

Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВПО «Кубанский

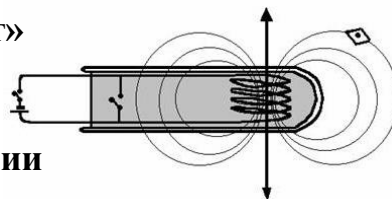
государственный университет»

Краснодарский центр

научно-технической информации

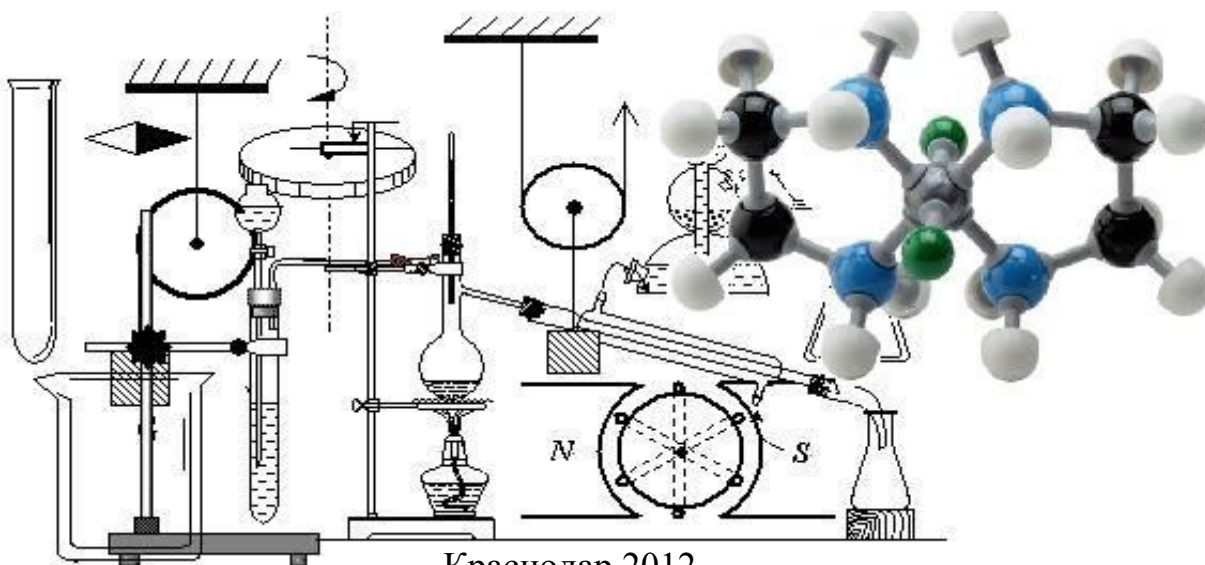
Европейская академия естественных наук

Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ, БИОФИЗИКИ И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Материалы всероссийской заочной научно-практической
конференции



Краснодар 2012

УДК 53:001.12/18

ББК 22.3

К-606

Редакционная коллегия:

Ксенофонтов В.И. – директор Краснодарского центра научно-технической информации, доктор экономических наук, председатель.

Шипулин А.П. – генеральный директор ОАО «ЮТК».

Богатов Н.М. – заведующий кафедрой физики и информационных систем КубГУ, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член АИН РФ им. А.М. Прохорова.

Яковенко Н.А. – заведующий кафедрой оптоэлектроники КубГУ, доктор технических наук, профессор, действительный член АИН РФ им. А.М. Прохорова.

Тумаев Е.Н. – профессор кафедры физики и информационных систем КубГУ, доктор физико-математических наук.

К-606 Коллективная монография. Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий / Авторская редакция. – Краснодар: ЦНТИ, 2012. – 429 с.

ISBN 978-5-91221-135-5

В коллективную монографию вошли доклады Всероссийской заочной научно-практической конференции «Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий». Адресуется преподавателям, аспирантам, соискателям, студентам, всем кто интересуется физикой, биофизикой и инфокоммуникационными технологиями.

УДК 53:001.12/18

ББК 22.3

ISBN 978-5-91221-135-5

© Краснодарский ЦНТИ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

I. БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ.....	7
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕГУЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО СТРЕССА <i>Андросова Т.В., Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Злищева Э.И., Клетиков Я.Е., Шурыгин А.Я.</i>	7
СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ <i>Арутюнян Т.В., Арцыбашева О.М., Лужанина О.Э., Нетребич Д.М., Пантюхин И.И., Сабокаръ А.М., Онищук С.А.</i>	14
ОЦЕНКА АНТИРАДИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ВОДЫ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДЕЙТЕРИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯМР, ЭПР И МАСС-СПЕКТРОСКОПИИ <i>Барышев М.Г., Басов А.А., Болотин С.Н., Джимаков С.С., Федосов С.Р., Шашков Д.И., Козин С.В., Касаткина Д.Д., Дацун С.Н.</i>	25
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В НЕРВНОМ ВОЛОКНЕ <i>Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Понетаева Е.Г.</i>	33
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦВЕТОВОЙ ПАЛИТРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ <i>Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Синицын А.С.</i>	45
ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТООБОРОТ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТДЕЛА УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ <i>Дубина А.В.</i>	60
АВТОМАТИЗАЦИЯ НАРКОЗНО-ДЫХАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Рунец А.П.</i>	67
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕМОГРАММ БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ <i>Трюхан Н.Ю. Онищук С.А.</i>	73
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЦЫ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ <i>Фесенко И.Н., Скредова Ю.И., Никитин В.А., Яковенко Н.А.</i>	80
ВНЕДРЕНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ <i>Шевченко А.В.</i>	86

II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ.....	93
ПРИЕМНИКИ И ПЕРЕДАТЧИКИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ	
<i>Балака Е.С., Братов А.В., Горшкова Н.М., Грюншпан А.А.....</i>	93
ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В СОЕДИНЕНИЯХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН СТАНДАРТА G.655	
<i>Бартышов В.В., Прохоров В.П.....</i>	108
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГРАФИЧЕСКОМ ФОРМАТЕ	
<i>Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Реутов В.В.....</i>	116
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ОТ РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ ОБЪЕКТОВ	
<i>Григорьян Л.Р., Сахно М.А.....</i>	123
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ИЗ-ЗА АВАРИЙ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ	
<i>Кононенко А.В., Яковенко Н.А., Сморгинский В.С.....</i>	129
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
<i>Котенко Е.А.....</i>	134
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СИММЕТРИЧНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
<i>Митькина А.С., Акжигитов А.Х., Никитин В.А., Яковенко Н.А.....</i>	140
МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ В ВОЛНОВОДНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ	
<i>Орлянский С.А., Прохоров В.П.....</i>	146
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОННОГО ВОЛНОВОДА	
<i>Селина Н.В., Векишин М.М., Тумаев Е.Н., Яковенко Н.А., Благодырь М.А..</i>	154
КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ	
<i>Томилини А.Н.....</i>	163
III. ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА.....	181
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДВУХ ТИПОВ	
<i>Акопян В.А., Захаров Ю.Н, Паринов И.А., Раевский И.П., Рожков Е.В...</i>	181
ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ВЛИЯНИЯ	
<i>Бирюков А.А., Шлеенков М.А.....</i>	188

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ТЕОРИИ ВРЕМЕНИ Н.А.КОЗЫРЕВА	
<i>Бовин А.А.</i>	202
МОДЕЛЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОВЕРХНО- СТНО-БАРЬЕРНЫМ ПЕРЕХОДОМ	
<i>Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н.</i>	216
ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ОТРИЦА- ТЕЛЬНОМ КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ	
<i>Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н., Сахно М.А.</i>	226
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ПАР ФРЕНКЕЛЯ, ОБРАЗОВАВ- ШИХСЯ В КРЕМНИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПОТОКОМ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ	
<i>Богатов Н.М., Коваленко М.С.</i>	233
РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КВАЗИПОТЕНЦИАЛ И КВАНТОВОЭЛЕКТРО- ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ	
<i>Бойкова Н.А., Бойкова О.А.</i>	241
ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНАЯ КЛИДОНОГРАФИЯ ВЕЕРООБРАЗНЫХ СТРИМЕРОВ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕР- НОГО ДАВЛЕНИЯ	
<i>Бойченко А.П.</i>	249
О НАБЛЮДЕНИЯХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-Р» В АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ КУБАН- СКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА	
<i>Иванов А.Л., Лысенко В.Е., Иванов В.А.</i>	257
РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА БАРИЯ	
<i>Исаев В.А., Игнатьев Б.В., Лебедев А.В., Плаутский П.Г., Гаврилюк С.Ю., Головащенко С.С.</i>	263
ИССЛЕДОВАНИЕ АССИМЕТРИЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В АККУМУЛЯТОРАХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ	
<i>Козбаев К.К., Коржова Е. С., Лопатин Д. С., Баранов О. А.</i>	270
СИСТЕМА АВРОРАЛЬНЫХ КАМЕР MAIN: СИСТЕМА СБОРА И ДОСТУПА К ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НОЧНОГО НЕБА	
<i>Козелов Б.В.</i>	278
ФУЛЛЕРЕН C ₂₄ В МОДЕЛИ ХАББАРДА	
<i>Силантьев А.В.</i>	284
АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙ- ЧИВЫХ ТОКОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ МЕЗО- СКОПИЧЕСКОМ КОЛЬЦЕ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
<i>Третьяк Д.Н., Тумаев Е.Н.</i>	291
ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ КВАНТОВЫХ КОЛЕЦ И ТОЧЕК ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	
<i>Тумаев Е.Н., Чайкин А.А.</i>	299

СКАЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИИ	
<i>Шестаков Ю.И.</i>	318
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕПТАНСА РЕАКЦИИ $p_n \rightarrow p_K + \Sigma^-$, ИЗУЧАЕМОЙ НА СПЕКТРОМЕТРЕ ANKE	
<i>Шиков Е.Н.</i>	352
IV. МЕТОДИКА НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ, ИНТЕЛЛУКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	360
ВОПРОСНО-ОТВЕТНАЯ СИСТЕМА СМЫСЛОВОГО АНАЛИЗА ТЕКСТА	
<i>Богатов Н.М., Родоманов Р.Р.</i>	360
НАУЧНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ИННОВАЦИЙ	
<i>Глушак Н.В.</i>	368
КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТЕКСТОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА	
<i>Кошкин Д.Е., Дементьев И.О.</i>	377
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПО АСТРОФИЗИКЕ	
<i>Лысенко В.Е., Иванов А.Л.</i>	383
МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	
<i>Палий Н.Ю.</i>	389
О РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОВЫШЕНИЮ СОЦИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СТУДЕНТОВ ПЕРВОГО КУРСА ВУЗА СРЕДСТВАМИ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ	395
<i>Половодов Ю.А.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА УРОКАХ ФИЗИКИ	406
<i>Сартюкова А.А.</i>	
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ	
<i>Черненко С.А., Омельченко А.Н., Добро Л.Ф., Парфенова И.А.</i>	412
ИННОВАЦИОННЫЕ ДИДАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОВРЕМЕННЫМ ПРОБЛЕМАМ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ	
<i>Щеколдин Г.А.</i>	420

I. БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕГУЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО СТРЕССА

Андросова Т.В., Богатов Н.М., Григорьян Л.Р.,

Злищева Э.И., Клепиков Я.Е., Шурыгин А.Я.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Внутренняя терморегуляция организма контролируется центральной нервной системой, в частности гипоталамусом и эндокринной системами, а реализуется посредством метаболического термогенеза, тока крови, мышечного тонуса кожи, ритма дыхания, частоты сердечных сокращений, выделения пота. Тепловые и холодовые рецепторы расположены в трех областях тела: в гипоталамусе, грудном отделе спинного мозга и коже [1]. Процессы внутренней терморегуляции и теплообмен с окружающей средой формируют тепловое поле организма. Распределение температуры на поверхности тела определяют тепловизионным методом.

Биологический организм является открытой энергетической системой, которая стремится к динамическому равновесию с окружающей средой. Жизнеспособность организма обеспечивают физико-химические процессы саморегуляции, действующие как на уровне всего организма, так и на уровне клеток. Интегральная система саморегуляции объединяет ряд подсистем [2], в число которых входит система терморегуляции [3]. Исследование этих систем является актуальной задачей биофизики и физиологии, ставящей целью построение информационной модели организма.

Система терморегуляции включает в себя многократно продублированные элементы, выполняющие функции теплообменников, теплоносителей, источников тепла, датчиков температуры и центров регуляции [3]. Эти элементы объединены цепями управления и обратной связи, взаимодействующими в про-

цессе достижения максимального приспособительного эффекта [2]. Взаимодействие реализуется в различных масштабах посредством макро-, микро- и нано-объектов. Действие системы терморегуляции проявляется в управлении механизмами теплопередачи на макроуровне органов и частей тела, микроуровне кровеносных сосудов и клеток окружающей их ткани, наноуровне мембран нервных окончаний терморцепторов и молекул белков [1, 4–6].

Для изучения влияния стресса на организм млекопитающих используются экспериментальные животные. Исследуются реакции центральной нервной, иммунной, метаболической и сердечно-сосудистой систем организма, а также влияние препаратов, компенсирующих эти реакции. Результаты этих исследований отражены в обзорах зарубежных авторов [7, 8].

Цель работы – исследование реакций терморегуляторной системы организма экспериментальных животных в процессе продолжительного стресса.

Реакции терморегуляторной системы в процессе продолжительного стресса исследовались на белых лабораторных мышах одного возраста. Мыши подвешивались за шейную складку и находились в таком состоянии в течение 5 ч. Изменения теплового поля фиксировались тепловизионным методом с помощью тепловизоров NEC TH5104 и IRISYS 4010. Оба тепловизора показали одинаковые тенденции изменения температуры. Измерения проводились в закрытом помещении при температуре 20 °С, влияние посторонних источников тепла исключалось. Исследовано 18 мышей. На основе термограмм для каждой мыши построены графики зависимости температуры от времени $T(t)$ в трех областях тела: голова, область брюшка и паховая область. В этих областях радиационная температура выше, чем в других частях тела. Выбранные три области имеют меньший волосяной покров, поэтому измеренные в них значения радиационной температуры ближе к температуре кожи, чем в других частях тела. Зависимость температуры от времени содержит флуктуации. Для каждой зависимости построена линия тренда, тангенс угла наклона которой равен средней скорости изменения температуры V_T .

По характеру изменения температуры в указанных выше областях мышцы разделены на три группы. В группу 1 входят 10 мышей, у которых температура понижалась со временем во всех трех областях, средняя скорость изменения температуры V_T составляет примерно -10^{-4} °C/с. В группу 2 включены 2 мыши, у которых во всех трех областях температура повышалась, $V_T \sim 10^{-4}$ °C/с. Скорость изменения температуры в группе 3, куда вошли 6 мышей, на порядок меньше ($|V_T| \sim 10^{-5}$ °C/с) и может отличаться знаком, как для разных мышей, так и в разных областях тела одной мыши. На рис. 1 показана зависимость температуры от времени в области головы для мышей из групп 1 и 2. Изменение температуры, рассчитанное по линии тренда: $\Delta T_1 = -5,7$ °C (рис. 1, зависимость 2), $\Delta T_2 = 1,1$ °C (рис. 1, зависимость 1).

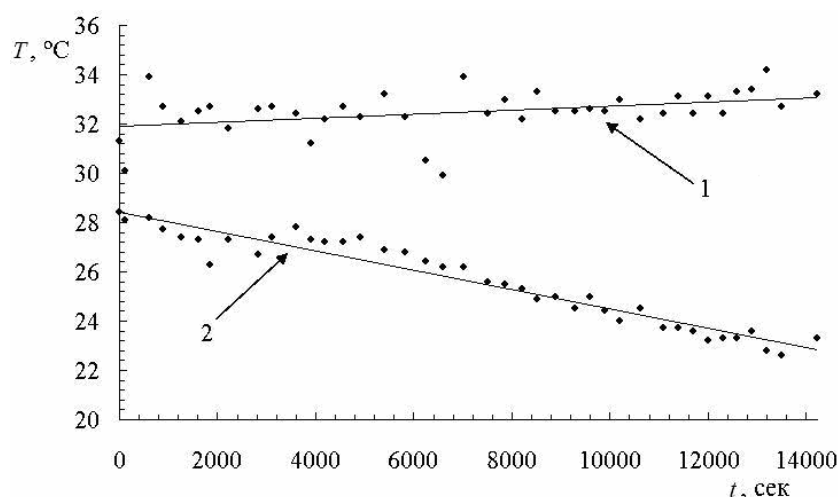


Рис. 1. Типичная зависимость температуры от времени в области головы: точки — экспериментальные данные; линия тренда — линейная аппроксимация: 1 — мышь из группы 2; 2 — мышь из группы 1

Морфологический анализ крови и органов (тимуса, селезенки, надпочечников) показал, что вследствие продолжительного стрессирования животных практически у всех мышей значительно уменьшилась масса тимуса в сравнении с аналогичным показателем в контрольной группе мышей, не подвергавшихся стрессорному воздействию. Исключением была одна мышь из группы 1, масса тимуса которой после стрессирования оказалась близкой к

норме. У всех мышей масса надпочечников увеличилась или осталась близкой к норме. В группе 1 селезенка мышей уменьшилась относительно нормы, за исключением одной мыши, у которой она незначительно увеличилась. В группе 2 масса селезенки у всех мышей стала значительно больше, а у одной из мышей зафиксировано и значительное увеличение надпочечников. В группе 3 наблюдались смешанные тенденции изменения селезенки по отношению к соответствующим показателям в группах 1 и 2.

В табл. 1 представлены основные тенденции изменения тимуса, селезенки, надпочечников стрессированных мышей по сравнению с контрольной группой нестрессированных мышей (группа 4) на примере средних по группам значений масс этих органов. Изменение среднего значения массы превышает стандартное отклонение соответствующей величины во всех случаях, за исключением селезенки в группе 3 и надпочечников в группе 2. Исключительные случаи требуют дополнительных исследований. Следует отметить значительное увеличение стандартных отклонений масс органов в каждой из трех групп по сравнению с контрольными данными.

