы субъективных оценок и объяснения экспертам, с каких позиций следует подходить к оценке мультимодального качества, предлагается использовать новый, информационный подход. Телевизионные и мультимедийные программы содержат некоторый объем информации. Например, программа новостей содержит преимущественно семантическую информацию, позволяющую зрителям приобрести некоторый объем новых знаний. Получение этой информации обеспечивает формирование у зрителей определенного понимания и устранение неопределенности в отношении каких-либо событий. Напротив, музыкальные сюжеты несут, в основном, информацию, доставляющую зрителю удовольствие – эстетическое наслаждение.

Артефакты компрессии и ухудшение качества изображения и звука могут привести к затруднению восприятия семантической информации и снижению степени эстетического удовлетворения. Для оценки мультимодального качества предлагается использовать пятибалльную шкалу ухудшений со следующей интерпретацией значений оценок: «5» – ухудшение незаметно; «4» – ухудшение заметно, но не затрудняет восприятия информации и (или) получения эстетического удовлетворения; «3» – ухудшение заметно и несколько препятствует восприятию информации; «2» – ухудшение весьма

заметно и препятствует восприятию информации; «1» – ухудшение весьма заметно и существенно препятствует восприятию информации.

Результаты экспериментальных исследований

В результате обработки данных эксперимента получены зависимости усредненных по группе наблюдателей оценок Q_m мультимодального качества по шкале ухудшений от скоростей видео- и аудиопотоков, в которых другие характеристики аудиовизуальных последовательностей (в том числе тип контента) являются параметрами. Далее в виде графиков представлены некоторые из полученных зависимостей. Экспериментальные значения аппроксимированы логарифмическими кривыми.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости мультимодального качества от скоростей аудио- и видеопотоков для новостного и спортивного сюжетов, наиболее существенно различающихся детальностью и динамикой видеоряда. Пространственное разрешение (четкость) изображения – 720×576 элементов, контраст ($L_{\max}/L_{\min} \approx 80$) и громкость звукового сопровождения – номинальные. На рис. 2, б, показаны доверительные интервалы, соответствующие доверительной вероятности 0,95.

На рис. 3–5 приведены результаты оценки качества всех трех сюжетов при разрешении 220×176 , наиболее близком к разрешению экранов современных мобильных терминалов.

Анализ экспериментальных результатов

Анализ результатов экспериментальных исследований (рис. 1–5) позволяет определить характеристики мультимодального качества и найти пути повышения качества мобильных мультимедийных приложений.

Во-первых, следует отметить, что мультимодальное качество зависит от содержания аудиовизуального произведения. На решение экспертов при выставлении оценок влияют искажения обеих компонент (изображения и звука), но в сюжетах различного содержания доминирующее значение имеют разные компоненты. Решающий вклад в формирование субъективного восприятия мультимодального качества вносит информационно более значимая компонента. Так, в насыщенных и высокодинамичных спортивных сюжетах качество изображения имеет относительно больший вес по сравнению со звуковым сопровождением. Напротив, в музыкальных сюжетах более значимо качество звука. Высокий уровень искажений важнейшего компонента ограничивает общее мультимодальное качество. Если скорость видеопотока спортивной тестовой последовательности с разрешением 720×576 равна 256 кбит/с, то ее мультимодальное качество практически не зависит от скорости аудио (см. рис. 2, б). Если скорости аудиопотоков новостного сюжета и музыкального клипа составляют 32 кбит/с, то мультимодальное качество данных сюжетов слабо зависит от скорости потока видео (см. рис. 1, а).

Содержание аудио- и видеоконтакт взаимосвязано при формировании ощущения мультимодального качества. Например, качеству спортивного сюжета на уровне оценки «3» удовлетворяют сочетание скоростей видеоданных 512 кбит/с и аудиоданных 64 кбит/с, а также сочетание 128 кбит/с и 176 кбит/с (рис. 5). Высокий уровень качества звука может частично компенсировать низкое качество изображения.

При формировании у зрителя субъективного ощущения качества большое значение имеет тип контента (содержание аудиовизуального произведения). Уровень качества, соответствующий оценке «3» музыкального клипа с разрешением 220×176 , может быть обеспечен при скорости видеоданных в диапазоне 32–128 кбит/с и скорости аудиоданных в диапазоне от 182 кбит/с до 64 кбит/с (рис. 4). Такому же качеству «3» но-

востного сюжета соответствуют значения скоростей видеопотока 8–128 кбит/с при скоростях аудиопотока, находящихся в диапазоне 128–72 кбит/с (рис. 3).

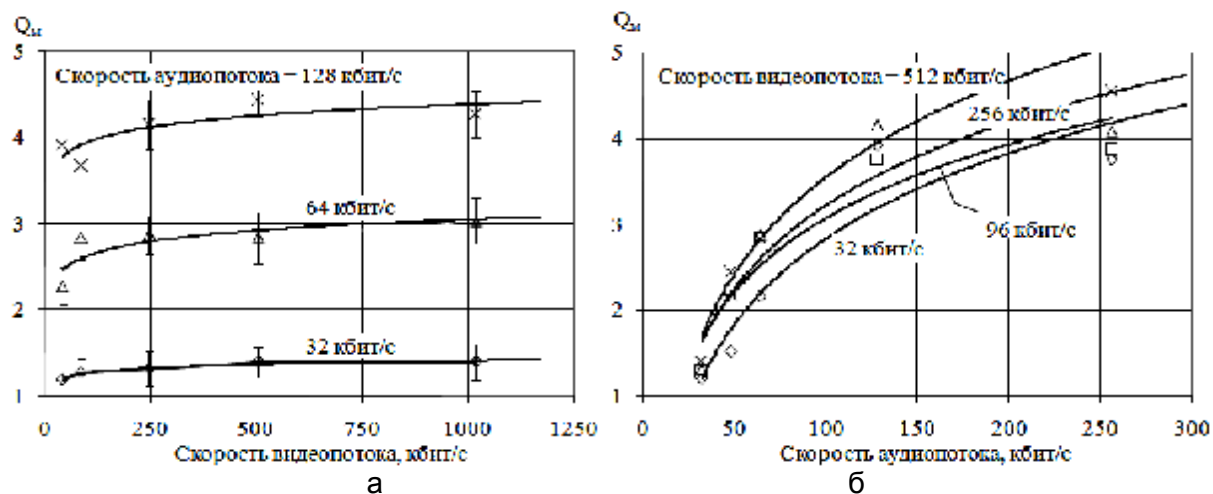


Рис. 1. Зависимости качества новостного сюжета типа «говорящая голова» (разрешение 720×576): а – от скорости видеопотока; б – от скорости аудиопотока

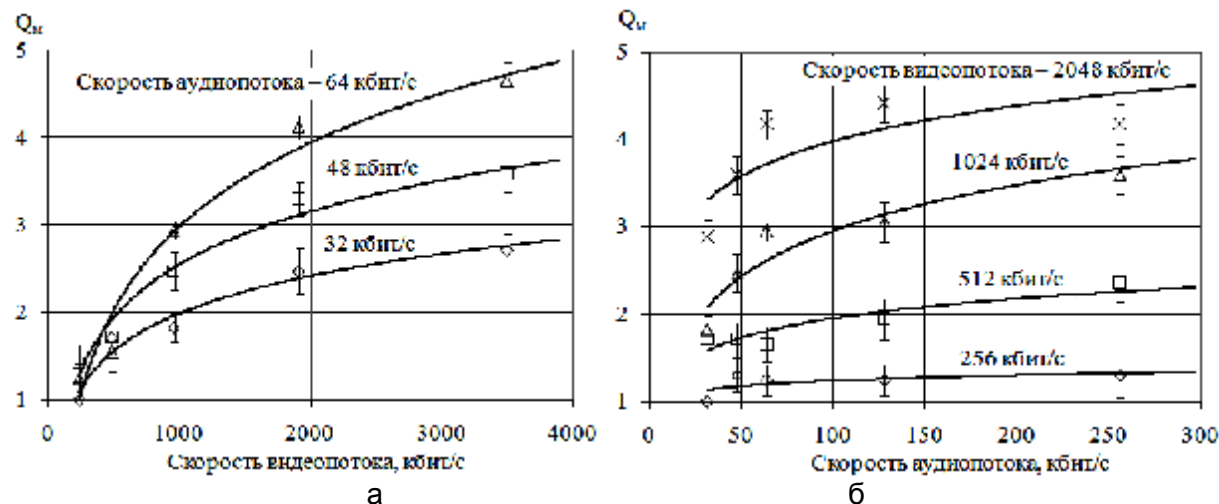


Рис. 2. Зависимости мультимодального качества спортивного репортажа (разрешение 720×576): а – от скорости видеопотока; б – от скорости аудиопотока

Одинаковому уровню мультимодального качества различных сюжетов соответствуют не только различные значения общих (суммарных) скоростей потоков данных, но и разные соотношения скоростей видео- и аудиопотоков. Так, для новостного сюжета с разрешением 220×176 и качеством, соответствующим оценке «4», оптимальные значения скоростей видео- и аудиопотоков составляют 44 кбит/с и 128 кбит/с соответственно и находятся в отношении 30:70. Для спортивного сюжета скорости видео- и аудиопотоков должны быть равны 512 кбит/с и 128 кбит/с (соотношение 80:20). Для музыкального клипа оптимальное значение скорости передачи как видео, так и звука равно 128 кбит/с (50:50). Критерием оптимальности в данном случае является минимум суммарной скорости потока аудиовидеоданных.