У стрессированных животных наблюдаются и значительные изменения в лейкограмме крови. Практически у всех животных значительно увеличилось содержание нейтрофилов и, соответственно, уменьшилось число лимфоцитов. Только в одном случае зафиксировано небольшое уменьшение содержания нейтрофилов – это мышь из группы 1, у нее же слабо увеличилась селезенка. Изменение содержания нейтрофилов и лимфоцитов во всех группах имеет большой разброс. При этом среднее значение увеличения содержания нейтрофилов в крови мышей группы 2 больше, чем в группах 1 и 3 (табл. 2).

Оценка изменений лейкограммы периферической крови и массы внутренних органов (тимуса, селезенки и надпочечников) позволяет предположить, что наиболее стрессированы мыши из группы 2. Это состояние может сопровождаться значительным увеличением селезенки и увеличением надпочечников, то есть повышенным напряжением функциональных подсистем системы тер-

морегуляции организма, и, как подтверждают наши данные, ростом температуры.

Таблица 1

Изменение массы тимуса, селезенки, надпочечников у стрессированных мышей, масс. %

Орган	Группа			
	1	2	3	4
Тимус:				
среднее значение	0,100	0,114	0,115	0,193
станд. отклонение	0,050	0,065	0,028	0,007
Селезенка:				
среднее значение	0,310	0,516	0,351	0,382
станд. отклонение	0,061	0,119	0,137	0,005
Надпочечники:				
среднее значение	0,027	0,029	0,036	0,021
станд. отклонение	0,004	0,011	0,012	0,002

Таблица 2

Средние значения изменения содержания нейтрофилов в крови и скорости изменения температуры стрессированных мышей

Показатель	Группа		
	1	2	3
Изменение нейтрофилов, %	17,0	32,6	20,1
Скорость изменения температуры, °C/с:			
голова	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$-5,5 \cdot 10^{-6}$
брюшко	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
пах	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$

Наблюдаемые в эксперименте у большинства мышей уменьшение массы тимуса, селезенки, увеличение надпочечников, изменение состава крови – характерные признаки адаптационного синдрома, возникающего вследствие стресса [7]. Обмен информацией между объектами системы саморегуляции осуществляется посредством гормонов, распространяющихся с током крови. Надпочечники расширяются и выпускают большое количество стероидов в

кровь. Поступающие с кровью раздражители возбуждают систему гипоталамус – гипофиз – надпочечники. Гипоталамус активизирует выделение гипофизом в кровь адренокортикотропного гормона, стимулирующего в свою очередь деятельность коры надпочечников. Центр температурной регуляции располагается в гипоталамусе. В случае стресса, как и в случае инфекции, продукты взаимодействия клеток тканей с лейкоцитами, вызывают образование в крови химических веществ, стимулирующих центр температурной регуляции. В результате наблюдается подъем температуры тела. Селезенка, как часть ретикуло-эндотелиальной системы, разрушает отжившие кровяные клетки. Возможно, что эти процессы определяют показатели мышей группы 2: значительное увеличение массы селезенки, содержания нейтрофилов в крови и температуры.

Физиологические реакции на стресс у человека и у животных имеют много общего, однако система происхождения и «распространения» стресса в организме человека значительно сложнее. У человека стресс – это сигнал, раздражающий центральную нервную систему, ответ которой выражается в виде физиологических и поведенческих реакций организма. Физиологические реакции – это сигналы, обработанные головным и спинным мозгом. К ним относятся: изменение теплового поля человека, повышенное потоотделение, учащенное дыхание, непроизвольное сокращение мимических мышц лица, учащение сердцебиения (тахикардия), что сопровождается изменением артериального давления и цвета кожных покровов (гиперемией или бледностью). Поведенческие реакции являются результатом обработки сигнала в головном мозге. К ним относятся: повышенная рассеянность или собранность, не характерные для человека в обычном (не стрессовом) состоянии возбуждение или апатия.

Полученные результаты показывают, что тепловизионный метод применим для исследования теплового поля стрессированных биологических объектов. Напряжение функциональных подсистем системы терморегуляции организма проявляется в различных тенденциях зависимости температуры от времени: уменьшении, возрастании, незначительном изменении. Для количествен-

ной оценки степени стрессированности предлагается использовать скорость изменения температуры.

Библиографический список

1. Иванов К.П. Основы энергетики организма: Теоретические и практические аспекты. Т. 1: Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция / К.П. Иванов. — Л.: Наука, 1990. — 307 с.
2. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем / П.К. Анохин. — М.: Медицина, 1975. — 448 с.
3. Ермакова И.И. Математическое моделирование процессов терморегуляции у человека. Итоги науки и техники. Физиология человека и животных / И.И. Ермакова — ВИНТИ, 1987. — Т. 33. — 136 с.
4. Физиология кровообращения: Физиология сосудистой системы. Руководство по физиологии / Под ред. Б. И. Ткаченко. — Л.: Наука, 1984. — 652 с.
5. Парашин В.Б. Биомеханика кровообращения / В.Б. Парашин, Г.П. Иткин. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 224 с.
6. Бегун П.И. Биомеханика / П.И. Бегун, Ю.А. Шукейло. — СПб.: Политехника, 2000. — 463 с.
7. Orlando G.F. Role of neuronal nitric oxide synthase in the regulation of the neuroendocrine stress response in rodents: insights from mutant mice / G.F. Orlando, G. Wolf, M. Engelmann // Amino Acids. — 2008. — Vol. — 35. — N 1. — P. 17-27.
8. Strekalova T. Factors of reproducibility of anhedonia induction in a chronic stress depression model in mice / T. Strekalova, H. Steinbusch // Neuromethods. — 2009, 1. — Vol. — 42. — P. 153-176.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ

Арутюнян Т.В., Арцыбашева О.М., Лужанина О.Э., Нетребич Д.М,
Пантюхин И.И., Сабокарь А.М., Онищук С.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Статистический анализ позволяет получить информацию о взаимосвязях объектов, представленных в виде матрицы. Из всего многообразия методов статистического анализа можно выделить корреляционный и факторный анализы, которые выявляют математические связи между объектами.

Факторный анализ является одним из разделов многомерного статистического анализа. Он основан на многомерном нормальном распределении, то есть каждый из используемых признаков изучаемого объекта должен иметь нормальный закон распределения. Однако довольно часто гематологические показатели имеют заметную асимметрию. Но тем не менее даже в этом случае факторный анализ исследует внутреннюю структуру ковариационной и корреляционной матриц системы признаков изучаемого объекта.

Наиболее информативными в плане определения физиологического состояния высококвалифицированных спортсменов являются общий и биохимический анализ крови, вольтажно-временные характеристики ЭКГ и показания вариационной пульсометрии.

Общий и биохимический анализы крови являются интегральными методами скринингового обследования спортсменов высокого уровня. Эти методы лабораторной диагностики позволяют оценить состояние кроветворной системы, работу внутренних органов (печень, почки, поджелудочная железа, желчный пузырь и др.), получить информацию о метаболизме (обмен липидов, белков, углеводов), выяснить потребность в микроэлементах. Они также важны для диагностики практически всех нарушений гемопоза.

При оценке состояния сердца и сердечнососудистой системы ключевую роль играет анализ электрокардиограммы (ЭКГ), представляющей собой запись наблюдаемых на поверхности тела проекций объёмных электрических процессов, происходящих в сердце. ЭКГ несёт информацию как о текущем состоянии сердечнососудистой системы, так и о патологических изменениях в самом сердце.

Анализ ЭКГ играет ключевую роль в спортивной медицине. Статистический анализ различных показателей спортсменов даёт важную информацию о качестве подготовки спортсменов. ЭКГ предоставляет ценные данные о функционировании их органов и систем. В связи с развитием информационных технологий математическая обработка данных даёт новую информацию о результатах тренировки.

У спортсменов высшей квалификации ценную информацию также даёт вариационная пульсометрия. В настоящее время применяются различные методы анализа вариабельности сердечного ритма в самых разнообразных областях прикладной физиологии и клинической медицины. Несмотря на это сфера их использования продолжает расширяться с каждым годом.

Вариационная пульсометрия применяется как для решения общих, так и конкретных диагностических задач. Например, кардиоритмографическое исследование позволяет делать выводы о преимущественном влиянии симпатического или парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС) на регуляцию синусового ритма, что в конечном итоге позволяет судить о преобладании определенного типа регуляции организма со стороны ВНС в целом. Помимо этого, оценивая результаты функциональных проб, можно, в частности, делать выводы об адаптационных способностях организма к меняющимся условиям внутренней и внешней среды.

Целью данной работы было выявление основных статистических взаимосвязей и факторов, воздействующих на состав крови высококвалифицированных спортсменов, факторный анализ вольтажно-временных характеристик ЭКГ

у спортсменов высшей квалификации, а также анализ факторов спортсменов высшей квалификации на основе показателей вариационной пульсометрии.

Таблица 1. Корреляционная матрица показателей крови спортсменов.

	Лейк оц.	Эри тр.	Гем огл.	Гем аток р.	Сред, Тром б.	Пало чк.	Сег мент	Эозин	Моно ц.	Лимф оц.	
Лейкоц.	1,00	0,12	0,08	0,10	-0,09	0,15	-0,04	0,32	-0,09	-0,20	-0,16
Эритр.		1,00	0,88	0,89	-0,62	-0,07	-0,31	0,06	-0,07	0,13	0,12
Гемогл.			1,00	0,91	-0,32	-0,08	-0,24	0,08	-0,01	0,11	0,04
Гематокр.				1,00	-0,20	-0,09	-0,26	0,05	-0,07	0,14	0,10
Сред, Тромб.					1,00	0,00	0,20	-0,1	-0,02	0,00	-0,06
Сегмент.						1,00	-0,03	0,05	0,21	0,07	-0,18
Эозин.							1,00	-0,10	-0,29	-0,67	-0,22
Моноц.								1,00	-0,25	-0,07	-0,07
Лимфоц.										1,00	1,00

Для этого анализировались гемограммы, характеристики ЭКГ, а также показатели вариационной пульсометрии спортсменов высшей квалификации на разных этапах тренировочного процесса. Исследование венозной крови осуществлялось с использованием гематологического анализатора. Для получения данных использовалась диагностическая установка «Валента». Обследовались спортсмены таких видов спорта как гребля, плавание и велосипедный спорт.

На таблице 1 показана корреляционная матрица, рассчитанная по гемограммам общего анализа крови, которая обнаружила как высокие положительные коэффициенты корреляции например между содержанием эритроцитов и содержанием гемоглобина и гематокритом, так и высокие отрицательные коэффициенты корреляции например между содержанием сегментоядерных и содержанием лимфоцитов. Но это достаточно тривиально, и скорей указывает на валидность гемограмм.

Было установлено, что содержание гемоглобина, как переносчика кислорода, в крови спортсменов больше, чем у нетренированной молодежи. Проведено сравнение показателей крови высококвалифицированных спортсменов разных видов спорта. В частности, по сравнению с велосипедистами и гребцами на каноэ и байдарках у пловцов самые высокие средние по содержанию эритроцитов, тромбоцитов и гемоглобина, процентному содержанию сегментоядерных, самый высокий средний гематокрит, и в то же время самый низкий средний объем эритроцита и самое низкое процентное содержание палочкоядерных. Вероятно, это связано с разницей интенсивности и продолжительности нагрузок для разных видов спорта. По сравнению, например, с велосипедистами у спортсменов выступление гораздо менее продолжительное, но более интенсивное.

Корреляционная матрица по биохимическим анализам всей группы показала в некоторых случаях высокие коэффициенты корреляции. В частности, между АСТ и КФК его величина составляла 0,81. Следует отметить, что индивидуальные корреляционные матрицы имели существенные отличия от общей. Так, например, из таблицы видно, что мочевина слабо коррелирует с остальными показателями крови, в то время как для индивиду-

Таблица 2. Факторный анализ крови спортсменов.

	F1	F2	F3	F4
WBC	-0,17	-0,88	-0,11	-0,25
RBC	-0,16	-0,25	-0,74	0,07
HGB.	-0,19	0,21	-0,85	0,27
HCT	-0,34	-0,17	-0,41	0,19
MCV	-0,33	0,08	0,65	0,17
PLT	0,47	-0,12	0,00	-0,23
PaL	-0,15	-0,54	0,18	-0,23
SEGM	0,18	-0,82	0,43	0,23
NEUT	0,10	-0,87	0,43	0,11
EOS	-0,10	-0,47	-0,26	0,63
MONO	0,29	0,18	-0,34	-0,84
LYMPH	-0,17	0,93	-0,22	-0,05
ENTROP	0,05	0,40	-0,70	-0,11
BELOK	0,48	-0,68	-0,42	-0,18
ALB	0,92	0,32	0,17	0,00
GLOB	-0,90	-0,36	-0,20	-0,02
α_1	-0,95	0,08	0,17	-0,23
β_2	0,49	-0,66	-0,42	-0,18
β	-0,36	-0,57	-0,42	0,12
γ	-0,95	-0,18	-0,11	0,11
A/G	0,88	0,36	0,22	-0,04
% α_1	-0,91	0,21	0,25	-0,24
% α_2	0,95	-0,14	-0,10	-0,14
% β	0,96	0,10	0,00	0,04
% γ	-0,91	-0,04	-0,05	0,24
Энтропия Glob	-0,71	-0,09	0,06	-0,42
Мочевина	0,77	0,08	-0,47	0,07
Глюкоза	0,47	-0,22	-0,15	0,40
Тестостерон	-0,03	0,38	0,02	0,86
Kort	-0,73	0,39	-0,18	0,18
Test/Kort	0,89	-0,06	0,17	0,34
Вес фактора	0,38	0,19	0,13	0,10

альных данных мочевины имеет значительную корреляцию со щелочной фосфатазой, альбуминами и глобулинами.

В таблице 2 приведены результаты факторного анализа гемограмм спортсменов высокой квалификации. Причем в данном случае были сопоставлены гемограммы общего и биохимического анализов крови.

При суммарном анализе морфологического, белкового и биохимического состава крови у высококвалифицированных спортсменов, специализирующихся в плавании, выделяются 3 ведущих фактора – $F1$, $F2$ и $F3$. Наиболее значимый фактор $F1$ предположительно является фактором анаболической эффективности. Именно судя по вошедшим в него критериям (процентное содержание альбуминов со знаком +, альбумино-глобулиновый коэффициент со знаком +, соотношение тестостерона к кортизолу со знаком + и содержание кортизола со знаком “-”, он и может быть обозначен как фактор превалирующего анаболизма.

В фактор $F2$ вошли процентное содержание лимфоцитов со знаком “+” и процентное содержание нейтрофилов со знаком “-”, что, согласно теории Укловой и Гаркави, позволяет назвать его фактором неспецифической адаптационной фазы организма.

Фактор $F3$, в который вошли содержание гемоглобина и эритроцитов со знаком “-” и высокими коэффициентами корреляции ($r=0,85$ и $r=0,74$), может быть обозначен как фактор постнагрузочной гиперволемии. Он обусловлен тем, что при интенсивной мышечной деятельности в периферическое кровяное русло поступает большой объем жидкости из тканей. Кровь, по сути, разбавляется, свидетельством чему является тенденция к уменьшению указанных выше показателей красной крови.

Относительно фактора $F4$ отмечаем, что его вклад в общую дисперсию составляет 10%. Влияние данного фактора на спортивную деятельность обусловлено преимущественно увеличением уровня сывороточного тестостерона. Это фактор специфической адаптации к напряженной мышечной деятельности. Как

известно, у нетренированных людей снижается содержание тестостерона при физических нагрузках. Возрастание концентрации гормона у высококвалифицированных атлетов ($r=0,86$) мы связываем с высокой степенью тренированности и достаточным функциональным потенциалом организма.

Что касается результатов индивидуального факторного анализа, то здесь дополнительно были выделены фактор эффективной реципрокной регуляции показателей белой крови, фактор превалирующего катаболизма и другие [1, 2].

Также были выявлены основные статистические факторы в процессе тренировок высококвалифицированных спортсменов на основе анализа ЭКГ. Анализировались ЭКГ спортсменов различных видов спорта на разных этапах тренировочного процесса. Исследовались ЭКГ пловцов, велосипедистов и гребцов в разной степени готовности к соревнованиям.

Была построена корреляционная матрица и выявлены наиболее значимые коэффициенты корреляции между различными показателями ЭКГ. ЧСС, в частности имеет заметную отрицательную корреляцию с такими показателями, как QTф, QTБ и QTф-QТ, и положительную корреляцию с ПДП.

Была исследована динамика показателей ЭКГ. Следует отметить, что даже на протяжении коротких отрезков времени имеются значительные перепады многих показателей. В частности, на рис. 1 показана динамика TVЗ гребца Б. в течение месяца.

Амплитуда зубца T в ответвлении $VЗ$ равно как и отношение R к T в $VЗ$ считаются одними из наиболее информативных отражений метаболических процессов в организме.

Проведенный факторный анализ ЭКГ показал, что наиболее значимый фактор $F1$, по-видимому отражает напряжение симпатического отдела вегета-

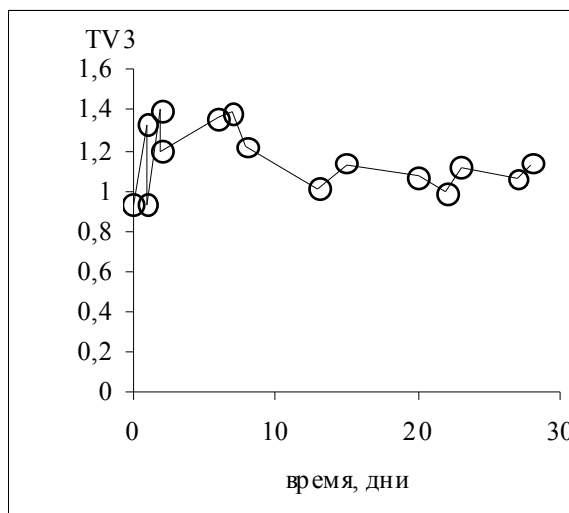


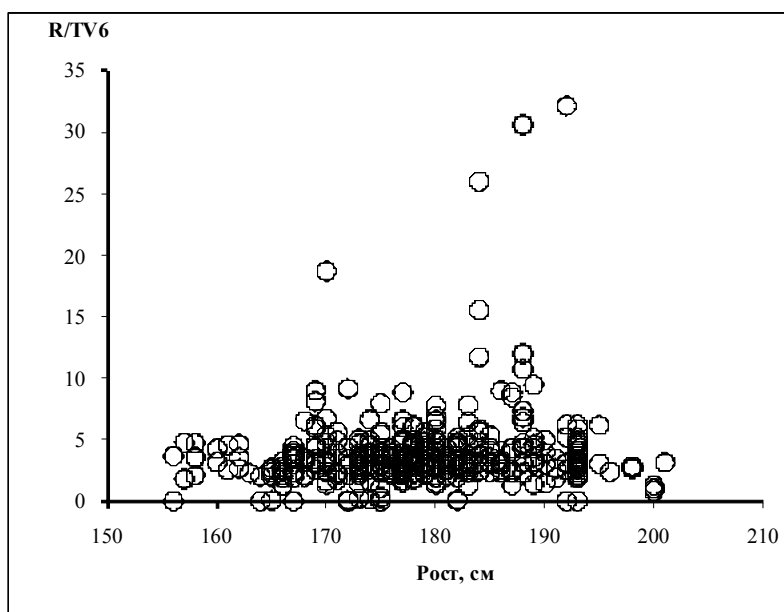
Рис. 1. Динамика TVЗ.

тивной нервной системы и таким образом подтверждена высокая значимость симпатического отдела вегетативной нервной системы, его влияние на продолжительность интервала QT .

Фактор $F2$ - метаболический, включает в себя амплитуду зубца T и отношение R к T в $V3$ и $V4$. При этом, согласно полученным данным, у избранного контингента лиц наиболее информативным является отношение R к T в ответвлении $V4$.

Кроме этого, у спортсменов, специализирующихся в гребле и плавании при дифференцированном анализе их ЭКГ дополнительно с более высоким удельным весом, чем фактор метаболизма, выделился фактор соответствия антропометрических и реполяризационных характеристик: у лиц с меньшей длиной тела и площадью поверхности тела значительно снижены амплитуда зубца T в ответвлениях $V3$ и $V4$ [3, 4].

Были корреляционно сопоставлены антропометрические данные с данными ЭКГ. Между некоторыми данными обнаружены высокие коэффициенты корреляции. В частности, рост спортсменов коррелировал с отношением R к T в ответвлении $V6$ (рис. 2).



Также анализу подвергнуты 32 показателя вариационной пульсометрии при многократном обследовании 193 спортсменов высокой квалификации.

Согласно результатам проведенного анализа у избранного контингента обследуемых в общей выборке выделяются 3 наиболее значимых фактора – $F1$, $F2$ и $F3$ (таблица 3). Наиболее высок удельный вес фактора $F1$, отражающего напряжение симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС).

При этом установлено, что из комплекса многочисленных показателей, анализируемых в рамках данной компьютерной программы вариационной пульсометрии, наиболее информативны в плане отражения тонуса симпатического отдела вегетативной нервной системы ЧСС, СКО RR (среднее квадратическое отклонение), колеблемость RR .

В этом перечне ЧСС является стандартной и очень важной характеристикой состояния спортсмена, его готовности к соревнованиям.

Среднее квадратическое отклонение RR -интервалов (SDNN или СКО) один из основных показателей variability сердечного ритма. Он является интегральным параметром и зависит от различных нейрогуморальных влияний на синусовый узел. Значения СКО выражаются в миллисекундах (мс). Нормальные значения СКО находятся в пределах 40-80 мс. Однако эти значения имеют воз-

Таблица 3. Показатели вариационной пульсометрии спортсменов.

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
ЧСС	0,729	-0,501	-0,408
ПДП	0,630	-0,448	-0,489
МО	-0,658	0,530	0,446
$RR\ max$	-0,909	0,193	0,170
$RR\ min$	0,018	0,699	0,513
Размах	-0,874	-0,263	-0,165
СКО	-0,561	-0,289	-0,061
Дисперсия	-0,734	-0,551	0,086
Вариация	-0,723	-0,600	-0,195
Мода	-0,502	0,669	0,408
коэф. Монотонности	0,822	-0,102	0,097
Инд. Напряж	0,790	-0,178	0,003
Мощн. быстрых волн	-0,750	-0,054	-0,416
Мощн. быстрых волн (норм)	-0,170	0,556	-0,567
Мощн. медл. волн 2	-0,745	-0,431	-0,092
МВ1/БВ	-0,134	-0,526	0,680
(МВ1+МВ2)/БВ	-0,106	-0,568	0,707
Триангулярный индекс	0,834	-0,013	0,126
Ширина базовой линии	0,833	-0,016	0,125
СКО для разностей RR	-0,888	-0,151	-0,192
$pRR50$	-0,768	0,405	-0,224
Вес фактора	0,342	0,152	0,113

растно-половые особенности, которые должны учитываться при оценке результатов исследования.

Рост или уменьшение показателя могут быть связаны как с автономным контуром регуляции, так и с центральным. Уменьшение СКО связано с усилением симпатической регуляции; при значительном его снижении вероятно напряжение регуляторных систем и подавление активности автономного контура. Резкое снижение СКО обусловлено значительным напряжением регуляторных систем, когда в процесс регуляции включаются высшие уровни управления, что ведет к почти полному подавлению активности автономного контура.

Колеблемость RR , является разностью между R_{max} и R_{min} . Чем меньше колеблемость RR , тем выше тонус симпатического отдела вегетативной нервной системы.

Вторым по величине удельного веса выделился фактор $F2$, отражающий напряжение парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. Его основными критериями, судя по полученным данным, являются показатели RR минимальное и мода. Фактор $F2$, определяет R_{min} . С увеличением влияния фактора $F2$ R_{min} увеличивается.

Третий фактор $F3$, судя по входящим в него компонентам ($MB1/BB$; $(MB1+MB2)/BB$), отражает соотношение тонуса симпатического и парасимпатического отделов автономной нервной системы.

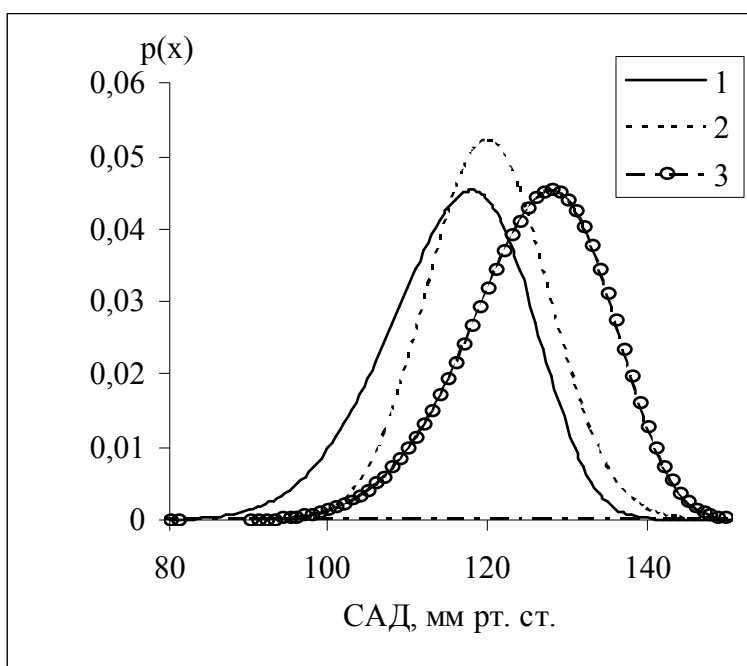


Рис. 3. Распределение плотности вероятности САД спортсменов: 1 – велосипедистов, 2 – пловцов, 3 – гребцов.

Кроме того, были исследованы данные артериального давления у спортсменов.

На рис. 3 показаны распределения плотности вероятности систолического артериального давления (САД) для спортсменов, специализирующихся в различных видах спорта. И хотя распределения заметно перекрываются, можно определенным образом сказать, что, в частности, для гребцов мода распределения сдвинута в сторону больших чисел. Это указывает на тенденцию некоторого увеличения давления при занятиях греблей. Наибольшим эксцессом из данных распределений обладает распределение пловцов. Вполне возможно, что у спортсменов, специализирующихся в плавании, происходит отбор по признаку достаточно узкого интервала САД. Следует отметить, что распределения плотности вероятности диастолического артериального давления (ДАД) для указанных видов спорта практически не отличались.

Исследование распределений частоты сердечных сокращений в покое (ЧСС) показало, что наибольшей модой обладает распределение пловцов, несколько меньшая мода у распределения велосипедистов, а наименьшая - у распределения гребцов.

Дисперсия отражает мощность всех периодических и непериодических колебаний, асимметрия позволяет судить о стационарности исследуемого динамического ряда, о наличии и выраженности переходных процессов, эксцесс отражает скорость изменения случайных нестационарных компонентов динамического ряда и отражает наличие локальных нестационарностей [5, 6].

Состав крови, данные ЭКГ и вариационной пульсометрии высококвалифицированных спортсменов таким образом может служить показателем эффективности тренировочного процесса спортсменов, что дает возможность прогнозирования качества подготовки спортсменов.

Библиографический список

1. Арцыбашева О.М., Холявко Ю.А., Онищук С.А. Морфологический состав крови в системе прогнозирования эффективности тренировочного процесса высококвалифицированных пловцов. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.119-121.
2. Нетребич Д.М., Холявко Ю.А., Онищук С.А. Биохимический состав крови в системе прогнозирования эффективности тренировочного процесса высококвалифицированных пловцов. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.135-138.
3. Лужанина О.Э., Юрьев С.Ю., Бушуева Т.В., Онищук С.А. Вольтажно-временные характеристики ЭКГ у спортсменов. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.132-134.
4. Сабокарь А.М., Юрьев С.Ю., Бушуева Т.В., Онищук С.А. Статистический анализ ЭКГ спортсменов. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.145-148.
5. Арутюнян Т.В., Бушуева Т.В., Онищук С.А. Статистический анализ гемодинамических показателей. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.116-118.
6. Пантюхин И.И., Бушуева Т.В., Онищук С.А. Базовые гемодинамические показатели у спортсменов. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Краснодар, 2012. С.138-141.

ОЦЕНКА АНТИРАДИКАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ВОДЫ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДЕЙТЕРИЯ С ПОМОЩЬЮ ЯМР, ЭПР И МАСС-СПЕКТРОСКОПИИ

Барышев М.Г.¹, Басов А.А.², Болотин С.Н.¹, Джимаков С.С.¹, Федосов С.Р.²,
Шашков Д.И.¹, Козин С.В.¹, Касаткина Д.Д.¹, Дацун С.Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет»,
г. Краснодар, Россия, ул. Ставропольская, 149, 350040

²ФГБОУ ВПО Кубанский государственный медицинский университет Мин-
здравсоцразвития, г. Краснодар, России, ул. Седина, 4, 350063

E-mail: jimack@mail.ru

Введение.

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) широко применяется к решению ряда медико-биологических задач [1-3], он также является основным методом для изучения парамагнитных частиц присутствующих в биологических системах. Парамагнитными частицами, имеющими важное биологическое значение, являются свободные радикалы. Они принимают активное участие в регуляции многих внутриклеточных процессов [4], включая иммунные механизмы, обезвреживание ксенобиотиков, апоптоз, метаболизм биологически активных соединений. Одним из перспективных пищевых веществ для коррекции антиоксидантного потенциала организма является вода с модифицированным изотопным составом (ВМИС), например, вода с пониженным содержанием дейтерия [5].

Замена обычной воды на тяжелую приводит к уменьшению электропроводности растворов электролитов в основном из-за увеличения вязкости и, следовательно, уменьшения подвижности ионов. Тяжелая вода в основном влияет на активные свойства возбудимой мембраны. Присутствие дейтерия в биологических системах приводит к изменениям структуры и свойствам ДНК и белков. При 30% замене обычной воды на тяжелую у микроорганизмов останавливают-

ся жизненные процессы, млекопитающие (например, лабораторные крысы) – умирают [6].

В плазме крови человека и животных содержание дейтерия немного превышает его содержание в питьевой воде и составляет в зависимости от региона проживания 140-160 ppm. Вода с модифицированным изотопным составом с пониженным содержанием дейтерия (ВМИС ССД) предположительно позволяет проводить профилактику и коррекцию окислительного стресса и соответственно контролировать образование свободных радикалов в организме [7].

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния количественного содержания дейтерия в плазме крови и органах лабораторных животных на интенсивность свободнорадикального окисления методами ЯМР, ЭПР и масс-спектрометрии в физиологических условиях и при воспалительных процессах.

Одним из наиболее удобных методов для измерения дейтериевого состава плазмы крови является ЯМР спектроскопия [8]. Однако, этот метод не позволяет измерить содержание дейтерия в тканях органов лабораторных животных. Эта задача была решена при помощи изотопного масс-спектрометра.

Экспериментальная часть.

Измерение спектров ЭПР проводили при комнатной температуре на спектрометре JES Fa 300 (JEOL, Япония) в X-диапазоне. Условия измерения: СВЧ мощность 1 мВт, частота микроволнового излучения 9144 МГц, амплитуда высокочастотной модуляции 0,1 мТл. Образцы подвергали лиофильной сушке, измеряли в кварцевой ампуле (5 мм), масса навески в зоне резонатора составляла 0,0300 г. Концентрацию парамагнитных центров в образцах определяли путем сравнения с сигналом стандартного образца (TEMPO). Интегральную интенсивность сигнала ЭПР в исследуемых образцах определяли путем двойного численного интегрирования [9].

Воду с пониженным содержанием дейтерия получали на установке, разработанной в Кубанском государственном университете [10]. Исходная концентрация дейтерия в получаемой воде составляла 40 ppm.

Определение концентрации дейтерия в биологических жидкостях были проведены на импульсном ЯМР спектрометре JEOL JNM-ECA 400MHz. Съёмка спектров проводилась на соответствующей резонансной частоте ядер дейтерия – 61.4 МГц. Параметры съёмки: 6.7 с (acquisition time), 20 с (relaxation delay), 5.6 мкс (x-pulse), 0.15 Гц (resolution). Температура съёмки – 25 °С, при этом точность стабилизации 0.2 °С. Измерения проводились с использованием 5 мм ампулы, внутри которой был строго зафиксирован запаенный капилляр, содержащий откалиброванную в определяемой концентрационной шкале смесь дейтерированного и недеитерированного диметилсульфоксида (DMSO), дающего ^2D ЯМР сигнал в области 3,4 м.д. (относительно $(\text{CD}_3)_4\text{Si}$), в то время как ^2D ЯМР сигнал HDO находится в области 4,7 м.д. (относительно $(\text{CD}_3)_4\text{Si}$).

Обработка полученных спектров заключалась в определении соотношения интегральных интенсивностей ^2D ЯМР сигнала HDO, содержащейся в исследуемом образце относительно ^2D ЯМР сигнала DMSO- D_1 , интенсивность которого, в свою очередь, была определена при таких же условиях относительно стандартов – образцов воды с точно определённым содержанием дейтерия (3.7 ppm, 51 ppm, 150 ppm). Измерения каждого образца проводились неоднократно для уменьшения погрешностей эксперимента. При этом точность определения содержания дейтерия в плазме крови составила ± 1 ppm.

Для определения изотопного состава лиофилизированных органов лабораторных животных использовался масс-спектрометр DELTA^{plus} (Finnigan, Германия). Твёрдые образцы заворачивались в металлическую фольгу и помещались в камеру сгорания с помощью автоматического пробоотборника Carlo Erba AS 200-LS. Изменение изотопного состава выражали в промилле (‰; часть на тысячу) с использованием стандартного дельта-обозначения δ :

$$\delta = (R_{\text{пробы}}/R_{\text{станд.}} - 1) \times 1000 (\text{‰}), \quad (1)$$

где R – соотношение изотопов, $R_{\text{пробы}}$ и $R_{\text{станд.}}$ – соотношение D/H в исследуемой пробе и стандарте. Калибровка измерений в твердых образцах выполнялась относительно международного образца (IAEA-CN-7, $\delta D = -100,3\text{‰}$) и различных внутренних проверенных стандартов. Точность измерений составляла $\sim \pm 2\text{‰}$ для твердого вещества.

Для эксперимента использовали 3 группы крыс по 20 штук в каждой группе. Первая группа – контрольная, в которой крысы употребляли дистиллированную минерализованную воду. Во второй группе крысы употребляли дистиллированную минерализованную воду с содержанием дейтерия 40 ppm. В третьей группе крысы употребляли дистиллированную минерализованную воду с содержанием дейтерия 100 ppm. В течение 3 недель раз в неделю забивали двух крыс из каждой группы с целью определения содержания дейтерия в плазме крови. Через 3 недели с начала эксперимента вызывали окислительный стресс моделированием гнойной раны у крыс, при этом, использовали двухэтапную модель окислительного стресса [11]. Через 4 недели с начала эксперимента оставшихся крыс забивали, органы лиофилизировали, в лиофильной сушилке ЛС-1000 и определяли содержание парамагнитных центров на ЭПР спектрометре, а содержание дейтерия на масс-спектрометре.

Результаты и их обсуждение.

Спектры ЭПР лиофилизированных образцов сердца лабораторных животных приведены на рисунке 1 и содержат анизотропный синглетный сигнал, параметры спин-гамильтониана ($g_{\perp} = 2.0074$, $g_{\parallel} = 2.003$) которого соответствуют стабильным радикалам [12-14]. Спектры ЭПР образцов печени и почек имеют аналогичный характер.