Соотношения скоростей, приведенные выше, показывают, что в системах мобильного ТВ вещания целесообразно использовать адаптивное распределение фиксированной полосы пропускания каналов передачи данных, зависящее от текущего содержания передаваемого контента. Передача видео- и аудиоданных с постоянным, не

адаптируемым к содержанию аудиовизуальной программы, соотношением скоростей приводит к снижению интегрального качества.

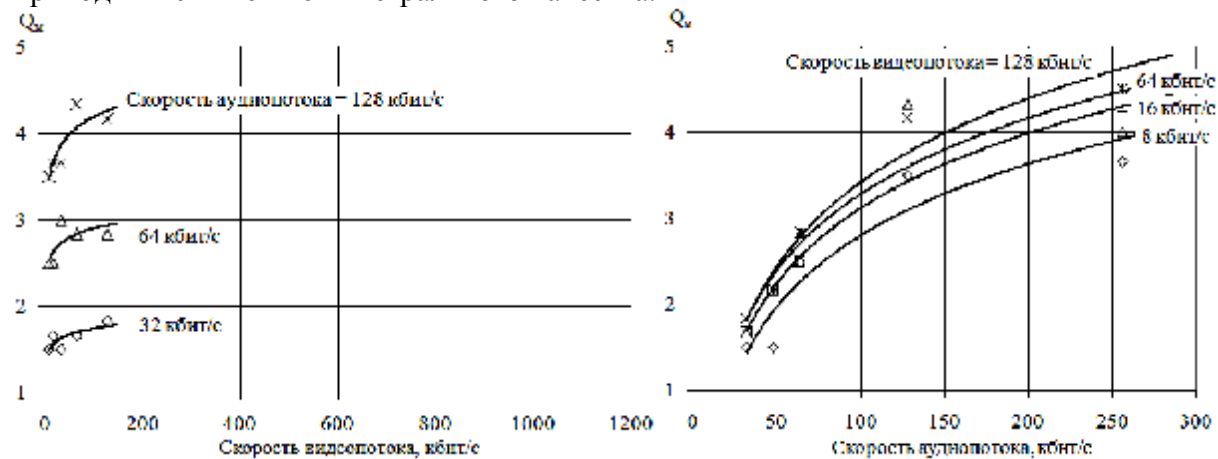


Рис. 3. Результаты оценки мультимодального качества новостного сюжета типа «говорящая голова» (разрешение 220×176)

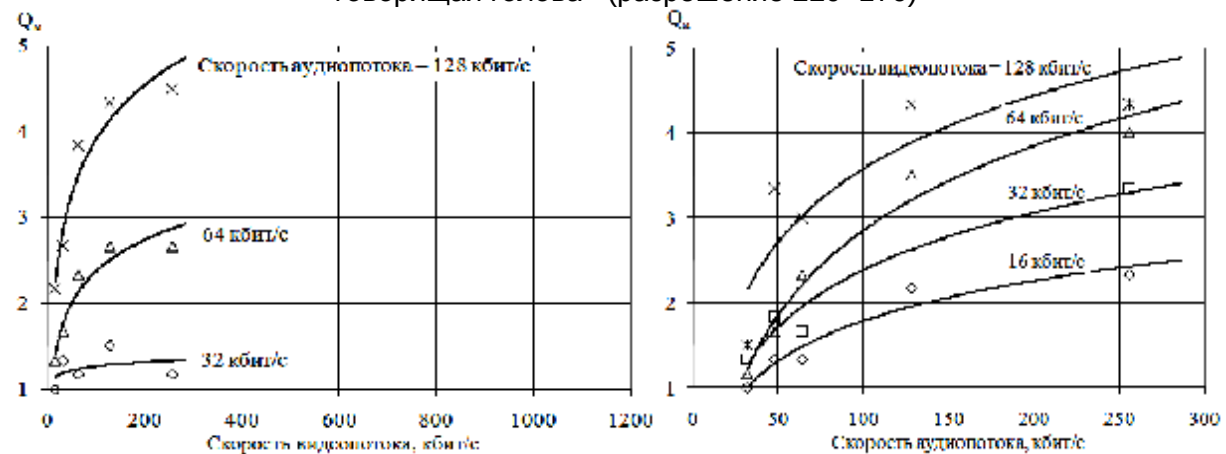


Рис. 4. Результаты оценки мультимодального качества музыкального видеоклипа (разрешение 220×176)

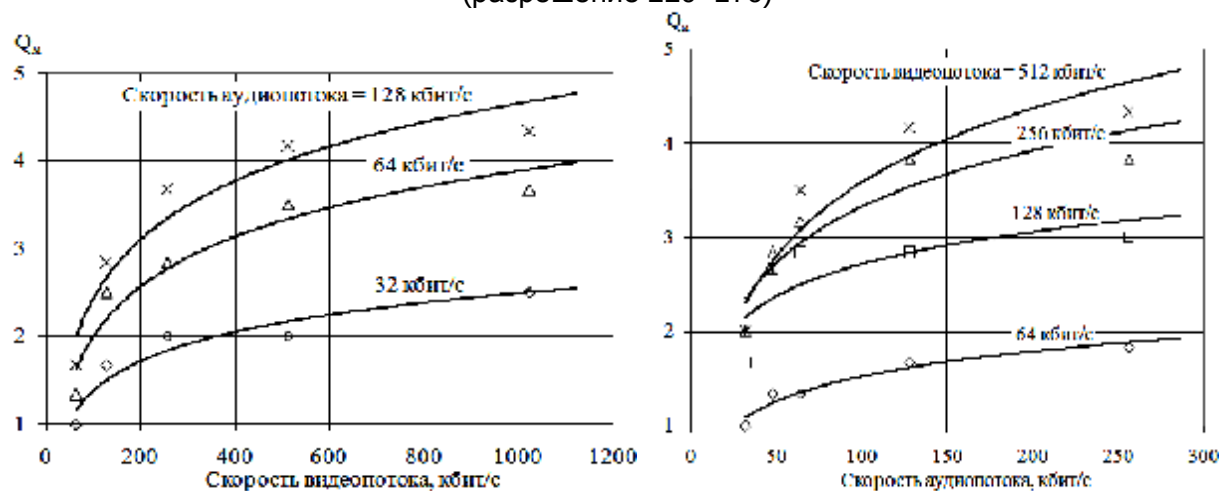


Рис. 5. Результаты оценки мультимодального качества спортивного репортажа (разрешение 220×176)

Заключение

1. Предложен новый подход к оценке субъективного восприятия мультимодального качества, учитывающий восприятие зрителем информации, содержащейся в аудиовизуальном произведении. В соответствии с данным подходом модифицирована методика оценки качества с двумя стимулами (DSIS) и предложен новый вариант шкалы ухудшений.

2. Оценка мультимодального качества зависит от содержания аудиовизуального произведения. Оба компонента (изображение и звук) влияют на восприятие качества, но один из этих компонентов может иметь преобладающее значение.

3. Дальнейшее повышение качества портативных и мобильных мультимедийных приложений может быть обеспечено использованием динамического, адаптивного к содержанию передаваемого контента распределения скоростей видео- и аудиопотока в пределах постоянной полосы пропускания канала связи.

Основные результаты работы были представлены в виде доклада на конференции, состоявшейся в рамках Международного съезда вещателей IBC2008 (International Broadcasting Convention, 11–15 сентября 2008 г., Амстердам, Нидерланды) [8].