У крыс, потреблявших воду с остаточным содержанием дейтерия 40 ppm, выраженный антиоксидантный эффект наблюдали уже в течение первой недели, в лиофилизированных органах (печени, почках, сердце) наблюдали сниже-

ние количества парамагнитных центров (по данным ЭПР) в исследуемых тканях примерно на 32-38% по сравнению с контрольной группой. Это свидетельствует об уменьшении количества свободных радикалов и подтверждает благоприятное воздействие легкой воды на организм животных. В то же время, у крыс, потреблявших воду с остаточным содержанием дейтерия 100 ppm, наблюдали менее выраженный антиоксидантный эффект: в лиофилизированных органах (печени, почках, сердце) наблюдали снижение количества парамагнитных центров (по данным ЭПР) в исследуемых тканях примерно на 24-27% по сравнению с контрольной группой.

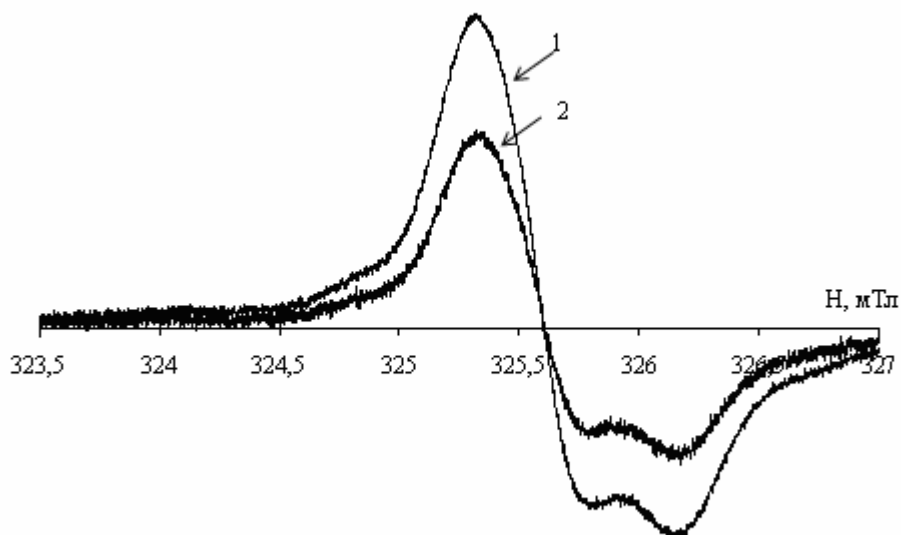


Рисунок 1 - Спектры ЭПР лиофилизированных тканей сердца лабораторных мышей контрольной (1) и опытной группы (2), употреблявшей ВМИС ССД 40 ppm, после 4 недель

Динамика изменения содержания дейтерия в плазме крови лабораторных животных при потреблении воды с остаточным содержанием дейтерия 40 и 100 ppm в ходе эксперимента представлена на рисунке 2.

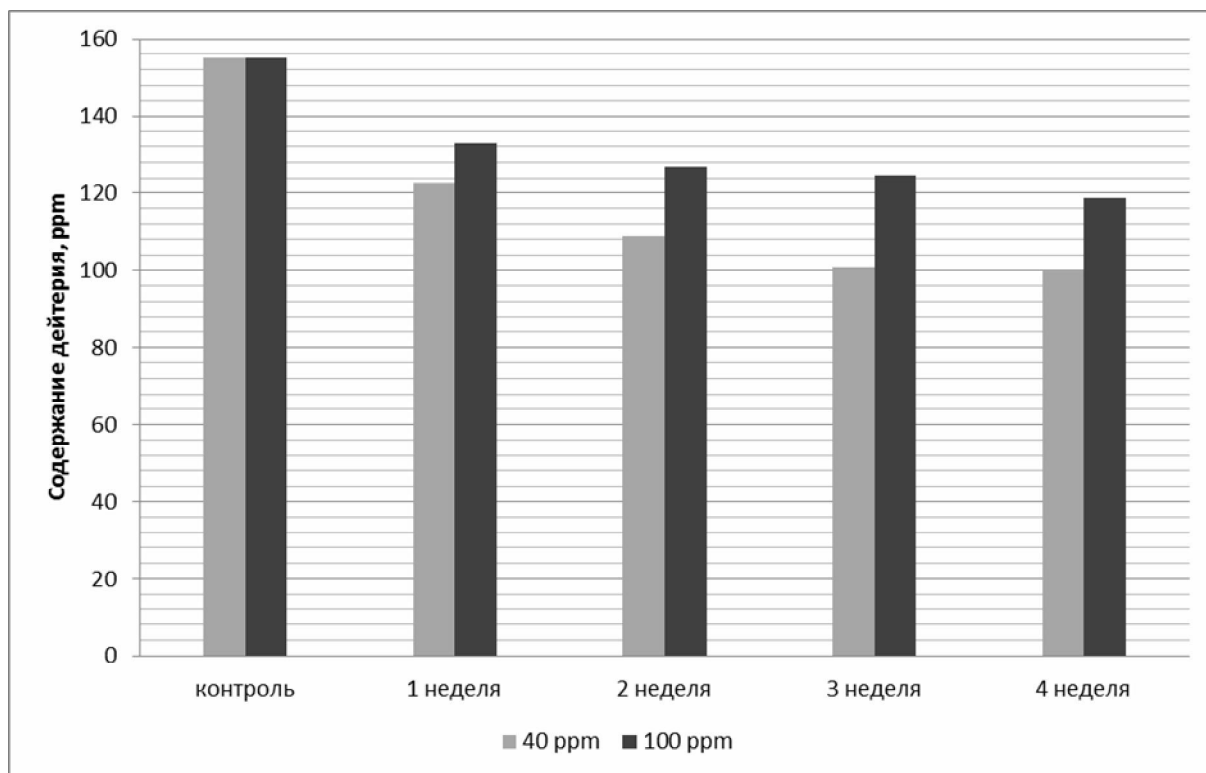


Рисунок - 2 Динамика изменения содержания дейтерия в плазме крови лабораторных животных

Как видно из рисунка, содержание дейтерия в плазме крови лабораторных животных по данным ЯМР спектроскопии постепенно снижается и выходит на плато после 3 недели употребления ВМИС ССД.

Содержание дейтерия в лиофилизированных тканях печени, почек и сердец лабораторных животных, употреблявших ВМИС ССД в течение месяца представлены на рисунке 3.

Из рисунков 2 и 3 видно, что при употреблении воды с более низкой концентрацией дейтерия, его концентрация снижается до более низкого уровня в плазме и тканях. Однако, и в случае употребления воды с концентрацией 100 ppm и 40 ppm наблюдали выход на плато концентрации дейтерия в плазме и органах через 3 недели после начала употребления ВМИС ССД.

Согласно данным ЭПР спектроскопии, вода с остаточным содержанием дейтерия 40 ppm обладает более быстрым развитием антиоксидантного эффекта

при развитии гнойно-воспалительных заболеваний у лабораторных животных. Это связано с резким повышением иммунитета, сопротивляемости организма.

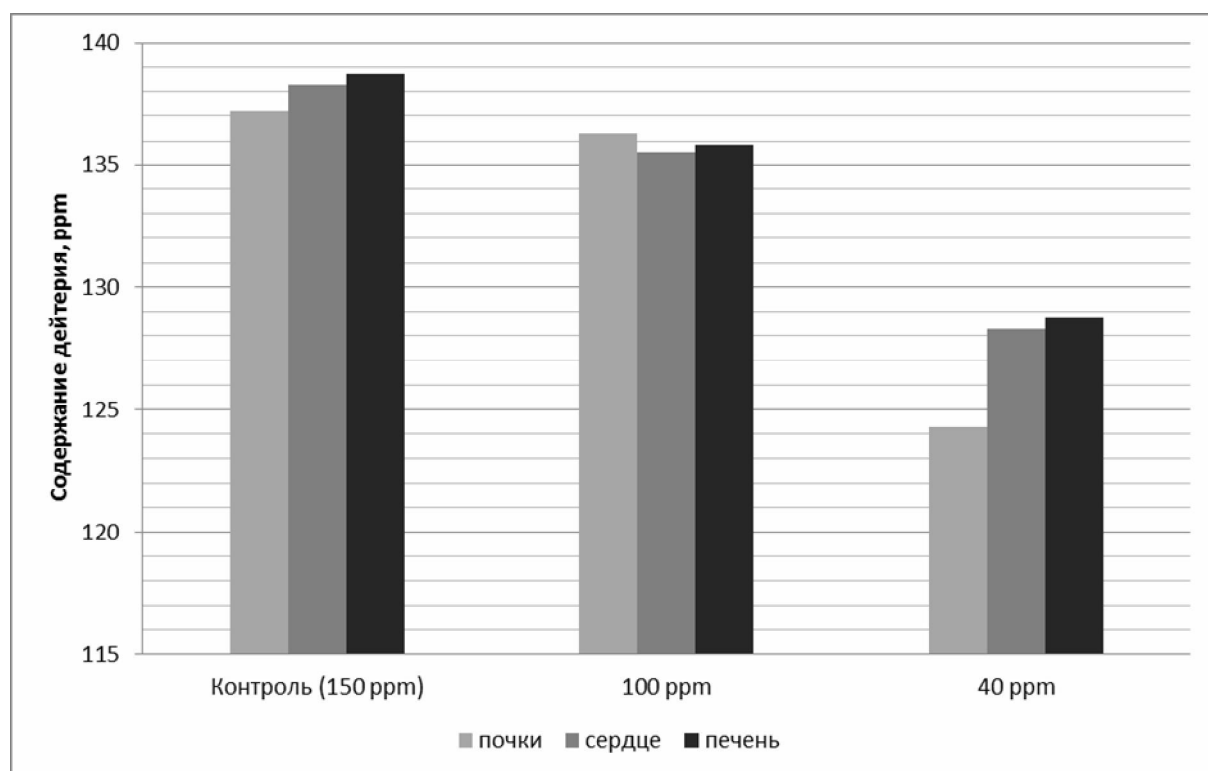


Рисунок - 3 Содержание дейтерия в лиофилизированных тканях по данным масс-спектро스코пии после 4 недель употребления ВМИС ССД

Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-04-96523-р_юг_ц), государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, проекты № 4.1755.2011, № 7.369.2011, № 4.849.2011.

Библиографический список

1. *Ингрэм Д.* Электронный парамагнитный резонанс в биологии. М.: Мир, 1972.
2. *Ажипа Я.И.* Медико-биологические аспекты применения метода электронного парамагнитного резонанса. М.: Наука, 1983.

3. Саприн А.Н. и др. Кинетика изменения концентрации СР при развитии экспериментальных злокачественных образований. В кн.: Актуальные вопросы современной онкологии. М.: Изд-во МГУ, 1970.
4. Владимиров Ю.А. // Биохимия. 2004. Т.69. Вып. 1.
5. Olariu L. et. al. // Lucrări Stiințifice Medicină Veterinară. 2007. Vol. XL.
6. Лобышев В.Н., Калинин Л.П. Изотопные эффекты D₂O в биологических системах. М.: Наука, 1978.
7. Olariu L. et. al. Lucrări științifice medicină veterinară vol. XLIII (2). 2010.
8. Барышев М.Г. и др. // Экологический Вестник научных центров ЧЭС. Вып. 3. 2011.
9. Бахвалов Н.С. и др. Численные методы. М.: Физматлит. 2001.
10. Барышев М. Г. и др. // Наука Кубани. №3. 2010.
11. Заявка № 2011100352/14 (000483) МПК G01N33/48 от 11.01.2011. «Способ хирургического моделирования окислительного стресса у лабораторных животных». Басов А.А. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 30.01.2012
12. Современные методы биофизических исследований. / под ред. А.Б. Рубина. М.: Высшая школа, 1988.
13. Боровик Е.С. и др. Лекции по магнетизму. М.: Физматлит, 2005.
14. Пулатова М.К. и др. Электронный парамагнитный резонанс в молекулярной радиобиологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В НЕРВНОМ ВОЛОКНЕ

Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Понетаева Е.Г.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

Нормальное функционирование организма невозможно без обмена информацией между его подсистемами. Один из способов передачи информации – распространение электрического импульса в нервном волокне. Электрическая природа нервного импульса доказана в работах Ходжкина, Хаксли с сотрудниками [1 – 3].

Моделирование биоэлектрических явлений широко используется в современной электрофизиологии для исследования процессов, протекающих в живых электровозбудимых структурах [4 – 7]. В работах [8 – 11] разработана солитонная модель изменения трансмембранного потенциала нервного волокна при распространении по нему возбуждения. Точное аналитическое решение задачи распространения нервного импульса в рамках модели Ходжкина-Хаксли на основе интегрального преобразования Лапласа и теоремы Эфроса, когда входной импульс возбуждения отклоняется от ступенчатой функции Хевисайда, получено в [12].

Результаты моделирования в целом согласуются с экспериментальными данными. Для решения прикладных задач, например, биопротезирования, необходимо решение более общей задачи: анализ изменения сигналов произвольной формы в нервном волокне. Целью данной работы является моделирование и анализ изменения электрического сигнала в нервном волокне, когда входной импульс возбуждения имеет произвольную форму.

1. Анализ механизмов распространения сигналов в нервном волокне

При возбуждении нервных клеток между внутриклеточной средой и окружающим раствором возникает изменение мембранного потенциала, перемещающееся в процессе распространения нервного сигнала, называемое потенциалом действия.

В миелинизированных нервных волокнах потенциал действия генерируется в перехватах Ранвье, и распространяется от одного перехвата к другому через участки волокна, покрытые изолирующей миелиновой оболочкой. Прохождение импульсов в миелинизированном волокне происходит дискретно (сальтаторно).

В безмиелиновых нервных волокнах, имеющих равномерное распределение потенциалзависимых ионных каналов по всей длине волокна, происходит генерация потенциала действия на каждом участке волокна электрическим сигналом от соседних участков. Распространение сигнала обусловлено электрическим током, который генерируется при изменении проницаемости мембраны, так что распространение тока происходит непрерывно.

Распространение потенциала действия по нервному волокну включает следующие этапы (рис. 1):

- возбуждение волокна в точке $x = 0$ (область 1) приводит к деполяризации нервной мембраны, в результате внутриклеточный потенциал увеличивается по сравнению с потенциалом покоя на величину V ($V = V_0$ при $x = 0$);
- разность потенциалов между участком в области возбуждения и соседним невозбужденным участком (область 2) создает в аксоплазме электрический ток плотностью i_a ;
- в результате снижается потенциал на мембране на величину V , зависящую от x (область 3);
- если деполяризация V в точке x (область 4) превышает порог возбуждения V_c , то произойдет возбуждение мембраны в этом месте и т. д.

Из уравнения конденсатора следует

$$j_C = C_m \frac{\partial V}{\partial t}, \quad (3)$$

где C_m – емкость единицы площади мембраны. Плотность тока через мембрану равна сумме омической и емкостной составляющей:

$$j_m = j_R + j_C = \frac{V}{\rho_m l} + C_m \frac{\partial V}{\partial t}. \quad (4)$$

Сила тока в аксоплазме I_a в точке x убывает, т.к. часть тока, ответвляясь, проходит через мембрану: $-d_x I_a = j_m \cdot 2\pi r dx$, поэтому

$$j_m = -\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial I_a}{\partial x}. \quad (5)$$

Падение напряжения на участке dx , сила тока в аксоплазме I_a и сопротивление аксоплазмы dR_a на этом участке связаны законом Ома:

$$-\frac{\partial_x V}{\partial x} dx = I_a dR_a, \quad dR_a = \rho_a \frac{dx}{\pi r^2}, \quad (6)$$

где ρ_a – удельное сопротивление аксоплазмы, πr^2 – площадь сечения. Из (6) следует

$$I_a = -\frac{\pi r^2}{\rho_a} \frac{\partial V}{\partial x}. \quad (7)$$

Подставим I_a из (7) в уравнение (5):

$$j_m = \frac{r}{2\rho_a} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Из уравнений (4), (8) следует уравнение для изменения электрического потенциала в аксоне

$$\frac{r}{2\rho_a} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - C_m \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{\rho_m l} = 0. \quad (9)$$

Параметрами электрической модели аксона являются ρ_m – удельное сопротивление вещества мембраны, l – толщина мембраны, r – радиус аксона, C_m – емкость единицы площади мембраны, ρ_a – удельное сопротивление аксоплазмы.

Найдем решение уравнения (9) при $x \in [0, \infty)$, $t \in [0, \infty)$ удовлетворяющее граничным условиям:

$$V(x, t)|_{x=0} = V_0(t) \quad (V_0(t) = 0 \text{ при } t < 0), \quad (10)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} V(x, t) = 0. \quad (11)$$

На функцию $V_0(t)$ наложим условие интегрируемости:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |V_0(t)| dt = \text{const}. \quad (12)$$

Обозначим

$$\lambda = \sqrt{\frac{rl\rho_m}{2\rho_a}}, \quad \tau = l\rho_m C_m \quad (13)$$

λ – константа длины нервного волокна, τ – константа затухания сигнала, тогда уравнение (9) принимает вид

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \tau \frac{\partial V}{\partial t} - V = 0. \quad (14)$$

Введем безразмерные переменные:

$$x' = \frac{x}{\lambda}, \quad t' = \frac{t}{\tau}, \quad V' = \frac{V}{v_0}, \quad (15)$$

где v_0 – константа размерности. В безразмерных переменных уравнение (14) имеет вид

$$\frac{\partial^2 V'}{\partial x'^2} - \frac{\partial V'}{\partial t'} - V' = 0. \quad (16)$$

Представим решение уравнения (16) в виде интеграла Фурье

$$V'(x', t') = \int_{-\infty}^{\infty} U(v') e^{\alpha(v')x'} e^{2\pi i v' t'} dv', \quad (17)$$

где $U(v')$ – Фурье образ функции $V'_0(t')$, удовлетворяющей условию (12):

$$U(v') = \int_{-\infty}^{\infty} V'_0(t') e^{-2\pi i v' t'} dt'. \quad (18)$$

Из уравнений (16), (17) следует характеристическое уравнение

$$\alpha^2(v') - 2\pi i v' - 1 = 0. \quad (19)$$

$\alpha(v')$ – комплексная функция:

$$\alpha(v') = \operatorname{Re} \alpha(v') + i \operatorname{Im} \alpha(v'). \quad (20)$$

Учитывая условие (11), из уравнения (19) находим мнимую часть $\alpha(v')$

$$\operatorname{Im} \alpha(v') = \begin{cases} -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1+(2\pi v')^2} - 1}, & v' \geq 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1+(2\pi v')^2} - 1}, & v' < 0 \end{cases} \quad (21)$$

и действительную часть $\alpha(v')$

$$\operatorname{Re} \alpha(v') = \frac{\pi v'}{\operatorname{Im} \alpha(v')}. \quad (22)$$

Из (21), (22) следует, что $\operatorname{Im} \alpha(v')$ – нечетная функция v' , а $\operatorname{Re} \alpha(v')$ – четная функция v' . Подставив (20 – 22) в (17) получим решение уравнения (16) при $x' \geq 0$ для входного импульса возбуждения $V'_0(t')$ произвольной формы.