Литература

1. Recommendation ITU-R BT.500-11. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.
2. EBU Technical Recommendation R90-2000. The subjective evaluation of the quality of sound programme material.
3. EBU document Tech. 3286 (1997). Assessment methods for the subjective evaluation of the quality of sound programme material – Music.
4. Recommendation ITU-T P.911. Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications.
5. Thakur A., Gao C., Larsson A., Parnes P. The Effects of Frame-rate and Image Quality on Perceived Video Quality in Videoconferencing // Luleå Tekniska Universitet. Technical Report. – 2001. – № 7.
6. Tampere University of Technology [Электронный ресурс]. – Jumisko-Pyykko, S., Hakkinen, J., Nyman, G. Experienced Quality Factors – Qualitative Evaluation Approach to Audiovisual Quality. – Tampere: University of Technology, 2007. – Режим доступа: <http://www.students.tut.fi/~jumisko/publications/>, свободный.
7. MediaCoder – a free universal media transcoder [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.mediacoder.net>, свободный.
8. Peregudov A., Glasman K., Belozertsev A., Grinenko E. Multimodal Quality Assessments of Compressed Television Materials for Portable and Mobile Devices // IBC2008 Conference Publication. 11–15 September 2008, Amsterdam, the Netherlands. – P. 396–404.

<i>Перегудов Александр Феликсович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кандидат технических наук, проректор, peregudov@dip.spb.ru
<i>Гласман Константин Францевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кандидат технических наук, зав. кафедрой, k.glasman@gmail.com
<i>Белозерцев Александр Витальевич</i>		Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кандидат технических наук, доцент, a.belozertsev@gmail.com
<i>Гриненко Евгения Николаевна</i>		Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, студентка, evgenia.grinenko@gmail.com

УДК 004.8:004.9

ОДНОРАНГОВАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

А.В. Маслобоев, М.Г. Шишаев

Рассмотрено современное состояние исследований в области развития методов и средств информационной поддержки инновационной деятельности. Разработан прототип одноранговой распределенной мультиагентной системы информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности в регионе. Предлагаемое решение основано на использовании онтологий и мультиагентного подхода. Описываются архитектура, функциональные модули, принципы функционирования и области применения системы.

Ключевые слова: мультиагентный подход, информационная система, онтологии, инновационная деятельность, имитационное моделирование.

Введение

Наличие и эффективное использование развитой информационно-коммуникационной инфраструктуры в современных условиях во многом определяет успешность и конкурентоспособность социально-экономических систем различного уровня. Ориентация на диверсификацию экономики предполагает повышение роли горизонтальных взаимодействий между независимыми субъектами инновационной деятельности. Территориальная распределенность, функциональная и организационная разнородность субъектов влечет высокую динамичность как состава участников взаимодействия, так и структуры связей между ними. Специфика инновационной деятельности предполагает организацию согласованной работы децентрализованных участников инновационных процессов. Эти факторы являются основными аргументами в пользу выбора одноранговых (peer-to-peer – P2P) архитектур [1] в качестве базиса среды информационного взаимодействия указанных субъектов и определяют актуальность разработки методов и средств адекватного представления субъектов инновационной деятельности в виртуальной среде, автоматизации основных функций информационного взаимодействия между субъектами и процедур адаптивной реконфигурации среды с целью снижения нагрузки на коммуникационную инфраструктуру и повышения доступности прикладных служб, предоставляемых средой.

Современные средства информационной поддержки инновационной деятельности

В настоящее время создано большое количество ресурсов, обеспечивающих информационную поддержку ряда задач инновационной деятельности. Большинство из них реализовано в виде специализированных веб-ресурсов, чаще всего – информационных порталов. Реализация систем информационной поддержки инноваций в виде Интернет-порталов имеет централизованную архитектуру, что ограничивает возможности масштабирования и живучесть системы, обеспечивает лишь локальный поиск потенциальных бизнес-партнеров и информационных ресурсов, ассоциированных с инновациями. Современные отечественные и зарубежные системы управления и поддержки бизнес-процессов разрабатываются, как правило, под конкретные задачи. Примерами таких систем являются агентно-ориентированные программные системы и пакеты класса BPMS (Business Process Management Systems – системы управления бизнес-процессами) и электронные торговые площадки B2B («business-to-business» – бизнес для бизнеса), а также корпоративные информационно-управляющие и информационно-аналитические системы. Уязвимым местом существующих на сегодняшний день решений в области информационного обеспечения инновационной деятельности является

наличие нерешенных задач, связанных с обеспечением не только распределенного доступа к информации, но и децентрализованного хранения и обработки данных, решением проблемы технологической и семантической разнородности информационных ресурсов. В качестве одного из подходов к решению обозначенных проблем можно рассматривать разработанную авторами мультиагентную систему информационной поддержки инноваций, описываемую в настоящей работе. В рамках предлагаемой концепции субъекты инновационной деятельности представляются в виде программных агентов, функционирующих и взаимодействующих друг с другом в едином информационном пространстве (виртуальной бизнес-среде) в интересах своих владельцев, образуя открытую мультиагентную систему с децентрализованной архитектурой.

Архитектура системы информационно-аналитической поддержки инноваций

Эффективной технологией создания распределенных информационных систем, обеспечивающих требуемую функциональность с точки зрения поставленных в работе задач, является технология мобильных программных агентов [2]. В связи с этим разработанная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности имеет мультиагентную реализацию.

В отличие от существующих систем информационной поддержки инноваций, разработанная мультиагентная система имеет открытую децентрализованную архитектуру, представленную на рис. 1. Система представляет собой множество взаимосвязанных программных компонентов, реализующих функции разнотипных агентов, представляющих интересы субъектов инновационных процессов, общесистемных сервисов, таких как сервис онтологий, сертификатов, а также специализированных системных служб, обеспечивающих интеграцию в систему разнородных информационных ресурсов инноваций. Содержащаяся в системе информация, являющаяся объектом оперирования со стороны программных агентов, представлена, прежде всего, формализованными описаниями инновационных предложений, а также дополнительной справочной информацией, используемой в ходе проработки и реализации инновационных проектов. С помощью этой информации агент по заказу своего хозяина осуществляет поиск бизнес-партнеров по реализации инновационных проектов, формирование и предварительную оценку потенциально эффективных инновационных структур, объединяющих исследователей, разработчиков, менеджеров, инвесторов и других субъектов инноваций, задействованных в реализации проекта.

Важной особенностью рассматриваемой информационной системы является ее открытость для свободного подключения и отключения новых агентов, а также способность функционирования в условиях большого количества входящих в систему узлов. Такая свобода и масштабируемость обеспечиваются заложенными в систему механизмами равноправного (пирингового) взаимодействия узлов и функциональных компонентов. С точки зрения существующих разновидностей пиринговых архитектур рассматриваемую систему можно отнести к гибридным одноранговым системам. К полностью децентрализованным механизмам, используемым в системе, относятся ведение адресных баз агентов, а также определение уровня репутации агентов для расчета оценки надежности потенциальных инновационных структур и регулирования доступа к ресурсам. Вместе с тем, для обеспечения работоспособности системы используются централизованные общесистемные сервисы онтологий и цифровых сертификатов.

Каждый программный агент представляет в виртуальной среде некоторое бизнес-предложение, зарегистрированное на одном из порталов. Тип агента соответствует бизнес-роли субъекта – исследователь, инвестор, инноватор и т.д. Основная задача агента – поиск для своего владельца потенциальных партнеров по реализации инновационного

или инвестиционного предложения (решается путем переговоров между агентами). Для уменьшения объемов данных, передаваемых по сети в ходе коммуникации агентов, в системе используются два типа агентов – мобильные агенты, способные перемещаться между узлами для реализации локального поиска в пределах того или иного портала, и статичные агенты, представляющие интересы своего владельца на стороне портала, в котором зарегистрировано соответствующее бизнес-предложение. Статичные агенты не проявляют инициативу в межузловом поиске бизнес-партнеров и обеспечивают коммуникации с другими статичными или мобильными агентами.

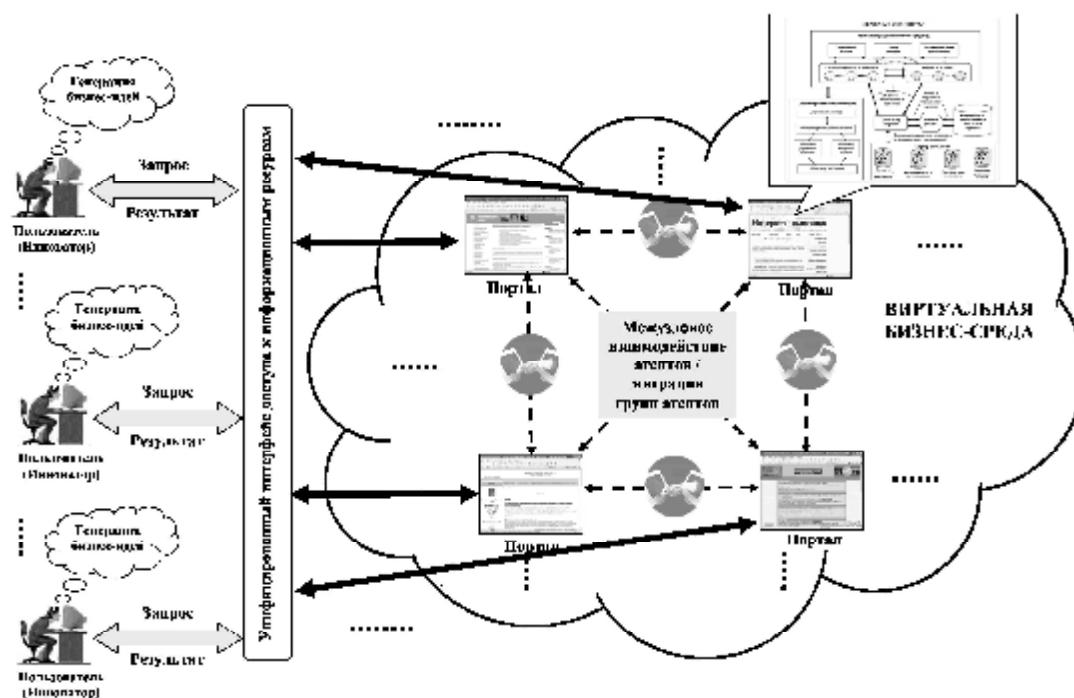


Рис. 1. Архитектура одноранговой распределенной мультиагентной системы информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности

Субъекту инновационной деятельности, желающему использовать разрабатываемую систему, потребуется: 1) завести себе узел в распределенной виртуальной бизнес-среде; 2) подключиться к одному из известных ему Интернет-порталов по инновационной тематике, на котором установлена разработанная система; 3) зарегистрировать себя и свои бизнес-предложения, настроить необходимые опции своего агента. После этого следует ожидать результатов деятельности агента, который автоматически выполняет всю работу по поиску партнеров в виртуальной бизнес-среде, предварительному анализу, оценке потенциальной эффективности и формированию инновационных структур.

Функциональные компоненты системы

Систему образуют следующие основные функциональные модули.

1. *Агентное представительство (агентная платформа)*, загружаемое на стороне серверной платформы инновационного портала и представляющее собой среду локального исполнения агентов, в рамках которой программные агенты функционируют и взаимодействуют друг с другом. Функциональная структура серверных узлов системы представлена на рис. 2.

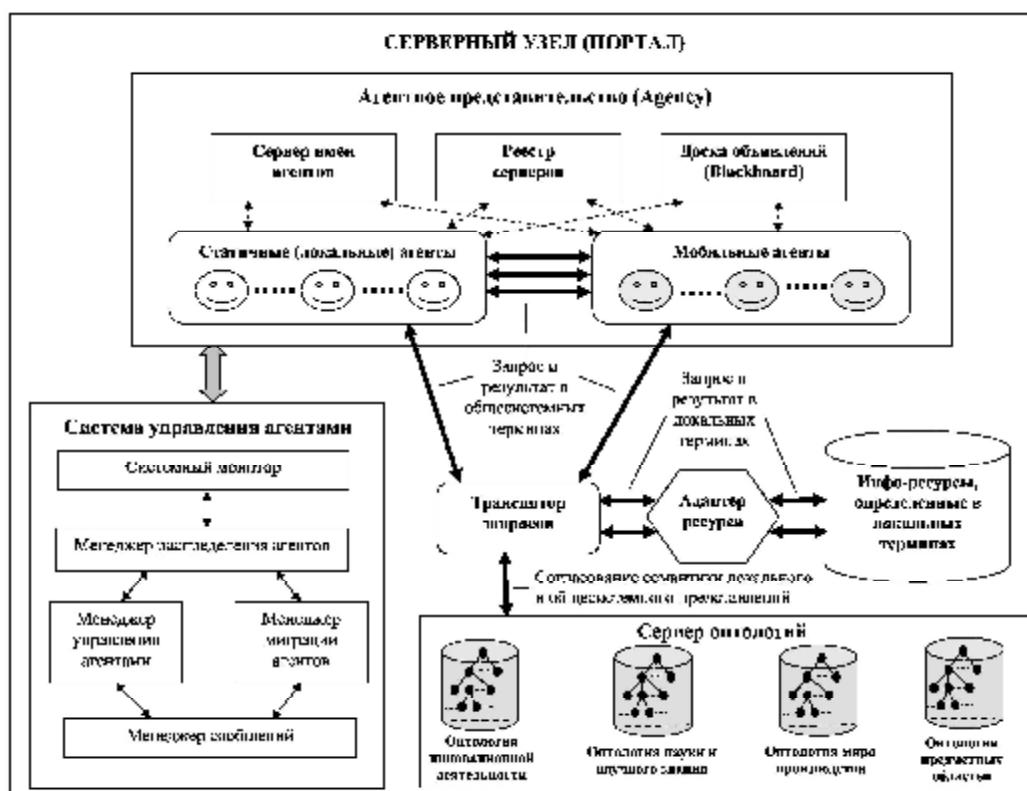


Рис. 2. Функциональная структура серверных узлов системы

В адресном пространстве агентного представительства реализованы программные компоненты, обеспечивающие поддержку межагентного взаимодействия и самоорганизации агентов.

- Реестр серверов содержит информацию о функционирующих узлах системы, а также контролирует подключение новых узлов и появление новых агентов в системе.
- Сервер имен агентов накапливает информацию об агентах системы. Формирование и поддержание распределенного реестра агентов, согласно работе [3], осуществляется на базе их привязки к древовидным концептуальным моделям предметной области (КМПО). Каждый агент хранит два адресных списка известных ему агентов – таблицу адресов агентов, являющихся членами текущей группы данного агента (основная таблица), и таблицу адресов прочих агентов (вспомогательная таблица). Формат адресной записи в таблицах имеет вид тройки: <Адрес; Тип агента; Список ассоциированных вершин КМПО>. В соответствии с предлагаемым в работе [3] подходом к ведению реестра агентов, для подключения нового агента последний должен располагать адресом, по крайней мере, одного активного узла (агента) системы. Далее, запрашивая у известного (-ых) агента (-ов) основные и (или) вспомогательные адресные списки, вновь подключившийся агент формирует собственные таблицы адресов.
- Доска объявлений (Blackboard) представляет собой специальный реестр – витрину бизнес-предложений субъектов инноваций. На стороне портала сгенерированные агенты с максимально близкими целями объединяются в группы по областям интересов (формирование виртуальных бизнес-площадок), информация о которых также регистрируется на доске объявлений. Анализ информации, представленной на доске объявлений, позволяет оценить нагрузку на узлах системы и определить интенсивности межагентных и межгрупповых коммуникаций на межузловом и внутриузловом уровнях, что, в свою очередь, позволяет выделить загруженные и незагруженные узлы в системе, а также осуществить динамическое перераспределение агентов

и групп агентов между узлами системы. Организацией переговоров между агентами внутри группы управляют агенты-координаторы.

2. *Перемещаемый программный код*, реализующий мобильных агентов. Реализация мобильных агентов в виде перемещаемого кода позволяет обеспечить функциональную гибкость системы – произвольно изменять реализации алгоритмов расчета параметров инновационных структур и логики поведения агента при условии сохранения интерфейса вызовов.

3. *Сервер онтологий*, обеспечивающий единую терминологическую базу для общесистемных и локальных запросов на поиск объектов и инновационных предложений. Сервер онтологий объединяет следующие онтологии: 1) онтологию инноваций и инновационной деятельности; 2) онтологию мира производства; 4) онтологию науки и научного знания; 4) онтологии предметных областей, интересных с точки зрения инноваций и представленных в системе своими информационными ресурсами.

4. *Транслятор запросов*, обеспечивающий формирование поисковых запросов к локальным информационным базам портала на основе поступившего запроса в общесистемных терминах. В ходе трансляции используются онтологии предметных областей, хранящиеся на выделенном сервере онтологий.

5. *Программные компоненты*, реализующие внутреннюю логику функционирования и взаимодействия агентов, протоколы межагентных коммуникаций:

- Системный монитор (System Monitor), периодически проверяющий нагрузку на текущем узле компьютерной сети;
- Менеджер распределения агентов (Agent Allocation Manager), ответственный за динамическое распределение агентов и анализ моделей поведения и характера взаимодействия агентов;
- Менеджер миграции агентов (Agent Migration Manager), перемещающий агентов на другие платформы (узлы);
- Менеджер управления агентами (Agent Manager), управляющий миграцией агентов между узлами сети;
- Менеджер сообщений (Message Manager), координирующий процесс обмена сообщениями между агентами системы.