Пусть $V'_0(t') = \delta(t')$, где $\delta(t')$ – δ -функция Дирака. Обозначим соответствующее решение уравнения (16) $h(x', t')$. Из (18) получим $U(v') \equiv 1$, тогда

$$h(x', t') = \begin{cases} 2 \int_0^{\infty} e^{x' \operatorname{Re} \alpha(v')} \cos(x' \operatorname{Im} \alpha(v') + 2\pi v' t') dv', & t' \geq 0 \\ 0, & t' < 0 \end{cases}. \quad (23)$$

Из теоремы Планшереля следует, что для входного импульса возбуждения $V'_0(t')$ произвольной формы

$$V'(x', t') = \int_{-\infty}^{\infty} V'_0(t'') h(x', t' - t'') dt''. \quad (24)$$

На рис.2 – рис. 5 показано изменение функции $h(x', t')$ при различных значениях аргументов. Вид сигнала в сечениях $x' = \text{const}$ представлен на рис.2, рис. 3, а распределение сигнала в аксоне в фиксированные моменты времени – на рис.4, рис. 5. Сигнал бесконечно малой длительности $h(0, t') = \delta(t')$, поступивший на вход аксона, в каждом, как, пространственном, так и временном се-

чении, имеет вид несимметричного импульса. Максимальное значение импульса уменьшается, а ширина увеличивается с ростом x' и t' .

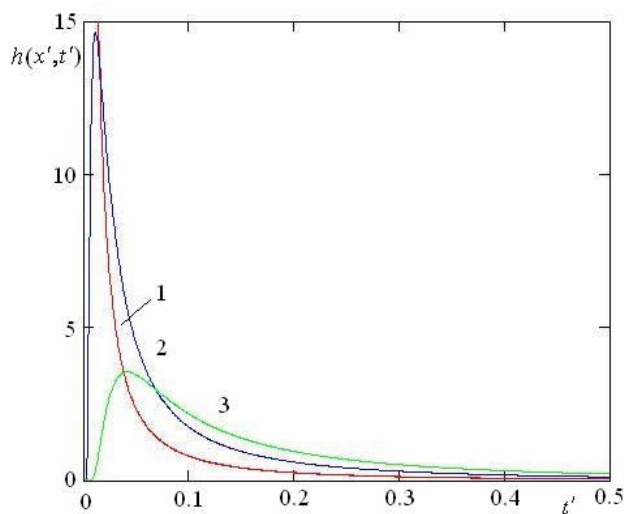


Рис. 2. Функция $h(x', t')$: $1 - x' = 0.1$,
 $2 - x' = 0.25$, $3 - x' = 0.5$

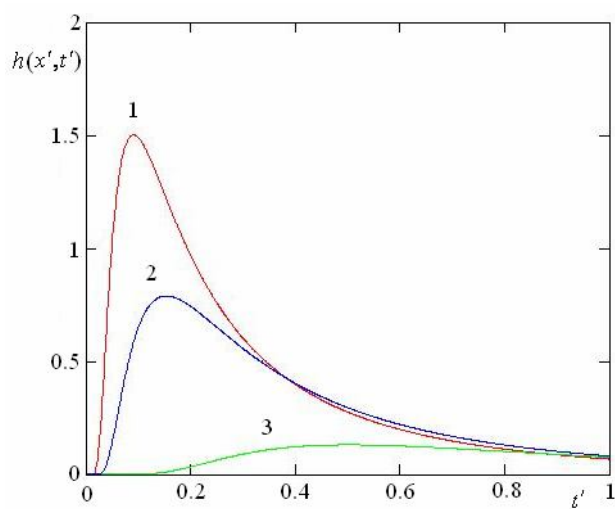


Рис. 3. Функция $h(x', t')$: $1 - x' = 0.75$,
 $2 - x' = 1$, $3 - x' = 2$

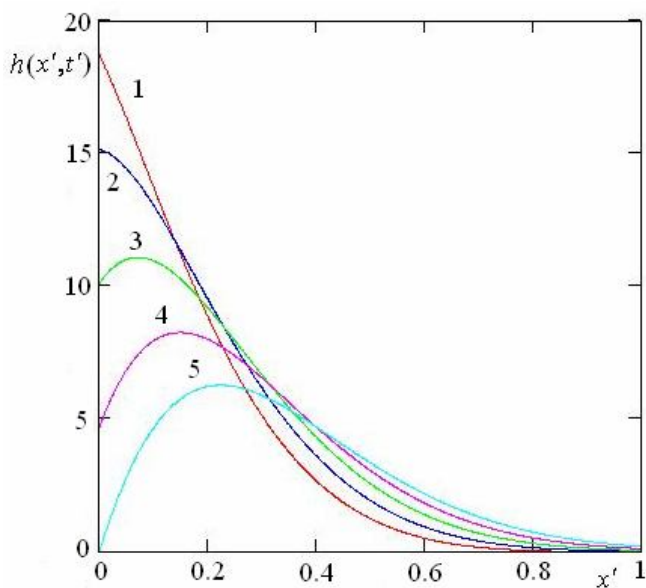


Рис. 4. Функция $h(x', t')$: $1 - t' = 0.01$,
 $2 - t' = 0.02$, $3 - t' = 0.03$, $4 - t' = 0.04$,
 $5 - t' = 0.05$

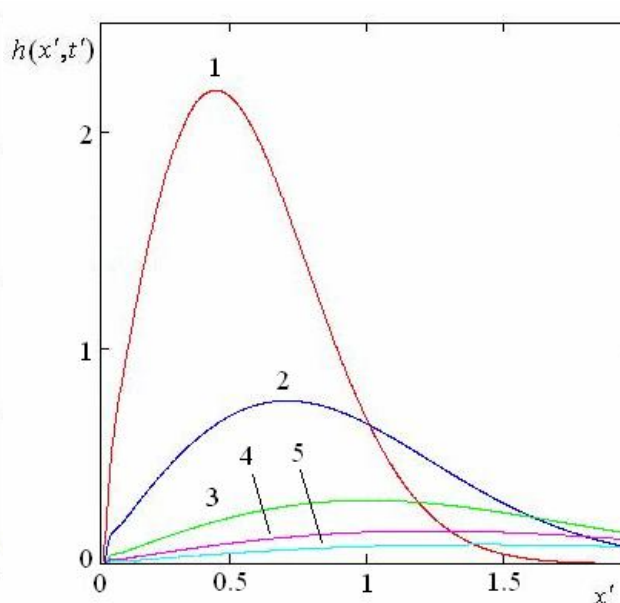


Рис. 5. Функция $h(x', t')$: $1 - t' = 0.1$,
 $2 - t' = 0.25$, $3 - t' = 0.5$, $4 - t' = 0.75$,
 $5 - t' = 1$

Если функция $U(v')$ такова, что вклад в (17) дают только малые частоты $v' \ll 1$, то

$$\operatorname{Im} \alpha(v') = -\pi v', \quad \operatorname{Re} \alpha(v') = -1, \quad (25)$$

$$V'(x', t') \approx e^{-x'} \int_{-\infty}^{\infty} U(v') e^{2\pi i v'(t' - x'/2)} dv'. \quad (26)$$

Из (26) следует, что в размерных переменных

$$V(x, t) \approx e^{-\frac{x}{\lambda}} V_0 \left(t - \frac{\tau x}{2\lambda} \right). \quad (27)$$

Таким образом, сигнал, содержащий только частоты с $v \ll 1/\tau$, является затухающим (λ – константа затухания) и распространяется с фазовой скоростью

$$v = \frac{2\lambda}{\tau} = \frac{1}{C_m} \sqrt{\frac{2r}{l\rho_m\rho_a}}. \quad (28)$$

Увеличение ширины и асимметрии импульсного сигнала в процессе распространения по аксону обусловлено суперпозицией частот с $v \geq 1/\tau$.

Если функция $U(v')$ такова, что вклад в интеграл (17) дают только частоты $v' \gg 1$, то

$$\operatorname{Im} \alpha(v') \approx \begin{cases} -\sqrt{\pi |v'|}, & v' \geq 0 \\ \sqrt{\pi |v'|}, & v' < 0 \end{cases}, \quad \operatorname{Re} \alpha(v') \approx -\sqrt{\pi |v'|}, \quad (29)$$

$$V'(x', t') \approx \int_{-\infty}^{\infty} U(v') e^{-\sqrt{\pi |v'|} x'} e^{2\pi i v' \left(t' - \frac{x'}{2\sqrt{\pi |v'|}} \right)} dv'. \quad (30)$$

Скорость распространения нервного импульса v – один из важных физиологических показателей. Величина ρ_a зависит от электролитного состава протоплазмы, который примерно одинаков у различных видов животных, и, следовательно, не позволяет существенно изменить v . Повышение скорости v за счет увеличения радиуса нервного волокна r характерно для головоногих моллюсков.

У позвоночных участки нервного волокна покрыты изолирующей миелиновой оболочкой. Миелин содержит много холестерина и мало белка, поэтому

его удельное ρ_m сопротивление выше удельного сопротивления других биологических мембран. Толщина миелиновой оболочки l в сотни раз превышает толщину обычной клеточной мембраны. Это обеспечивает большое значение λ . Если расстояние между перехватами Ранвье L меньше λ , то $V(L, t) \geq V_c$ при $t \ll \tau$. В результате достигается высокая скорость сальтаторного распространения сигнала в миелиновых нервных волокнах.

2. Радиотехническая модель распространения сигнала в нервном волокне

Распространение сигнала в нервном волокне имеет аналогию с радиотехнической цепью (рис. 6). Перенос носителей заряда через мембрану и вдоль аксона описывается RC-цепочками, а перехват Ранвье моделируется блоком восстановления сигнала. Изменение сигнала на каждом из отрезков радиотехнической цепи рассчитано в системе схемотехнического моделирования MicroCap, результаты в точках 1, 2, 3, 4, отмеченных на рис. 6, показаны на рис. 7 – рис. 10. В расчетах использовались следующие значения параметров: $R_1 = R_2 = R_3 = 1.4$ кОм, $R_4 = 14$ кОм, $C_1 = C_2 = C_3 = 7.5$ нФ.

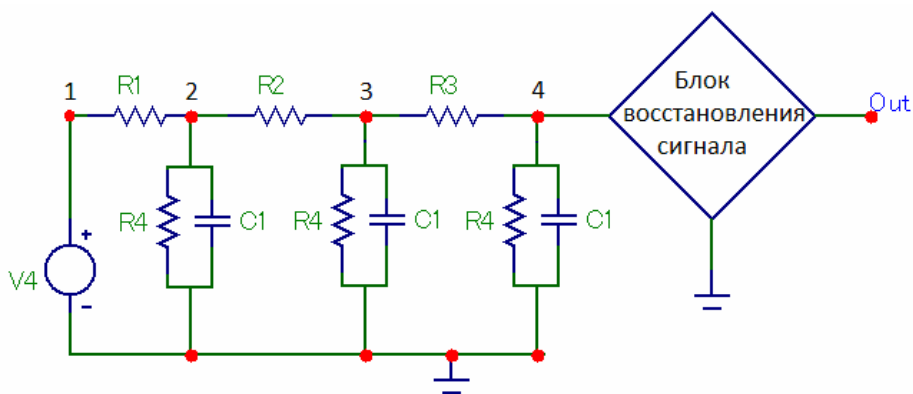


Рис. 6. Радиотехническая модель нервного волокна

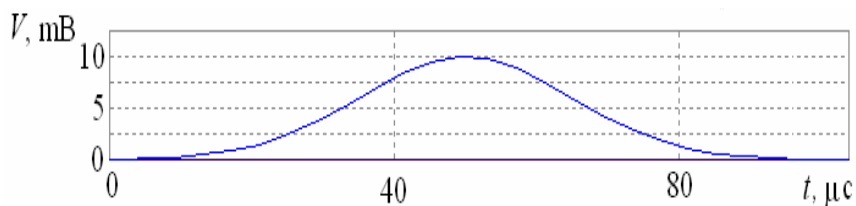


Рис. 7. Исходный сигнал (точка 1)

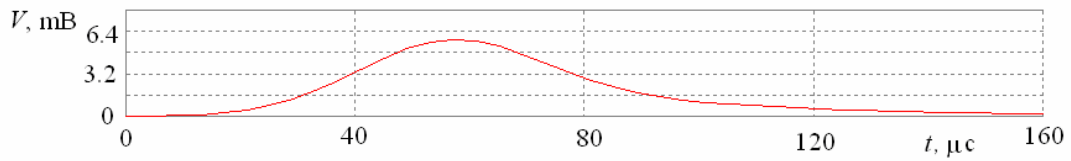


Рис. 8. Сигнал после прохождения первой RC-цепочки (точка 2)

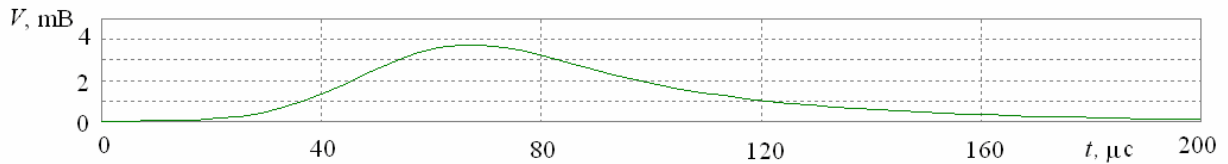


Рис. 9. Сигнал, прошедший две RC-цепочки (точка 3)

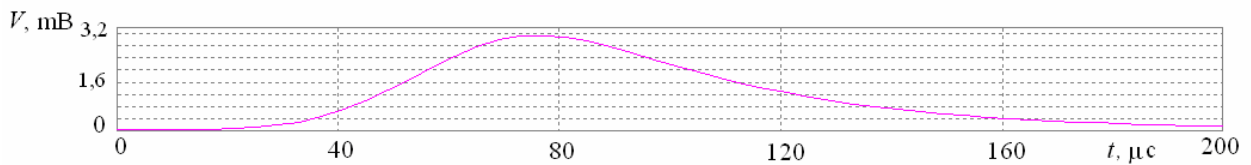


Рис. 10. Сигнал после трёх RC-цепочек (точка 4)

После прохождения каждой RC-цепочки максимальное значение импульса уменьшается, ширина увеличивается, возрастает асимметрия сигнала (рис. 8 – рис. 10). В точке Out сигнал восстанавливает исходную форму (рис. 7). Изменение сигнала оценивалось параметрами A , a , σ_1 , σ_2 , показанными на рис. 11. Рассчитанные значения этих параметров приведены в таблице.

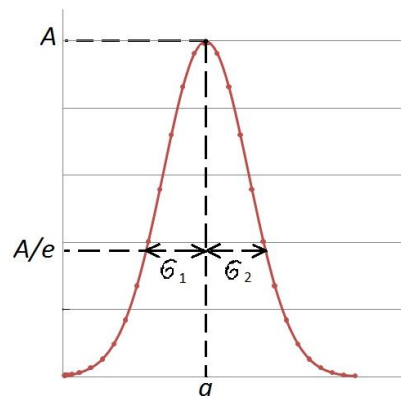


Рис. 11. Схема определения параметров изменения сигнала

Параметры изменения сигнала

точка схемы	A , мВ	a , мкс	σ_1 , мкс	σ_2 , мкс	$\sigma_1 + \sigma_2$, мкс	σ_2/σ_1
1	10	49,1	16	16	32	1
2	5,8	57,1	22	28	50	1,3
3	3,8	65,1	27	43	70	1,6
4	3,1	77,1	29	48	77	1,7

Изменение параметра A характеризует уменьшение максимального значения импульса. Величина $\sigma_1 + \sigma_2$ изменяется в соответствии с увеличением ширины сигнала. Возрастание асимметрии характеризуется увеличением отношения σ_2/σ_1 .

Заключение

Распространение сигнала в нервном волокне без учета генерации потенциала действия промоделировано двумя способами: 1 – на основе решения уравнения, описывающего изменение электрического потенциала в аксоне, 2 – с помощью радиотехнической модели распространения сигнала в нервном волокне. Характерными закономерностями являются уменьшение максимального значения импульса, увеличение ширины и асимметрии сигнала.

Сигнал, содержащий только низкочастотные составляющие, $\nu \ll 1/\tau$, сохраняет свою форму в каждом координатном сечении, уменьшаясь по амплитуде. Увеличение ширины и асимметрии импульсного сигнала в процессе распространения обусловлено суперпозицией частот с $\nu \geq 1/\tau$.

Библиографический список

1. Hodgkin A. L., Rushton W. A. H. The electrical constants of a crustacean nerve fibre // Proc. Roy. Soc. London. 1946. Ser B. V. 133. P. 444-479.

2. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J. Physiol. (London). 1952. V. 117. N4. P. 500-544.
3. Ходжкин А. Нервный импульс. М.: Мир, 1965. 128 с.
4. Frankenhaeuser B., Huxley A. The action potential in the myelinated nerve fibre of *Xenopus Laevis* as computed on the basis of voltage clamp data // J. Physiol. 1964. N2. P. 302-315.
5. Фомин С. В., Беркинблит М. Б. Математические проблемы в биологии. М.: Наука, 1973. 200 с.
6. Abbott L. F., Kepler T. B. Model neurons: from Hodgkin-Huxley to Hopfield // Statistical Mechanics of Neural Networks, L. Garrido, ed., no. 368 in Lecture notes in Physics, Springer-Verlag, 1990. P. 5-18.
7. Dominique Debanne. Information processing in the axon // Nature Reviews Neuroscience. 2004. V.5. N4. P. 304-316.
8. Максименко Е.В. Аналитическая модель нервного импульса // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2003. Т. 10. Вып.3. С. 696-697.
9. Максименко Е.В. Использование уравнения Кортевега- де Фриза для моделирования трансмембранного потенциала в нервном волокне // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета, серия «Естественнонаучная». 2004. №1(7). С. 234-235.
10. Максименко Е.В. Моделирование распространения нервного импульса с использованием ЭВМ // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2004. Т. 11. Вып.2. С.368-369.
11. Максименко Е.В. Об использовании математических методов в биологических исследованиях // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2005. Т. 12. Вып. 2. С. 431-432.
12. Селезов И.Т., Морозова Л.В. Обобщение задачи возбуждения и распространения потенциала действия по нервному волокну // Прикладна гідромеханіка. 2010. Т. 12. N. 3. С. 75-83.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦВЕТОВОЙ ПАЛИТРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Сеницын А.С.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

Томография – метод послойного исследования (томог– сечение) (урафос – пишу) внутренней структуры различных объектов. В настоящее время это один из наиболее совершенных и эффективных методов. Информативность и достоверность результатов томографических исследований зависят от физических принципов, технической реализации метода и условий окружающей среды. Наибольшее распространение получили рентгеновская, электронно-лучевая, магнитно-резонансная, позитронно-эмиссионная, ультразвуковая, оптическая когерентная томография [1 – 4]. Магнитно-резонансная томография (МРТ) применяется в основном для медицинских исследований, она обеспечивает большую разрешающую способность и контрастность изображений мягких тканей.

Целью работы является создание компьютерной программы, позволяющей повысить качество обработки изображений магнитно-резонансной томографии за счет преобразования цветовой палитры представления информации.

Программные средства обработки изображений магнитно-резонансного томографа

Программное обеспечение, используемое в практике медицинской МР-томографии, можно разделить на два основных класса:

1. Автоматизированное рабочее место (АРМ) врача (оператора),
2. Специализированное ПО анализа и обработки изображений.

Автоматизированные рабочие места выполняют следующие функции:

- Создание и ведение единой базы электронных медицинских карт, диагностических протоколов обследования пациентов и медицинских изображений и данных;
- Работа с базой данных, регистрация пациентов, поиск в базе данных, формирование и отправка листа назначений;
- Хранение в базе данных на каждого пациента необходимого количества медицинских изображений (в том числе DICOM-стандарта), что обеспечивает возможность наблюдения состояния пациента в течение длительного времени за счет сравнения изображений, снятых в разное время;
- Функциональные исследования различных патологий и заболеваний на основе медицинских изображений;
- Различная обработка медицинских изображений, в том числе: изменение контрастности, изменение масштаба (увеличение и уменьшение), линейные и объемные измерения, фильтрация, исследования изображений в режиме "кино", межкадровая обработка, 2D- и 3D-демореконструкция и др.
- Быстрый поиск необходимой информации по различным критериям и их группам (Ф.И.О., диагнозу, области исследования, возрасту и др.);
- Документирование результатов исследований в виде различных заключений и стандартизированных протоколов на печатающем устройстве с выдачей высококачественных твердых копий медицинских изображений различных размеров на лазерном принтере или DICOM-принтере;
- Ведение статистики и дистанционный сбор статистической информации, возможность получения различных статистических данных за требуемый промежуток времени (например, по количеству обследованных пациентов, органов, выявленных патологий, врачебная нагрузка, и др.);

- Дистанционные консультации (электронный консилиум) между диагностическими и лечебными кабинетами, а также с другими медицинскими центрами с использованием информации из базы данных;
- Оперативный просмотр требуемых данных диагностических исследований на рабочих станциях АРМ, установленных в других отделениях медицинского учреждения (например, терапевтическом и хирургическом).

Российские разработчики ПО выпустили ряд АРМ продуктов. Компания ООО «ТРИММ-МЕДИЦИНА» предложила аппаратно-программный комплекс автоматизированной обработки и протоколирования медицинских диагностических исследований «АрхиМед» (АПК «АрхиМед»), аппаратно сопряженный по аналоговому (видеоканал) или цифровому (DICOM 3.0) интерфейсу с рентгеновским или МР-диагностическим оборудованием. Коллектив научной группы МГУ разработал комплексы аппаратно-программные для ввода, обработки и хранения диагностической информации "Гамма Мультивокс", предназначенные для автоматизации работы службы лучевой диагностики медицинских учреждений в целом и/или отдельных кабинетов и подразделений при профилактических и диагностических обследованиях, проведении углубленных и научных исследований, планировании хирургических вмешательств и пр. Компания Махаон Software создала программный пакет Махаон PACS, предназначенный для автоматизации работы диагностических кабинетов, работающих с медицинскими изображениями, полученными с помощью различных медицинских визуализирующих устройств (ультразвуковые аппараты, цифровые рентгеновские аппараты, рентгеновские компьютерные томографы, магнитно-резонансные томографы, позитронно-эмиссионные томографы и др.) способный сохранять и передавать изображения по стандарту DICOM. С помощью специального модуля осуществляется аналогово-цифровое преобразование изображений, не соответствующих стандарту DICOM, и обеспечивается возможность работы с такими изображениями.

Немецкая фирма Carestream Health выпустила АРМ продукт Carestream PACS, предоставляющий возможности анализа изображений, используя систему PowerViewer, которая ускоряет текущий анализ изображений за счет предоставления функций автоматической регистрации и пространственного сопоставления результатов трехмерных обследований, полученных в разные моменты времени с различных модальных систем непосредственно в системе просмотра без загрузки других приложений. Возможность сопоставления объема в реальном времени для обследований, полученных методами компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии и позиционно-эмиссионной томографии, повышает производительность работы рентгенологов в комплексных маммографических и онкологических исследованиях.

Специализированного ПО, направленного на повышение качества и информативности медицинских МР-изображений, разработано значительно меньше. Компания НИУЛ «ИТСОМЗ» при Харьковском национальном университете радиоэлектроники в 2010 г. предложила «Программную систему обработки и анализа цифровых изображений для поддержки томографической и рентгенографической диагностики». Программный продукт представляет систему поддержки томографической и рентгеновской диагностики, которая позволяет загружать цифровые медицинские снимки, улучшать качество изображения, измерять различные характеристики органов, представленных на цифровых снимках, строить трехмерные модели по нескольким томографическим срезам, анализировать контуры и поверхности органов. Основное назначение системы – повышение эффективности процесса диагностики путем автоматизации анализа цифровых снимков.

Ученые Нижегородского государственного университета имени Н.И.Лобачевского создают программный комплекс "Виртуальный томограф", предназначенный для построения цветных 3D томографических изображений и их анализа. С помощью этого ПО можно будет рассматривать сосуды и ткани под любым углом и сечением, то есть визуализировать отдельную часть тела и

даже человека в полный рост. Программный комплекс находится в стадии разработки.

Специализированное ПО анализа и обработки томографических изображений, используемое в клиниках Европы и США, предназначено для мощных вычислительных комплексов и стоит очень дорого.

Таким образом, Российский рынок специализированного ПО, направленного на повышение качества и информативности диагностических медицинских изображений не заполнен.

Построение изображений магнитно-резонансной томографии в псевдоцветах

Системы отображения информации магнитно-резонансных томографов выполняют обработку изображений в псевдоцветах. В этом случае задача состоит в присвоении цветов некоторым значениям интенсивности монохромного сигнала или некоторым диапазонам изменения его интенсивности [5, 6]. Как правило, МРТ-изображение получается монохромным (рис. 1).

Для монохромных изображений единственной характеристикой цвета является яркость (уровень серого), отражающая величину сигнала, принимающая значения в диапазоне от черного до белого, с промежуточными серыми оттенками.

Использование цвета в обработке МРТ-изображений имеет следующие преимущества:

1 – цвет является тем важным признаком, который часто облегчает распознавание и выделение объекта на изображении; 2 – человек в состоянии различать тысячи различных оттенков цвета, и всего лишь порядка двух десятков оттенков серого. Последнее обстоятельство особенно важно при

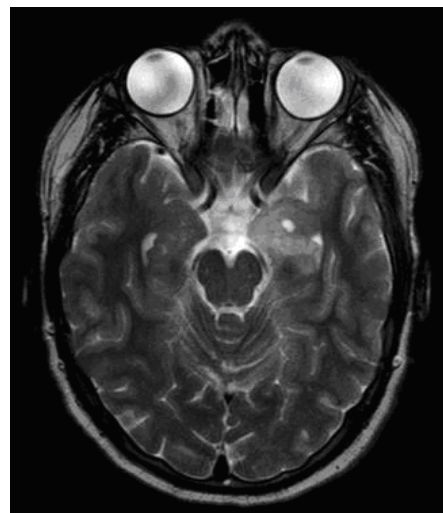


Рис. 1. Исходный томографический снимок

визуальном, выполняемом непосредственно врачом, анализе медицинских диагностических МРТ-изображений.

Рецепторы глаза (колбочки), отвечающие за восприятие цветов, могут быть разделены по их восприимчивости к спектральному составу света на три основные группы, которые приблизительно соответствуют чувствительности к красному, зеленому и синему цветам. Вследствие этого человеческий глаз воспринимает цвета как различные сочетания так называемых первичных основных цветов: красного (R), зеленого (G) и синего (B). Первичные основные цвета могут складываться, что дает вторичные основные цвета: пурпурный (красный плюс синий), голубой (зеленый плюс синий) и желтый (красный плюс зеленый). Смешение трех первичных основных цветов, или вторичного основного цвета и противоположного ему первичного, в правильных пропорциях дает белый цвет.

Для цветных мониторов и широкого класса цветных видеокамер наиболее часто используется на практике аппаратно-ориентированная цветовая модель RGB. В RGB модели каждый цвет представляется тремя компонентами (первичными основными цветами): красным, зеленым и синим. В основе модели лежит декартова система координат. Цветовое пространство представляет собой куб. Точки, отвечающие красному, зеленому и синему цветам, расположены в трех вершинах куба, лежащих на координатных осях. Голубой, пурпурный и желтый цвета расположены в трех других вершинах куба. Черный цвет находится в начале координат, а белый – в наиболее удаленной от начала координат вершине. Оттенки серого цвета (точки с равными RGB значениями) лежат на диагонали, соединяющей черную и белую вершины. Различные цвета в этой модели представляют собой точки на поверхности или внутри куба и определяются вектором, проведенным в данную точку из начала координат. Для удобства все значения R, G, B нормируют так, чтобы куб был единичным.

Число битов, используемых для представления каждого пикселя в RGB пространстве, называется глубиной цвета. В наиболее распространенных циф-

ровых устройствах отображения информации каждая из компонент R, G, B является 8-битовой. В этом случае каждый триплет значений (R, G, B), т.е. цветной RGB пиксель, имеет глубину цвета 24 бита. Для такого изображения используется термин полноцветное изображение. Суммарное число всевозможных цветов в 24-битовом RGB изображении составляет $(2^8)^3 = 16777216$.

В монохромном цветовом представлении, пример которого показан на рис. 1, для каждого пикселя значения $R=G=B$. Если каждая из компонент R, G, B является 8-битовой, то возможны не более 256 градаций значений серого. Человеческий глаз различает значительно меньшее число градаций.

Таким образом, задача повышения качества и информативности МРТ-изображения заключается в существенном увеличении числа различимых глазом пикселей изображения. Это достигается путем отображения значений интенсивности монохромного сигнала I в цветовое пространство куба, построенного на осях R, G, B. Это отображение описывается тремя функциями:

$$I_R=F_R(I), I_G=F_G(I), I_B=F_B(I). \quad (1)$$

Математическая задача создания цветовой палитры изображения заключается в определении вида функций $F_R(I)$, $F_G(I)$, $F_B(I)$.

Компьютерная программа преобразования цветовой палитры изображений магнитно-резонансной томографии

Методы преобразования цветовой палитры и алгоритмы обработки сигналов МРТ-изображений реализованы в программе «Анализатор томограмм». Программа создана в среде программирования C++ Builder.

Результаты обработки МРТ-изображения, приведенного на рис. 1, продемонстрированы на рис. 2, рис. 3. На рис. 2 цветовая палитра создана с помощью функций $F_R(I)$, $F_G(I)$, $F_B(I)$:

$$F_R(I) = 1/(1 + 4 \cdot ((I - cr)/dd)^2), \quad (2)$$

$$F_G(I) = 1/(1 + 4 \cdot ((I - cg)/dd)^2), \quad (3)$$

$$F_B(I) = 1/(1 + 4 \cdot ((I - cb)/dd)^2), \quad (4)$$

где I – значения интенсивности монохромного сигнала, отображенные на отрезок $[0, 1]$, $cr = 1$, $dd = 2/3$, $cg = 0.5$, $cb = 0.25$. На рис. 3 цветовая палитра создана с помощью функций $F_R(I)$, $F_G(I)$, $F_B(I)$:

$$F_R(I) = 1 - 1/(1 + 4 \cdot ((I - cr)/dd)^2), \quad (5)$$

$$F_G(I) = 1 - 1/(1 + 4 \cdot ((I - cg)/dd)^2), \quad (6)$$

$$F_B(I) = 1 - 1/(1 + 4 \cdot ((I - cb)/dd)^2). \quad (7)$$

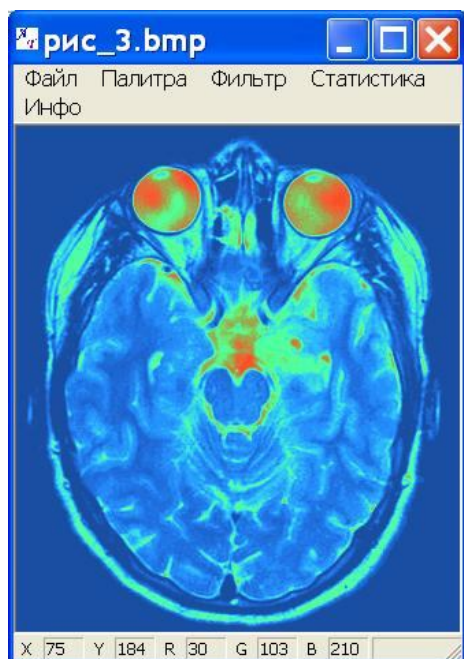


Рис. 2. МРТ-изображение после преобразования цветовой палитры по формулам (2 – 4)



Рис. 3. МРТ-изображение после преобразования цветовой палитры по формулам (5 – 7)

Рис. 2 построен с помощью трех первичных основных цветов: красного, зеленого и синего (палитра КЗС). Рис. 3 построен с помощью трех вторичных основных цветов пурпурного, голубого и желтого (палитра КЗС-негатив).

Сравнение изображения на рис. 1 с изображениями на рис. 2, рис. 3 показывает, что слабо различимые детали на рис. 1 достаточно хорошо выделены на рис. 2, рис. 3. Для лучшего визуального анализа целесообразно использовать различные цветовые палитры.

Таким образом, за счет преобразования цветовой палитры удалось повысить качество и информативность изображения магнитно-резонансной томо-

графии по сравнению с исходным изображением.

На рис. 4 – рис. 6 показаны окна программного комплекса «Анализатор томограмм». На статусной панели под томограммой (рис. 4) отображаются координаты положения курсора (X, Y) и условное значение сигнала T в этой точке изображения. Главное меню содержит команды Файл, Правка, Палитра. Команда Файл содержит команды Открыть, Сохранить как, Свойства, Очистить, Закрыть. Команда Правка содержит команды Вставить, Копировать, Восстановить; Команда Палитра содержит команды Серый, КЗС, Спектр, Радуга, Негатив. Для каждой палитры построены функции $F_R(I)$, $F_G(I)$, $F_B(I)$.

Под главным меню расположена панель быстрых кнопок, с помощью которых выполняются команды (в порядке с лева на право): 1 – Построить линию, 2 – Построить прямоугольник, 3 – Построить эллипс, 4 – Выбрать цвет линии построения, 5 – Удалить последнюю фигуру, 6 – Скопировать обработанное изображение в буфер обмена.

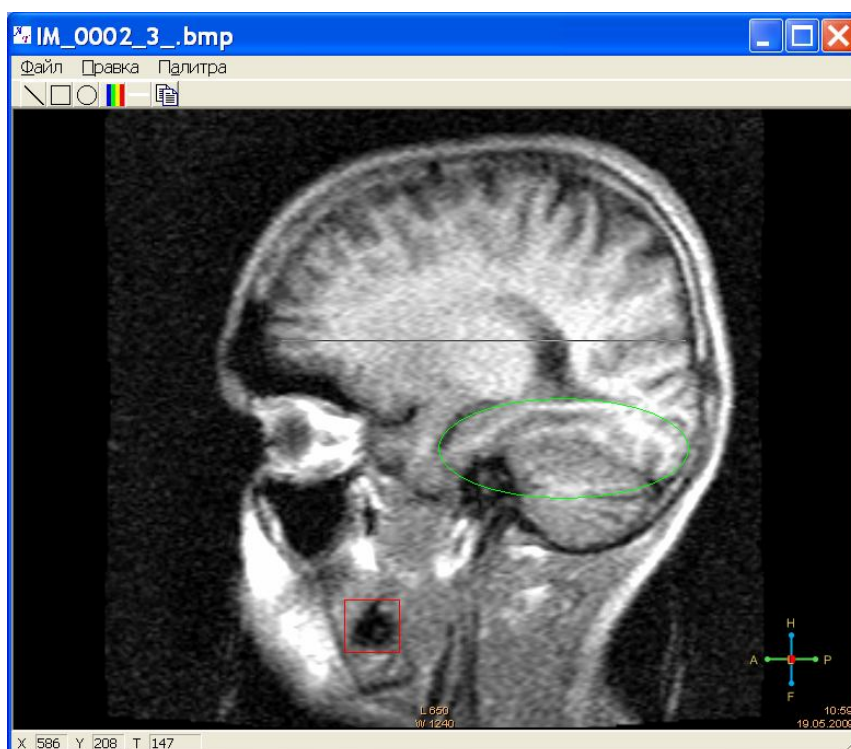


Рис. 4. Основное окно программного комплекса «Анализатор томограмм» с построенными линией, прямоугольником, эллипсом



Рис. 5. Распределение сигнала вдоль линии, показанной на рис. 4

фигура	X1	Y1	X2	Y2	S_L	СРЕДН	МИН	МАХ	СТ. ОТКЛ
линия	245	211	614	211	369	180.75	61.00	255.00	46.33
прямоугольник	302	448	353	497	2499	77.11	0.00	180.00	46.02
эллипс	388	264	617	356	16546.8	160.01	0.00	255.00	52.13

Рис. 6. Параметры фигур, показанных на рис. 4

Программа открывает и сохраняет файлы в стандартном формате *.bmp, копирует и вставляет изображения в стандартном формате буфера обмена. Это позволяет работать параллельно с любыми просмотрщиками медицинских изображений, независимо от аппаратной специфики их получения.