Для согласования разных технологий хранения и представления данных на стороне информационных серверов используются программные адаптеры ресурсов, реализующие специфичные для каждого конкретного ресурса механизмы доступа и извлечения данных [4].

Практическая реализация и области использования результатов исследований

В качестве технологии реализации использована технология Java Remote Method Invocation (Java RMI). Базовые шаблоны программных компонентов системы (агентов) разработаны с помощью языка сценариев Java Script в программной инструментальной среде разработки многоагентных систем AgentBuilder в соответствии со стандартом FIPA (Foundation for Interaction of Physical Agents). Агенты системы имеют гибридную InteRRap-архитектуру с внутренней подсистемой имитационного моделирования (имитационным аппаратом) [5], которая представляет собой комплекс системно-динамических моделей, с помощью которого агент становится способным имитировать сценарии развития инновационных процессов, поведение конкурентов с целью прогнозирования рисков и экономического эффекта от капиталовложений в инновации. Система с описанным набором функциональных возможностей может успешно применяться и такими организациями, как специализированные инжиниринговые фирмы, центры трансфера технологий, инновационно-технологические центры, инновационные инкубаторы, технопарки и т.п.

Заключение

Разработана одноранговая распределенная мультиагентная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности, представляющая собой комплекс программных средств и методических разработок, обеспечивающих создание единого информационно-коммуникационного пространства как виртуальной бизнес-среды формирования и развития инновационных процессов, а также логическую интеграцию и автоматизированную децентрализованную обработку разнородных информационных ресурсов инноваций на базе взаимодействия программных агентов, функционирующих в сети Интернет и имеющих гибридную архитектуру.

Основные конкурентные преимущества предлагаемых научно-технических разработок по сравнению с существующими аналогами состоят в следующем:

- обеспечивается комплексная информационная поддержка всех этапов развития инновации, что, в свою очередь, позволит повысить эффективность инновационной деятельности ученых и специалистов различных отраслей экономики и промышленности;
- система не только ориентирована на поиск компонентов и партнеров, необходимых для реализации и продвижения нового продукта, но способна предложить удовлетворяющие заданным ограничениям модели построения технологических и коммерческих цепочек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 08-07-00301-а «Разработка информационной технологии и распределенной информационно-аналитической среды поддержки инновационной деятельности».

Литература

1. Сухорослов О.В. Принципы самоорганизации в пиринговых системах // Прикладные проблемы управления макросистемами: Труды Института системного анализа РАН. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – Т. 8. – С. 141–174.
2. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: УРСС, 2002. – 352 с.
3. Шишаев М.Г. Технология поддержки распределенного адресного реестра в одноранговых системах с неявной иерархической организацией // Информационные технологии в региональном развитии: Сб. науч. тр. ИИММ КНЦ РАН. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – Вып. VIII. – С. 53–56.
4. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Мультиагентная система интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций // Программные продукты и системы. – 2007. – № 4 (92). – С. 30–32.
5. Маслобоев А.В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 113–125.

Маслобоев Андрей Владимирович – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

Шишаев Максим Геннадьевич – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, заведующий лабораторией, кандидат технических наук, доцент, докторант, shishaev@iimm.kolasc.net.ru

УДК 519.862.6

**КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ
МОДЕЛЕЙ КРЕДИТНОГО РИСКА ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ
ДАННЫМ****Д.С. Строков, Е.Д. Соложенцев**

Выполнен анализ приложений логико-вероятностных (ЛВ) моделей риска, показана важность процедуры идентификации ЛВ моделей риска по статистическим данным. Приведено краткое математическое описание ЛВ моделей риска. Предложены и исследованы разные критерии идентификации и даны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: модель, статистика, система, состояния, логика, идентификация, критерий, вероятность, градиенты, Монте-Карло, алгоритм, оптимизация, база знаний.

Введение

Для оценки кредитных рисков физических и юридических лиц применяются методики классификации на «хорошие» и «плохие» кредиты на основе линейного (LDA) и квадратичного (QDA) дискриминантного анализа, кластерного анализа (CARD) и нейронных сетей (NN) [1]. Эти методики имеют в два раза меньшую точность классификации, чем логико-вероятностные (ЛВ) модели риска [2]. Однако процесс идентификации (обучения, оптимизации) ЛВ моделей риска по статистическим данным о ранее выданных кредитах банка отличается исключительно высокой, до нескольких часов, вычислительной сложностью. Это связано с целочисленным критерием оптимизации (число корректно классифицируемых кредитов, у которых классификация совпала по модели и по статистике) и большим числом оцениваемых коэффициентов-вероятностей (до 100), которые, к тому же, нужно вычислять до 6–7 знака после запятой. Поэтому выбор и исследование других критериев оптимизации с меньшей вычислительной сложностью, например, дискретно-непрерывных, является актуальной задачей.

Приложения ЛВ моделей риска

ЛВ модели широко используются в технике для решения задач надежности и безопасности, в которых инициирующие события и итоговое событие принимают только два значения (0 и 1) [3]. ЛВ модели риска и эффективности имеют также многочисленные приложения в экономике, где инициирующие события имеют много значений-градаций (до 50 и более) и необходимо решать задачи идентификации ЛВ моделей риска (оценки вероятностей инициирующих событий) по статистическим данным.

ЛВ модели риска неуспеха применяются в следующих приложениях [2–5]:

- оценка и анализ кредитного риска физических и юридических лиц,
- анализ риска и эффективности экономических и социальных процессов.

В ряде приложений ЛВ моделей риска задача классификации является основной. Состояния (объекты) системы классифицируются на хорошие и плохие (возможно большее число классов). Задача идентификации формулируется так: максимизировать число корректно распознанных хороших и плохих состояний системы, которые рассматриваются как случайные, имеющие вероятности; используется статистическая база данных (БД), и решается обратная оптимизационная задача. В проблемах эффективно-

сти задача идентификации решается для детального анализа риска и эффективности системы по вкладам процессов, влияющих на итоговый процесс.

Новизна ЛВ подхода для управления риском и эффективностью по статистическим данным мониторинга в экономических и социальных системах и процессах состоит в следующем:

- Представление экономических и социальных систем как структурно-сложных с использованием для их описания Л-переменных и случайных событий. На статистических данных состояний сложной системы рассматриваются два типа событий: появление состояний (объектов, кредитов) и неуспех состояний (объектов, кредитов);
- Введение в статистическую табличную базу данных (БД) конечных множеств (групп несовместных событий) для значений параметров, что позволяет получить систему Л-уравнений или базу знаний (БЗ), использовать ЛВ исчисление Рябинина и формулу Байеса для связи вероятностей и решать задачи риска, эффективности и управления.

Технология ЛВ управления риском в приложениях включает в себя процедуры:

1. формулировка сценария риска и запись Л- и В-функций риска для всех состояний;
2. идентификация ЛВ модели риска системы по статистическим данным;
3. анализ риска состояния и всех состояний по вкладам параметров и градаций параметров, описывающих состояния;
4. управление риском и эффективностью системы.

Оценка и анализ кредитных рисков является ярким примером задач классификации. Поэтому реальные исследования проблемы выбора критериев идентификации ЛВ моделей риска по статистическим данным проведены на примере кредитных рисков физических и юридических лиц.

Преимущества ЛВ модели риска на примере кредитных рисков подробно изложены в [2, 6]. ЛВ модели кредитного риска разительно отличаются от распространенных скоринговых методик. Идентификация ЛВ модели риска по статистическим данным позволяет решать следующие задачи:

- строить В-модель кредитного риска, определяя вероятности событий-градаций;
- выполнять анализ точности ЛВ модели риска;
- определять вклады событий-параметров, описывающих кредит, и их градаций в точность, робастность и прозрачность оценки кредитного риска;
- управлять кредитным риском банка, изменяя число параметров в описании кредита и градаций в параметре, асимметрию распознавания хороших и плохих кредитов.

Наряду с большими достоинствами ЛВ моделей риска, их идентификация по статистическим данным отличается большой вычислительной сложностью из-за большого числа оцениваемых вероятностей (для кредитного риска их число доходит до 100), наличия локальных экстремумов из-за ступенчатости целевой функции, учета связей вероятностей в группах несовместных событий (ГНС) и вычисления логических разностей. Поэтому необходимы тщательные исследования методик идентификации ЛВ моделей по статистическим данным, что приведет к их более широкому распространению.

Математическое описание ЛВ моделей риска

Общим для ЛВ моделей является одинаковое табличное представление статистических данных. Табличная БД содержит информацию об однородных объектах (кредитах) или состояниях системы в разные моменты времени (портфель ценных бумаг). В таблице количество столбцов может достигать нескольких десятков, а количество строк – нескольких сотен. В ячейках таблицы находятся значения параметров (качественные или количественные, целые или дробные), характеризующие объекты или состояния

Системы (1) и (2) будем называть *базой знаний* (БЗ) и использовать для получения новых знаний. В ЛВ теории риска с ГНС события-параметры связаны Л-операциями *AND*, *OR*, *NOT*, и могут иметься циклы. Событиям-параметрам соответствуют Л-переменные, которые могут быть зависимыми, но не изначально, а только потому, что они содержатся в Л-формуле, которая и определяет зависимость между ними. События-градации для каждого параметра являются зависимыми и образуют ГНС.

Идентификация ЛВ модели риска неуспеха

Задача идентификации решается алгоритмическими итеративными методами и подробно описана в [2]. Предложена следующая схема решения задачи. Пусть известны в первом приближении оценки вероятностей для градаций P_{jr} , $r = 1, 2, \dots, N_j$; $j = 1, 2, \dots, n$, и вычислены риски P_i , $i=1, 2, \dots, N$ кредитов статистических данных. Определим допустимый риск P_{ad} так, чтобы принятое нами расчетное число хороших кредитов N_{gg} имело риск меньше допустимого и соответственно число плохих кредитов $N_{bb}=N-N_{gg}$ имело риск больше допустимого. В индексах «*bb*» и «*gg*» первая буква означает классификацию по статистике, а вторая – по модели. На шаге оптимизации нужно так изменить вероятности P_{jr} , $r = 1, 2, \dots, N_j$; $j = 1, 2, \dots, n$, чтобы число распознаваемых кредитов увеличилось.

Разработаны следующие программные средства (ПС) для идентификации ЛВ модели риска и анализа риска:

1. демоверсия для оценки и анализа кредитных рисков;
2. ПС для дистанционного обслуживания кредитной деятельности банков;
3. ПС для оценки кредитов и управления кредитной деятельностью банка.

ПС работают в среде MS Windows и используют статистику по объектам в виде файла, который загружается в программу.

Критерии идентификации ЛВ модели риска

Для идентификации можно использовать следующие целевые функции:

1. Число корректно классифицируемых состояний

$$F = N_{bb} + N_{gg} \rightarrow \max_{P_{jr}}, \quad (4)$$

где N_{gg} , N_{bb} – соответственно числа состояний, классифицируемых как хорошие и плохие и статистикой, и В-моделью (корректные оценки);

2. Энтропия вероятностей корректно классифицируемых состояний

$$H = -\sum_{k=1}^{N_k} P_k \cdot \ln P_k \rightarrow \max_{P_{jr}}, \quad (5)$$

где P_k – вероятности корректно классифицируемых состояний;

3. Сумма вероятностей корректно классифицируемых состояний

$$S = \sum_{k=1}^{N_k} P_k \rightarrow \max_{P_{jr}}. \quad (6)$$

Критерий F является целочисленным, изменяется дискретно и равен числу корректно распознанных хороших и плохих состояний (4). Критерии H и S являются непрерывно-дискретными, так как их значения зависят от числа корректно распознанных состояний и от их вероятностей (риска). Дискретно-непрерывные критерии оптимизации H и S позволяют применить больший арсенал методов нелинейной оптимизации [7].

Итеративная алгоритмическая идентификация ЛВ модели риска выполняется по формуле

$$\Delta P1_{jr} = K_1 \frac{N_{opt} - N_v}{N_{opt}} K_3 P1_{jr}, j = 1, 2, \dots, n; r = 1, 2, \dots, N_j, \quad (7)$$

где K_1 – коэффициент, равный $\sim 0,05$; N_{opt} , N_v – число оптимизаций и номер текущей оптимизации, K_3 – случайное число в интервале $[-1, +1]$. В процессе итеративной алгоритмической оптимизации $\Delta P1_{jr}$ стремится к нулю. Формула (7) обеспечивает простое задание максимального приращения вероятностей и определение точности оценки вероятностей по величине приращений на шаге последней оптимизации.

Различные критерии оптимизации сведены в табл. 1. Критерии по некорректно распознанным состояниям gb и bg являются дополнениями критериев корректно распознанных состояний gg и bb .

Критерии по порядку	Энтропия состояний (H-критерии)	Число состояний (F-критерии)	Сумма вероятностей (S-критерии)	Примечание
1	H_{gg}	F_{gg}	S_{gg}	Хороших корректно распознанных
2	H_{bb}	F_{bb}	S_{bb}	Плохих корректно распознанных
3	$H = H_{gg} + H_{bb}$	$F = F_{gg} + F_{bb}$	$S = S_{gg} + S_{bb}$	Хороших и плохих корректно распознанных

Таблица 1. Критерии оптимизации

Исследование критериев идентификации

Исследования выполнялись с использованием статистических данных о 1000 кредитах, приведенных в работе [1]. Проводилась оценка 96 вероятностей событий-градаций. Исследовалось влияние шага отступлений на конечное значение целевой функции. Результаты исследований при оптимизации по H и S приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

№	ΔH	H	F	S
1	0,075	224,73	840	190,89
2	0,09	224,43	842	190,95
3	0,1	224,78	842	191,33
4	0,105	225,65	845	190,95
5	0,11	225,65	845	190,95
6	0,12	225,21	844	190,34
7	1,376	221,89	826	190,75

Таблица 2. Зависимость критериев от величины «отступления» при оптимизации по H

№	ΔS	H	F	S
1	0,06	221,91	828	197,0
2	0,1	222,44	828	195,4
3	0,12	223,98	830	197,13
4	0,18	222,25	826	195,52
5	0,972	221,74	826	193,52

Таблица 3. Зависимость критериев от величины «отступления» при оптимизации по S

Оптимальные величины «отступлений» для критериев оптимизации составили $\Delta F=4$ и $\Delta H = \Delta S = 0,1125$. Результаты исследований для разных критериев оптимизации приведены в табл. 4.

Различие процессов оптимизации по разным критериям характеризуют величины «отступлений» в случае неуспеха попыток оптимизаций на шаге. Отступление для кри-

терия F равно $\Delta F=4$ и составляет примерно $4/800=1/200$ от оптимального значения целевой функции. «Отступлению» $\Delta F=4$ соответствуют «отступления» $\Delta H=1,376$ (строка 7 в табл. 2) и $\Delta S=0,972$ (строка 5 в табл. 3). Оптимальные «отступления» для критериев H и S равны $\Delta H = \Delta S \approx 0,1125$ и составляют примерно $0,1125/225=1/2000$ от оптимального значения целевых функций, т.е. для непрерывно-дискретных критериев H и S высота ступенек при оптимизации уменьшается в десять раз.

Оптимизация по критериям	Значения		
	F	H	S
F	844	223,35	182,84
H	842	225,21	190,34
S	830	223,98	197,13

Таблица 4. Результаты оптимизации по разным критериям

Наибольшее значение числа корректно распознанных кредитов или, что то же самое, наибольшая точность ЛВ модели риска достигается при оптимизации с использованием прямого целочисленного критерия F (табл. 4). Косвенные непрерывно-дискретные критерии H и S , хотя сами принимают наибольшие значения при оптимизации по ним, распознают меньшее число кредитов, их следует использовать для определения начальных значений вероятностей P_{1j} и P_{jr} при оптимизации по критерию F , а также контроля оптимизации по этому критерию. Эти критерии дают неоптимальные и смещенные оценки для числа корректно распознанных кредитов F . Косвенный критерий оптимизации H предпочтительнее косвенного критерия S , так как дает более высокое значение прямого критерия F и меньшее смещение его от оптимального значения.

Выводы

1. Анализ приложений ЛВ моделей риска показал, что в технологии ЛВ управления риском и эффективностью систем важной и самой сложной в вычислительном отношении является процедура идентификация ЛВ модели риска по статистическим данным.
2. Для идентификации ЛВ модели риска по статистическим данным методами Монте-Карло и градиентов предложены формулы одинаковой структуры, отличающиеся простотой и прозрачностью и обеспечивающие приемлемое время вычислений, сходимость процесса обучения, простое задание начальных значений.
3. Метод Монте-Карло и метод градиентов дают одинаковые результаты при оптимизации и позволяют взаимно контролировать результаты идентификации.
4. Идентификация методом градиентов требует меньшего времени вычислений, и ей следует отдать предпочтение для определения достаточно хороших начальных значений вероятностей. Окончательную оптимизацию следует выполнять методом Монте-Карло.
5. Оптимизация по дискретно-непрерывным критериям H и S имеет меньшую вычислительную сложность и позволяет использовать весь арсенал нелинейных методов оптимизации. Но число корректно распознаваемых состояний меньше, поэтому эти критерии следует использовать для оценки начальных приближений вероятностей.
6. Изложенные результаты и методика нашли применение при разработке ПС для разных типов и классов ЛВ моделей риска (кредитные риски, риск портфеля ценных бумаг, риск коррупции и взятки и др.).