Распределение условных значений сигнала рассчитывается и выводится в отдельном окне (рис. 5) вдоль любой линии (рис. 4), построенной на томограмме. Для каждой построенной линии рассчитываются и выводятся в окне результатов (рис. 6) следующие параметры: координаты начальной и конечной точек, длина L линии, среднее, минимальное, максимальное и стандартное отклонение условных значений сигнала вдоль линии. Для прямоугольника и эллипса (рис. 4) вместо длины рассчитываются площадь S (рис. 6) и статистические параметры условных значений сигнала в области, ограниченной этими фигурами.

Таким образом, создан программный комплекс обработки данных медицинской томографии, позволяющий работать параллельно с любыми просмотрщиками медицинских изображений, независимо от аппаратной специфики их получения, использовать количественные характеристики различных частей изображения и проводить сравнение томограмм на основе этих характеристик.

Для повышения качества восприятия медицинских томограмм предлагается использовать различные палитры представления изображения. Томограмма на рис. 4 представлена в одноцветном сером представлении. В таком представлении получает томограммы врач для анализа. Однако на сером изображении врач может не заметить некоторые детали. Чтобы повысить разрешение томограммы, предлагаются цветные палитры. На рис. 7 – рис. 12 показана та же томограмма, что и на рис. 4, но в различных цветовых палитрах, разработанных при создании программного комплекса «Анализатор томограмм».

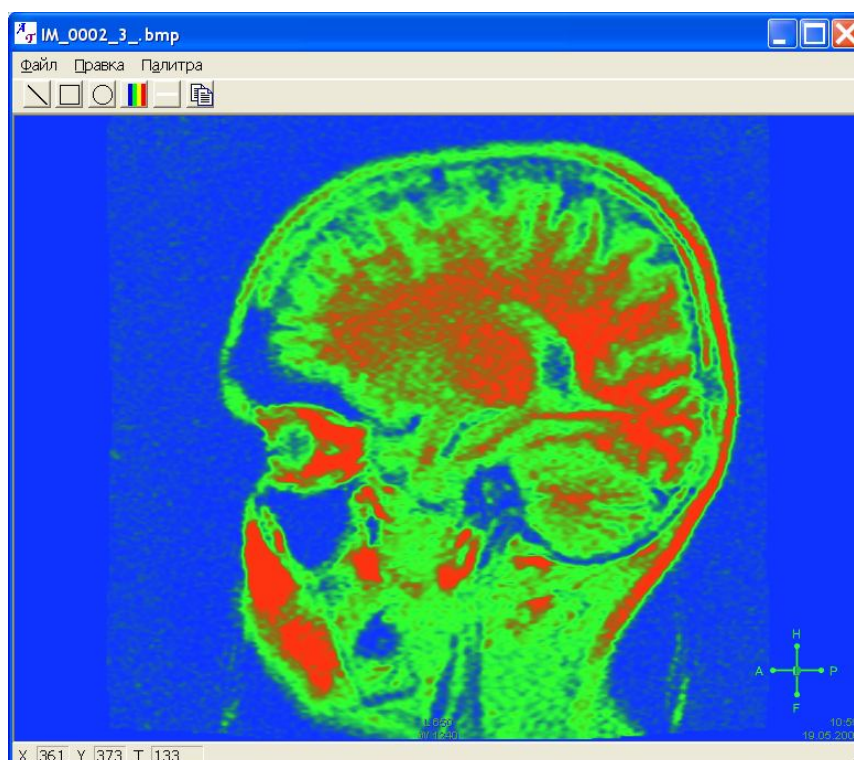


Рис. 7. Палитра красный-синий-зеленый (КЗС)

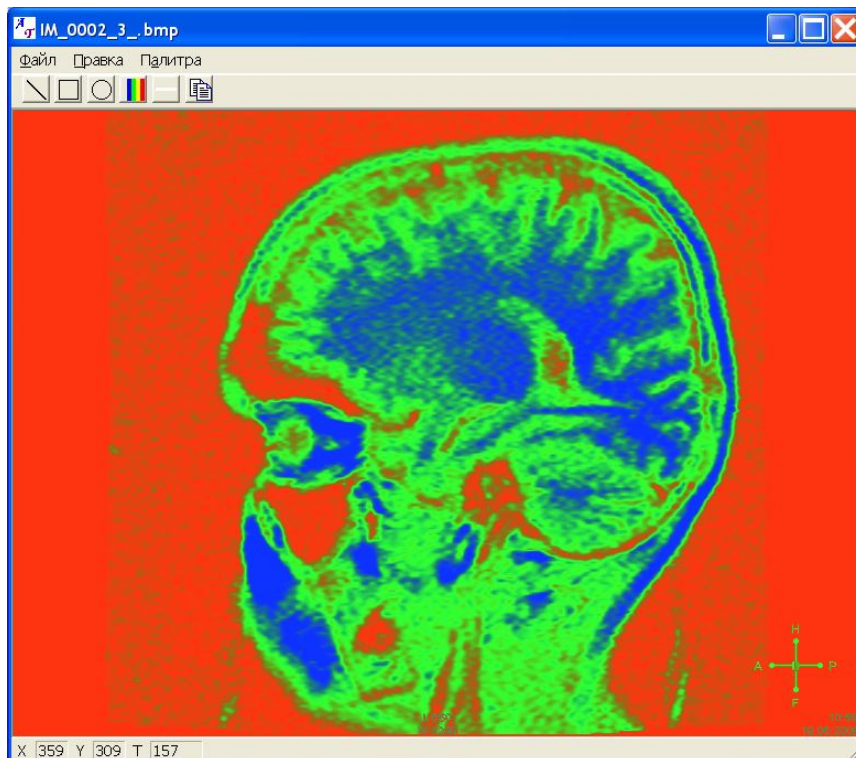


Рис. 8. Палитра КЗС – негатив

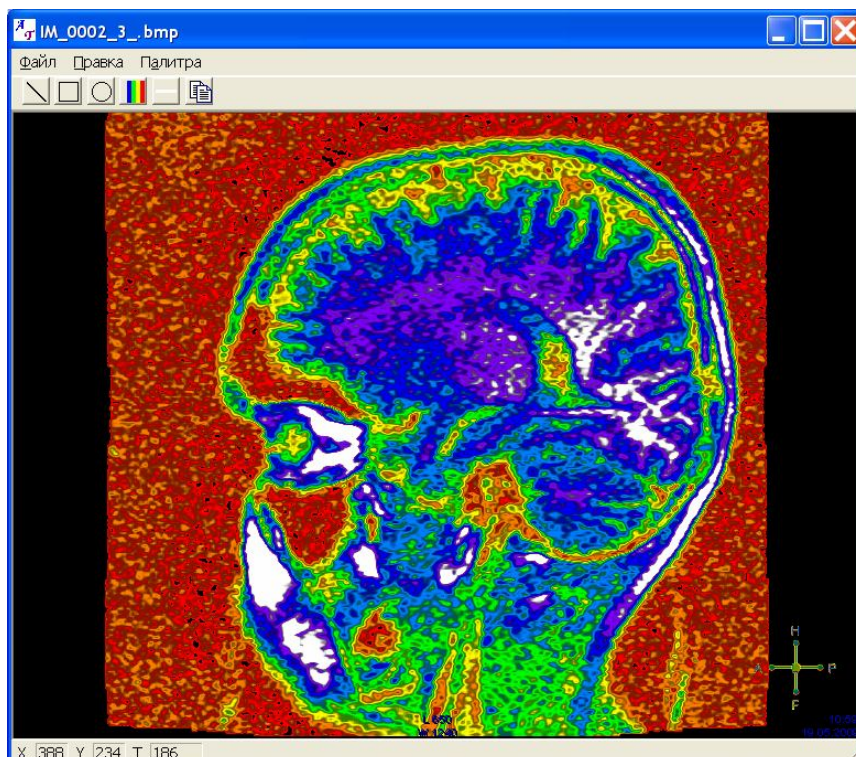


Рис. 9. Палитра спектр

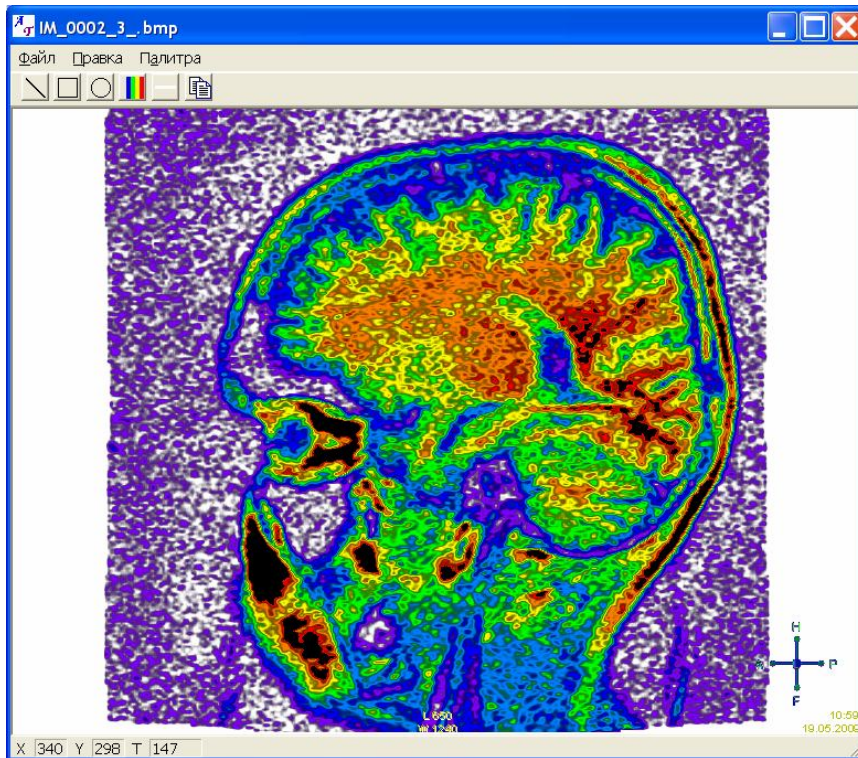


Рис. 10. Палитра спектр – негатив

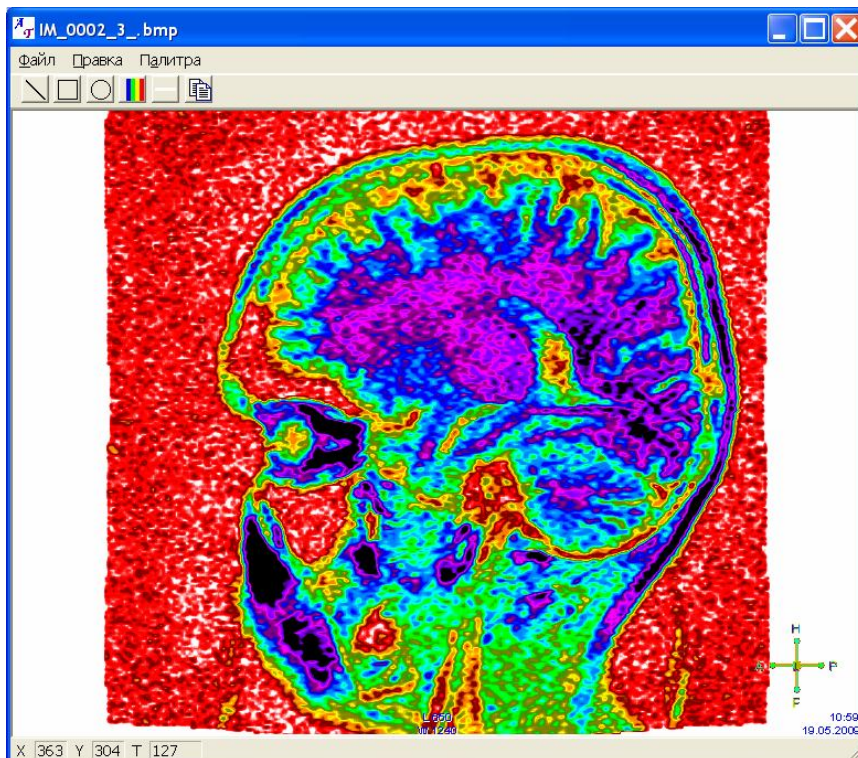


Рис. 11. Палитра радуга

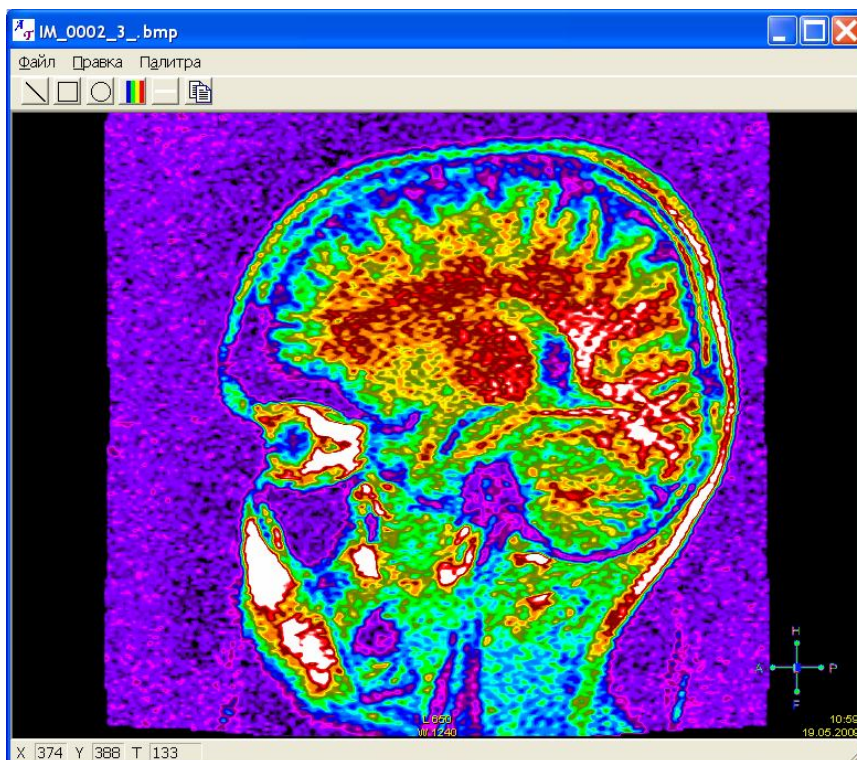


Рис. 12. Палитра радуга – негатив

Сравнение изображений на рис. 7 – рис. 12 показывает, что созданный программный продукт существенно повышает качество визуального восприятия томограмм. Использование различных палитр для одной томограммы позволяет визуально разрешить пространственные области, разница сигналов от которых близка к пределу чувствительности аппаратуры.

Заключение

Актуальной задачей создания программного обеспечения обработки данных магнитно-резонансной томографии является повышение качества и информативности изображений. Для ее решения проанализированы закономерности восприятия человеческим глазом информации магнитно-резонансных томографов в псевдоцветах. Получены формулы для создания различных цветowych палитр МРТ-изображений.

Разработана программа «Анализатор томограмм» для отображения и анализа данных магнитно-резонансной томографии. С ее помощью удалось дос-

тичь более высокого качества и информативности изображения магнитно-резонансной томографии по сравнению с исходным изображением.

Программа «Анализатор томограмм» позволяет работать параллельно с любыми просмотрщиками медицинских изображений, независимо от аппаратной специфики их получения, использовать количественные характеристики различных частей изображения и проводить сравнение томограмм на основе этих характеристик.

Созданный программный продукт существенно повышает качество визуального восприятия томограмм. Использование различных палитр для одной томограммы позволяет визуально разрешить пространственные области, разница сигналов от которых близка к пределу чувствительности аппаратуры.

Библиографический список

1. Физика визуализации изображений в медицине: В 2-х томах. Т.1. /Под ред. С.Уэбба. М.:Мир,1991. 408 с.
2. Физика визуализации изображений в медицине: В 2-х томах. Т.2. /Под ред. С.Уэбба. М.:Мир,1991. 408 с.
3. Кореневский Н.А., Попечителей Е.П., Серегин С.П. Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы. Курск: ОАО «ИПП «Курск», 2009. 986 с.
4. Марусина М.Я., Казначеева А.О., Современные виды томографии. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 152 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТООБОРОТ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТДЕЛА УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Дубина А.В.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Документы в наше время выступают как универсальный инструмент управления, обеспечивают взаимодействие между подразделениями и отдельными сотрудниками. При росте объемов деятельности работа с документами требует больше ресурсов и замедляет работу всей организации. Увеличение информационных потоков в науке, бизнесе, производстве, культуре требует адекватной реакции со стороны информационных технологий.