Литература

1. Seitz J., Stickel E. Consumer Loan Analysis Using Neural Network // Proc. of the Bankai Workshop: Adaptive Intelligent Systems. – Brussels, 14–19 October 1996.
2. Solojentsev E.D. Scenario Logic and Probabilistic Management of Risk in Business and Engineering. – Second edition. – Springer, 2008. – 500 p.
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – 2-е изд. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. – 276 с.
4. Соложенцев Е.Д., Степанова Н. В., Карасев В.В. Прозрачность методик оценки кредитных рисков и рейтингов. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2005. – 200 с.
5. Исследование рисков. Методические указания к проведению лабораторных работ «Логико-вероятностная теория кредитных рисков» / Н.С. Медведева, Е.Д. Соложенцев, Д.С. Строков. – СПб: СПбГУАП, 2007. – 23 с.
6. Соложенцев Е.Д. Управление риском и эффективностью в экономике: Логико-вероятностный подход. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2009. – 259 с.
7. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.

Строков Дмитрий Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант, dima.src@gmail.com
Соложенцев Евгений Дмитриевич – Институт проблем машиноведения РАН, доктор технических наук, профессор, esokar@gmail.com

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

INNOVATIVE SYSTEM OF EDUCATION SPECIALISTS IN SOFTWARE DESIGN SPHERE IN St.P SU ITMO

V. Vasilev, V. Parfyonov, A Shalyto

Saint Petersburg SU ITMO is invariably among the top three world-rate universities training specialists in the field of software design and production. These achievements depend to a large extent on development and implementation of the innovative specialist training system based on combination of design and competitive approaches into educational process. Scientific and methodological aspects of such system construction are considered in the article. Its efficiency is proved by another triumph of our university team at the Programming World Championship ACM ICPC in 2009.

Keywords: software design, design approach, competitive approach, specialist training, programming world championship.

Vladimir Vasilev – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D. Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru

Vladimir Parfyonov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department Head, D. Sc., Professor, parfenov@mail.ifmo.ru

Anatoliy Shalyto – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Professor, shalyto@mail.ifmo.ru

CORE TRAINING MONITORING IN SENIOR HIGH SCHOOL: DEMAND AND SUPPLY ANALYSIS

T. Getmanskaya, D. Grinshpun, V. Korolyov, S. Stafeev

This article describes method, process and results of the monitoring devised to investigate the core training system in Senior High School. The description includes actuality, criteria, hypotheses, organization, research, mathematical and presentation methods, main results and conclusions.

Keywords: monitoring, schoolchildren core training, Senior High School, scholars' needs, personnel demands on the labor market.

Tatiana Getmanskaya – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Lecturer, firefly.tg@gmail.com

Dmitry Grinshpun – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, dgr1@yandex.ru

Vladimir Korolyov – Private Educational Foundation "Institute of Information Technologies "SEGRYS", Deputy Director, vvkorolyov@gmail.com

Sergey Stafeev – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department Head, D. Sc., Professor, stafeev@phd.ifmo.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

SPECTRAL PROTOTYPES OF MAXWELL EQUATIONS IN DIELECTRIC MEDIUM WITH NON-RESONANCE DISPERSION AND INSTANTANEOUS CUBICAL NONLINEARITY

D. Ivanov, S. Kozlov

From Maxwell equations we deduced the combined equations describing the evolution of overlarge space-time spectra of light waves in homogeneous isotropic dielectric medium with arbitrary dependence of linear index of refraction and instantaneous cubical nonlinearity. We've got analytical iterative solution of the acquired combined equations. Solutions of the linearized combined equations are illustrated by the results of numerical simulation of femtosecond wave packet of a few optical oscillations propagation in a fused silica.

Keywords: nonparaxiality, femtosecond pulse, space-time spectra, cubical nonlinearity, overlarge spectra, iterative solution, nearby infrared range, optical glass, dispersion broadening, diffraction broadening.

Dmitry Ivanov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, haxpeha@list.ru

Sergey Kozlov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Dean, D. Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

INVESTIGATION OF IMAGE REPRESENTATIONS IN OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY USING INFORMATION CRITERIA

M. Volynsky, I. Gurov, A. Potapov

Representations of optical coherent tomography (OCT) images are investigated. Objective quality criterion of representations is introduced on the base of recently developed principle of representational minimum description length (RDML). Segmentation algorithm is proposed that detects layered structure of OCT images and can be used in morphological analysis of biological tissues, especially, in disease diagnostics. It is shown, that value of RDML criterion is in accordance with expert estimation of adequacy of segmentation results. Thus, this criterion can be utilized for further investigation and improvement of OCT image analysis algorithms.

Keywords: optical coherent tomography, image segmentation, information theory.

Maxim Volynsky – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, maxim.volynsky@gmail.com

Igor Gurov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Professor, gurov@mail.ifmo.ru

Alexey Potapov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D, pas.aicv@gmail.com

PHOTOLUMINESCENT MANIFESTATION OF INTERACTION BETWEEN CdTe QUANTUM DOTS AND METAL IONS IN WATER SOLUTION

A. Savelyeva, M. Mukhina, A. Orlova, V. Maslov, A. Baranov, A. Fedorov

The dynamics of CdTe quantum dots (QDs) clustering in water solutions in the presence of metal ions (Pb^{2+} , Cr^{3+}) is investigated. The data were obtained using absorption and fluorescent spectral analysis and fluorescent lifetime analysis. We observed that in the presence of lead ions CdTe QDs tend to form stable clusters of certain size. The results provide evidence of energy transfer between CdTe QDs inside formed clusters.

Keywords: CdTe quantum dots, nano-clusters, lead ions, energy transfer.

Anna Savelyeva – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, anna.tomsk@gmail.com

Maria Mukhina – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, mmuxina@gmail.com

Anna Orlova – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, udifa@mail.ru

Vladimir Maslov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Leading researcher, maslov@sp.ru

Alexander Baranov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Division Head, a_v_baranov@yahoo.com

Anatoly Fedorov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Senior staff scientist, a_v_fedorov@inbox.ru

LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

SURFACE CLEANING OF GLASS MICROCHIP AFTER BIOLOGICAL SAMPLES ANALYSIS

A. Evstrapov, A. Tupik

The paper discusses the problems connected with realization of polymerase chain reaction (PCR) on a microchip. The results of cleaning of glass microchip after PCR with the chromic solution, sodium hypochlorite solution (1%), sulfuric acid and hydrogen peroxide solution (3:1) and TE buffer solution are presented. It is confirmed that the sodium hypochlorite solution and chromic one are applicable for surface cleaning.

Keywords: microchip, surface, polymerase chain reaction (PCR).

Anatoly Evstrapov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph.D., evs@mail.ru

Alexandra Tupik – Analytical Instrumentation Institute of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate, tunix@yandex.ru

COMPARISON OF PLANS FOR NANOPIPETTES AND NANOPROBES LASER DRAWING

V. Matyzhonok, A. Petrov

In many areas of science it is required either to obtain data related to an object with nanoscale resolution, or make some action with it accurate within nanometer precision. This article describes two plans for laser extraction of nanopipettes and nanoprobes proposed and used at the Department of Laser Technologies and Environment Instrumentation of SPbSU ITMO. Technical data comparison of these plans and their ease of use are made. Extraction results obtained by these schemes are given.

Keywords: nanoprobe, SPM, laser drawing, probe microscopy, nanopipette, optical fiber.

Victor Matyzhonok - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Victoor@yandex.ru

Andrey Petrov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph.D., aa_petrov@lastech.ifmo.ru

NONADIABATIC PHENOMENA IN OPTOINFORMATIC POLARITON LASERS

R. Arkhipov, V. Egorov, I. Chekhonin

At the present time a possibility of developing of new class of coherent light sources – polariton lasers at the room temperatures – is of great interest. Theoretical understanding of generation mechanism in these systems is based on polaritons - quasi-particles, which are a superposition of photons and resonance medium excitations in strong-coupled electromagnetic field and matter. A new effective nonadiabatic method of excitation of polariton lasers with FM mode-locking laser pump is proposed. Nonlinear properties of polariton lasers are investigated.

Keywords: polariton, polariton laser, strong coupling.

Rostislav Arkhipov – St. Petersburg State University, Student, arkhipm@mail.wplus.net

Valentin Egorov – St. Petersburg State University, D. Sc., Professor, valentin_egorov@mail.ru

Igor Chekhonin – St. Petersburg State University, Ph. D., senior staff scientist, chekhonin@mail.ru

UNITS AND DEVICES OF TECHNICAL SYSTEMS

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FRANCIS TURBINE RUNNER RO-230

V. Zolotarevich, N. Yugov

Physical and mathematical model construction of hydroturbine runner for calculation of hydrodynamic flows and behaviors is considered in the paper. Results in three-dimensional calculations are compared with the data received in symmetric axis task and with available experimental data.

Keywords: hydroturbine, turbine runner, guide turbine, computer fluid dynamics, finite volume method.

Valery Zolotarevich - North-West State Technical University, Postgraduate, zolotarevich@nwpi.ru

Nikolay Yugov - North-West State Technical University, Head of Innovative scientific center CAE technologies, D. Sc., Professor, caecentercit@nwpi.ru

THE THEORY OF THE MOSFET ULTRA FAST SWITCHING

V. Togatov, P. Gnatyuk, D. Ternovsky

Ultra fast switching process of the high-voltage MOSFET is reported, a switching time constant being less than several nanoseconds. The ultra fast switching mechanism is explained and interpreted in the framework of the given mathematical model. The results of direct experiments confirm the proposed ultra fast switching mechanism interpretation.

Keywords: MOSFET, high-voltage techniques, pulse techniques, nanoseconds techniques, electro-optical shutter.

Vyacheslav Togatov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, v.togatov@mail.ru

Peter Gnatyuk - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Research engineer, Applicant, gnatyuk@mail.ru

Dmitry Ternovsky – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Master, dm-ternovsky@mail.ru

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF REVERSED PROCESS OF BROWN COAL BED GASIFICATION WITH AIR AND OXYGEN BLOWING

I. Mikhalyov, S. Islamov

Experimental investigation of reversed process of brown coal bed gasification with air and oxygen blowing has been carried out. Advisable regimes for the considered process with air blowing have been determined. Significant acceleration of the process due to the use of oxygen blowing has been established. Ways of intensification of the process depending on exact purpose of its use have been formulated.

Keywords: coal, reversed blowing, bed gasification, intensification.

Igor Mikhalyov – “Sibtermo” Energy Technology Company, Ltd., Engineer, Siberian Federal University, Postgraduate, Master, Igor.O.Mikhaliyov@gmail.com

Sergey Islamov – “Sibtermo” Energy Technology Company, Ltd., Director General, Ph. D., Senior staff scientist, termo@24kr.ru

MATERIALS SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

SINGLE NANOWHISKER FORMATION ON THE TOP OF CANTILEVER FOR SCANNING PROBE MICROSCOPY

A. Golubok, A. Kovrov, V. Levichev, I. Mukhin, O. Prihodko

Methods of whisker growth like molecular beam epitaxy, metall organical vapor deposition, growth with electrolysis, method of laser ablation are very popular at present. In this work we offer extension of noncontrol self-organized whisker growth method by the action of the electron beam. Introduced method supposes to control geometry growth and properties of whiskers. Single whisker growth technology can be applied in scanning probe microscopy by making superprobe for researching well-branching surface (deep channels and the cavity) and making the points of the cathodes and nanotweezers.

Keywords: whisker, scanning probe microscopy, cantilever, electronic microscopy, whisker growth.

Alexander Golubok - Institute of Analytical Instrumentation, RAS, Deputy director, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Nanotechnology and Materials Science Department, D.Sc., Senior staff scientist, golubok@ntspb.ru

Alexander Kovrov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Master, shapun@mail.ru

Vadim Levichev – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Lecturer, levichev_vadim@mail.ru

Ivan Mukhin - Academic Physics and Technology University (APTU), Russian Academy of Sciences, Student, Master, imukhin@yandex.ru

Oleg Prihodko – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Lecturer, Ph. D., Associate Professor, oap4@pochta.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

MODELING OF MULTISERVICE NETWORK CORE WITH RELATIVE PRIORITIZATION OF NON-HOMOGENEOUS TRAFFIC

T. Aliev, I. Nikulsky, V. Pyattaev

Queuing network models were developed for urban multiservice network core servicing three types of traffic (voice, video and data). To study the network characteristics (average delay and jitter of different frames types) the combined approach, based on analytical and simulation methods, is used. The study results are based on numerous modeling experiments with different assumptions about traffic characteristics and processing in nodes with relative prioritization.

Keywords: multiservice network, non-homogeneous traffic, Quality of Service (QoS), network delay, delay jitter, relative prioritization.

Taufic Aliev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Professor, alive@d1.ifmo.ru

Igor Nikulsky – Federal State Unitary Enterprise “Leningrad Branch Scientific Research Signal Institute”, Chief of the laboratory, Ph. D., Associate Professor, senior staff scientist, nikul@loniis.org

Vladislav Pyattaev - Federal State Unitary Enterprise “Leningrad Branch Scientific Research Signal Institute”, Deputy of General Director, Ph. D., pvo@loniis.org

RESEARCH OF LOSSY IMAGES COMPRESSION METHOD WITH APPLICATION OF ADAPTIVE QUANTIZATION

Y. Luzhkov, A. Tropchenko

The method of values calculation of a quantization vector factors for lossy compression schemes of images, based on using the weight criterion is offered. Comparison of base JPEG scheme and its modification on the basis of the developed method is made. The given modification exceeds JPEG scheme on 10-20 %. Generalization of the method is made for compression schemes on the basis of adaptive segmentation.

Keywords: image compression, adaptive quantization, weight criterion, JPEG.

Yury Luzhkov - St. Petersburg State University of Information Technology, Mechanics and Optics, Postgraduate, luzhkov@inbox.ru

Alexander Tropchenko - St. Petersburg State University of Information Technology, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, tau@d1.ifmo.ru

QUALITY ASSESSMENT OF BROADCAST TELEVISION MATERIALS FOR MOBILE TERMINALS

A. Peregudov, K. Glasman, A. Belozertsev, E. Grinenko

The results of experimental study of multimodal quality assessment of compressed television materials for portable and mobile devices are discussed in the paper. There are special requirements because of the limited bandwidth of transmission channels in portable and mobile multimedia production. A kind of optimization should be done and as a result special recommendations should be made to meet such requirements and to provide a reasonable level of integral perceived quality. If dynamic multiplexing and adaptive (content

dependent) allocation of video- and audio flows in the range of constant channel bandwidth are being taken into account, it will allow improving the quality of new portable and mobile multimedia applications in broadcast television systems.

Keywords: mobile television, quality assessment, multimodal assessment, compression, multimedia *Alexander Peregudov* - St. Petersburg State University of Film and Television, Vice President for scientific work, D. Sc., peregudov@dip.spb.ru

Konstantin Glasman - St. Petersburg State University of Film and Television, Department Head, D. Sc., Associate Professor, k.glasman@gmail.com

Alexander Belozertsev - St. Petersburg State University of Film and Television, Associate Professor, Ph. D., a.belozertsev@gmail.com

Evgenia Grinenko - St. Petersburg State University of Film and Television, Postgraduate, evgenia.grinenko@gmail.com

AN AGENT-BASED PEER-TO-PEER DISTRIBUTED SYSTEM FOR INFORMATION SUPPORT OF INNOVATIONS

A. Masloboev, M. Shishaev

The state-of-the-art research directions in the field of methods and tools development for information support of innovations are considered. A multi-agent peer-to-peer distributed system prototype for information and analytical support of regional innovations has been developed. Proposed scientific solution is based on using of ontologies and agent-based approach for system engineering. System architecture, software modules, functioning principles and application domains are described in detail.

Keywords: multi-agent approach, information system, ontologies, innovation business, simulation

Andrey Masloboev – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Ph.D., Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

Maxim Shishaev – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Head of Regional Information Systems Laboratory, Ph.D., Associate professor, shishaev@iimm.kolasc.net.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

IDENTIFICATION CRITERIA OF CREDIT RISK MODELS BY STATISTICAL DATA

D. Strokov, E. Solojentsev

Application analysis of Logical-Probabilistic (LP) risk models is considered, and importance of the identification procedure of risk LP-models by statistical data is showed. Mathematical description of risk LP-models is given. The identification method of risk LP-models is stated and different criteria of identification are proposed and investigated. The recommendations by their applications are given.

Keywords: model, statistics, system, conditions, logic, identification, criterion, probability, gradients, Monte-Carlo, algorithm, optimization, knowledge base.

Dmitry Strokov – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Postgraduate, dima.src@gmail.com

Evgeny Solojentsev – Institute of the Engineering Science Problems RAS, D. Sc., Professor, esokar@gmail.com.

Подписано к печати 15.07.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 10(62)

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)

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2009