Один из способов решения проблемы – использование специального программного обеспечения – систем электронного документооборота (СЭД). Системы электронного документооборота обеспечивают строго регламентированное и формально контролируемое движение документов внутри и вне организации на основе информационных и коммуникационных технологий. Под управлением электронным документооборотом в общем случае принято понимать организацию движения документов между подразделениями предприятия, группами пользователей или пользователями. При этом под движением документов понимается не их физическое перемещение (т. к. они чаще всего остаются на сервере), а передачу прав на их использование с уведомлением конкретных пользователей и контролем за их исполнением. Главное назначение систем электронного документооборота – это организация хранения электронных документов, а также работы с ними (в частности, их поиска, как по атрибутам, так и по содержанию).

Проблема организации документооборота коснулась и службы медицинского оборудования (СМО) Государственного Бюджетного Учреждения «Детская Краевая клиническая больница» Департамента здравоохранения Краснодарского края (ГБУЗ «ДККБ» ДЗ КК). Ввиду того, что вышеобозначенное под-

разделение является ответственным за всю техническую документацию, а также акты, описывающие ввод в эксплуатацию, прием-передачу, выход из строя оборудования и другие документы, сопутствующие всем процессам использования медицинского оборудования в больнице, в архиве службы накапливается огромное количество важных бумаг, требующих классификации и сортировки, удовлетворяющих таким критериям как: быстрый доступ к информации, удобный поиск, быстрое формирование отчёта по любым критериям. Внедрение системы электронного документооборота увеличит эффективность работы, сократит затраты времени на регистрацию и обработку информации и повысит производительность труда.

Поэтому основными целями создания системы электронного документооборота являются: 1) Повышение эффективности исполнения рабочих процессов путем сокращения непроизводительных и дублирующих или выполняемых «вручную» операций, оптимизации информационного взаимодействия участников процессов; 2) Повышение качества планирования закупки оборудования и запчастей за счет оперативности представления, полноты, достоверности и удобства форматов отображения информации; 3) Снижение временных затрат при получении информации об оборудовании и манипуляций с ним.

В работе были поставлены следующие задачи: 1) Выбрать и обосновать программное обеспечение, при помощи которого создать эффективную базу данных всего медицинского оборудования ГБУЗ «ДККБ»; 2) Создать систему, обеспечивающую электронный документооборот в СМО; 3) Обозначить основные направления дальнейшей работы.

Для реорганизации базы данных использовалась программа Access из пакета Microsoft Office. Такой выбор обусловлен следующими причинами: 1) Программа входит в комплектацию пакета Microsoft, установленного на всех компьютерах СМО «ДККБ» (так же как и в других подразделениях больницы); 2) Access позволяет удобно хранить большой объем информации при помощи связанных между собой тематических таблиц; 3) Возможность самостоятельно

задавать категории формирования отчётов, наличие фильтрации информации, ввод данных с определённой маской или в настроенной форме.

В полученной базе данных введены 3 типа пользователей: Ведущий инженер, Инженер, Техник, функции которых представлены в таблице 1. Концептуальная модель системы представлена на рисунке 1. На основании концептуальной модели построена логическая модель данных (Рисунок 2). Атрибуты объектов данных представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Задачи пользователей

Пользователи	Комплекс задач
Ведущий инженер	1.1 добавление оборудования. 1.2 модификация данных оборудования. 1.3 добавление поставщиков оборудования. 1.4 модификация данных поставщиков оборудования. 1.5 добавление производителей оборудования. 1.6 модификация данных производителей оборудования. 1.7 добавление данных о материально ответственных лицах. 1.8 модификация данных о материально ответственных лицах. 1.9 добавление данных о программах закупки оборудования. 1.10 модификация данных о программах закупки оборудования. 1.11 добавление данных о типах финансирования 1.12 модификация данных о типах финансирования
Инженер	2.1 добавление данных о ремонте оборудования. 2.2 модификация данных о ремонте оборудования.
Техник	3.1 просмотр данных об оборудовании.

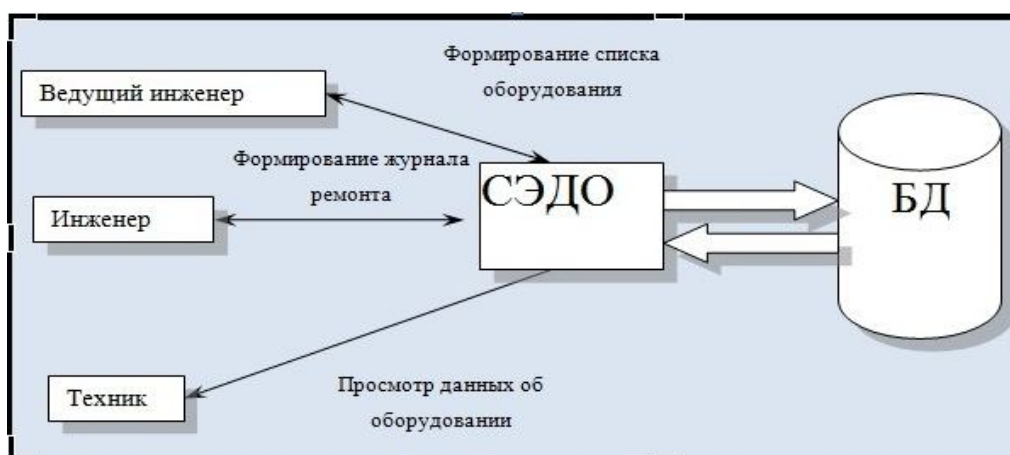


Рисунок 1 – Концептуальная модель системы

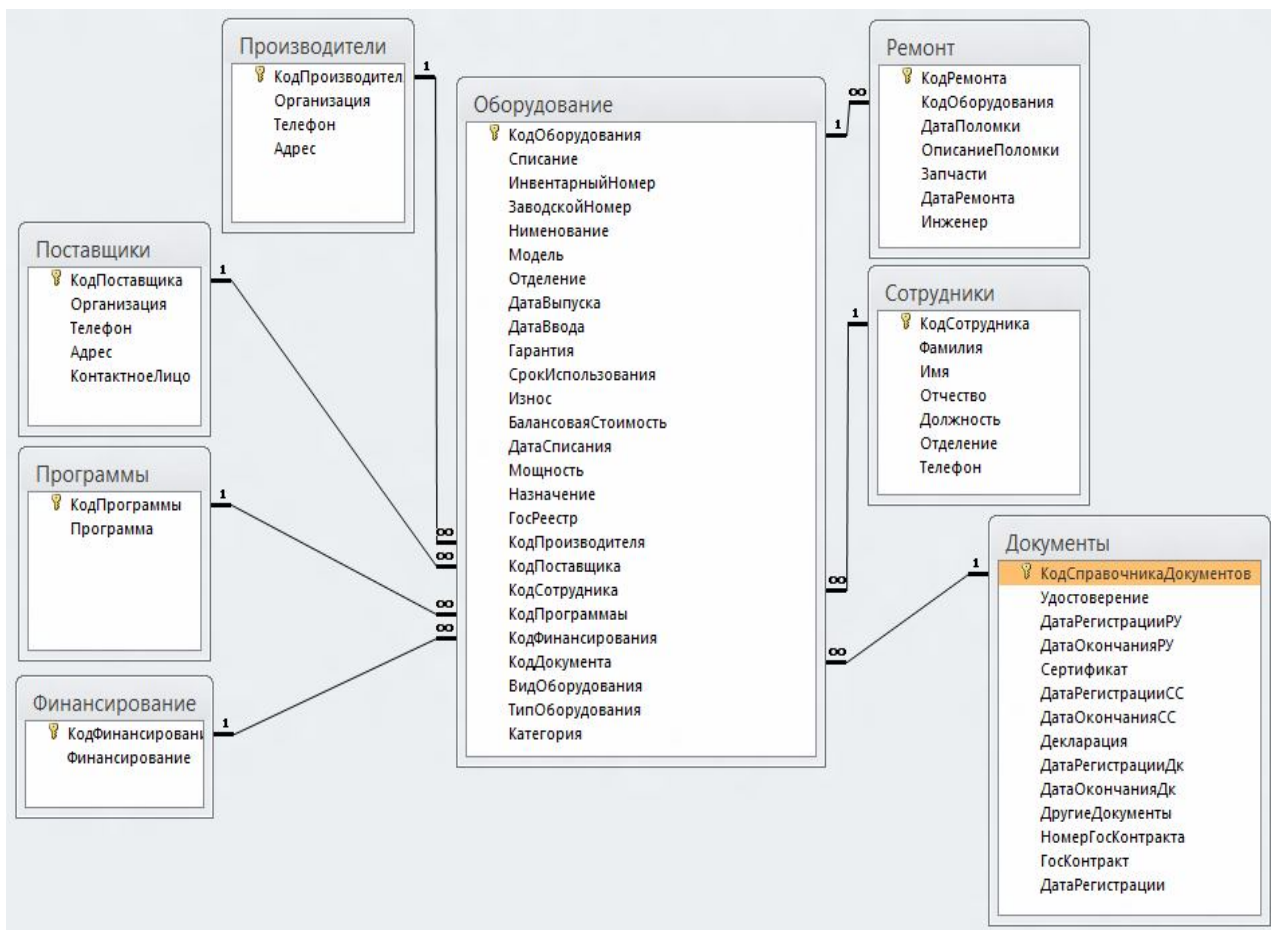


Рисунок 2 – Логическая модель данных

Таблица 2 – атрибуты объектов данных.

Имя сущности	Имя поля	Тип поля	Размер	Наименование
Документы	КодСправочникаДокументов	Счетчик	Длинное целое	Код Справочника Документов
	Удостоверение	Текстовый	100	Удостоверение
	ДатаРегистрацииРУ	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Регистрации Удостоверения
	ДатаОкончанияРУ	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Окончания Удостоверения
	Сертификат	Текстовый	100	Сертификат
	ДатаРегистрацииСС	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Регистрации Сертификата
	ДатаОкончанияСС	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Окончания Сертификата
	Декларация	Текстовый	100	Декларация

	ДатаРегистрацииДк	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Регистрации Декларации
	ДатаОкончанияДк	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Окончания Декларации
	ДругиеДокументы	Текстовый	255	Другие Документы
	НомерГосКонтракта	Текстовый	50	№ Госконтракта
	ГосКонтракт	Текстовый	100	Госконтракт
	ДатаРегистрации	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Заключения
Оборудование	КодОборудования	Счетчик	Длинное целое	Код Оборудования
	Списание	Логический		Списание
	ИнвентарныйНомер	Текстовый	12	Инвентарный №
	ЗаводскойНомер	Текстовый	20	Заводской №
	Наименование	Текстовый	50	Наименование
	Модель	Текстовый	50	Модель
	Отделение	Текстовый	50	Отделение
	ДатаВыпуска	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Выпуска
	ДатаВвода	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Ввода
	Гарантия	Дата/время	Краткий формат даты	Гарантия
	СрокИспользования	Дата/время	Краткий формат даты	Срок Использования
	Износ	Числовой	Одинарное с плавающей точкой	% Месячног износа
	БалансоваяСтоимость	Денежный	# ##0,00"р."; -# ##0,00"р."	Балансовая Стоимость
	ДатаСписания	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Списания
	Мощность	Числовой	Одинарное с плавающей точкой	Мощность
	Назначение	Текстовый	255	Назначение
ГосРеестр	Текстовый	50	ГосРеестр	

	КодПроизводителя	Числовой	Длинное целое	Код Производителя
	КодПоставщика	Числовой	Длинное целое	Код Поставщика
	КодСотрудника	Числовой	Длинное целое	Код Сотрудника
	КодПрограммы	Числовой	Длинное целое	Код Программы
	КодФинансирования	Числовой	Длинное целое	Код Финансирования
	КодДокумента	Числовой	Длинное целое	Код Документа
	ВидОборудования	Текстовый	50	Вид Оборудования
	ТипОборудования	Текстовый	50	Тип Оборудования
	Категория	Текстовый	50	Категория
Поставщики	КодПоставщика	Счетчик	Длинное целое	Код Поставщика
	Организация	Текстовый	255	Организация
	Телефон	Текстовый	15	Телефон
	Адрес	Текстовый	100	Адрес
	КонтактноеЛицо	Текстовый	150	Контактное Лицо
Производители	КодПроизводителя	Счетчик	Длинное целое	КодПроизводителя
	Организация	Текстовый	255	Организация
	Телефон	Текстовый	15	Телефон
	Адрес	Текстовый	100	Адрес
Программы	КодПрограммы	Счетчик	Длинное целое	Код Программы
	Программа	Текстовый	255	Программа
Ремонт	КодРемонта	Счетчик	Длинное целое	Код Ремонта
	КодОборудования	Числовой	Длинное целое	Код Оборудования
	ДатаПоломки	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Поломки
	ОписаниеПоломки	Текстовый	255	Описание Поломки
	Запчасти	Текстовый	255	Запчасти
	ДатаРемонта	Дата/время	Краткий формат даты	Дата Ремонта
	Инженер	Текстовый	255	Инженер
Финансирование	КодФинансирования	Счетчик	Длинное целое	Код Финансирования
	Финансирование	Текстовый	255	Финансирование
Сотрудники	КодСотрудника	Счетчик	Длинное целое	Код Сотрудника
	Фамилия	Текстовый	20	Фамилия
	Имя	Текстовый	20	Имя

Отчество	Текстовый	20	Отчество
Должность	Текстовый	50	Должность
Отделение	Текстовый	50	Отделение
Телефон	Текстовый	15	Телефон

В результате была создана эффективная база данных для службы медицинского оборудования ГБУЗ «ДККБ» ДЗ КК. Для реализации проекта был выбран Microsoft Office Access из пакета Microsoft Office. Полученная система отвечает следующим критериям: 1) позволяет хранить большой объем используемой информации при помощи нескольких, связанных между собой, таблиц; 2) имеет удобный интуитивно понятный интерфейс; 3) регулирует уровень доступа к данным и их редактированию в зависимости от пользователя (ведущий инженер, инженер, техник); 4) хранит данные в формате, соответствующем их типу (заданы стили полей и маски ввода); 5) выводит информацию по сформированным запросам; 6) позволяет быстро создать печатный отчет с отсортированной информацией.

Созданная база данных внедрена в процесс работы службы медицинского оборудования, сотрудники которой отмечают её эффективность, достигнутую за счёт автоматизации таких процессов, как формирование отчетов и удобной системе фильтрации. В дальнейшем планируется связать программу с оставшимися документами, чтобы автоматизировать отслеживание таких процессов, как закупка оборудования и материалов, необходимых для его обслуживания, стадии заключения договоров, проведение метрологических операций, учёт всех документов, сопровождающих медицинское оборудование в процессе его эксплуатации, ремонта и списания.

Полученная система будет являться образцом организации документооборота в лечебно-профилактических учреждениях. Ее основная особенность состоит в том, что нет необходимости приобретать дорогое лицензионное программное обеспечение, необходима только настройка и заполнение данных.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАРКОЗНО-ДЫХАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рунец А.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет» г. Краснодар

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрастает интерес к возможности автоматизации наркозно-дыхательного оборудования, что отражено в новейших разработках фирм: Dräger, GE Healthacare, HEINEN + LOWENSTEIN GMBH. Последние модели, представленные и готовые к использованию в клинической практике включают в себя дополнительные блоки обработки данных, передачи информации во внешний обработчик. В результате появляются такие новые возможности применения этих аппаратов, как удаленный контроль, сбор фиксированных статистических данных в цифровом виде в клинической ежедневной практике [1].

Для реализации автоматизации наркозно-дыхательного оборудования необходимо решить комплекс отдельных задач, таких как:

1. Создание наркозно-дыхательного аппарата с возможностью подключения к локальной вычислительной сети, с открытым полным доступом.
2. Осуществление полного мониторинга всех необходимых параметров человека, связанных в одну подсистему.
3. Создание цифровой базы статистических данных воздействия анестезиологических веществ на организм человека. С полным описанием сопутствующих болезней легких, сердца, сосудистой системы, деятельности головного мозга.
4. Создание «Блока управления» наркозно-дыхательным комплексом, включающего в себя наркозно-дыхательный аппарат, систему мониторинга, «базу данных», встроенного в корпус наркозного аппарата или внешнего.

СОВРЕМЕННЫЕ АППАРАТЫ И НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

В последнее время возрастает интерес к возможности автоматизации наркозно-дыхательного оборудования, что отражено в новейших разработках фирм: Dräger, GE Healthcare, Hamilton. Эти аппараты включают в себя дополнительные блоки обработки данных, передачи информации во внешний обработчик. В результате появляются такие новые возможности применения этих аппаратов, как удаленный контроль, сбор фиксированных статистических данных в цифровом виде в клинической ежедневной практике [2].

Существует большой выбор моделей аппаратов в каждой фирме, соответствующих сфере применения их. Каждая модель предназначена для определённой группы наркоза при операциях.

Широкую известность во всем мире получила наркозно-дыхательная аппаратура компании Dräger Medical.

Линейка модульных аппаратов Fabius является ярким примером эффективного внедрения уникальных разработок компании Draeger Medical в оборудование, отвечающее самым современным требованиям безопасности и экономичности. Все аппараты серии Fabius оснащены запатентованным пистонным электроприводом вентилятора, исключающим расход сжатых газов на перемещение дыхательного меха. В соответствии с потребностями медицинского учреждения наркозные аппараты комплектуются необходимым числом испарителей ингаляционных анестетиков. Компания Draeger Medical предлагает возможность отдельного приобретения любых испарителей.

Fabius GS Premium является самой совершенной моделью в линейке универсальных модульных аппаратов серии Fabius. Широкие возможности компоновки и оснащения дополнительными функциями отвечают самым высоким требованиям, предъявляемым к современному анестезиологическому аппарату среднего класса. Стандартная комплектация Fabius GS Premium включает цветной графический дисплей, режимы вентиляции по объему и давлению, дыхательную систему с комплектом понижения внутренней влажности и активным

подогревом, галогеновую лампу на гибком штативе, а также механизм центрального тормоза, позволяющий одним нажатием ноги надежно зафиксировать передние колеса аппарата. Модель оснащена дополнительными электрическими розетками для подключения вспомогательного оборудования (монитора пациента, газоанализатора, информационного терминала и пр.), которое может быть удобно размещено как на боковых поверхностях аппарата, так и на верхней панели.

Создавая Primus, компания Draeger Medical взяла все лучшее от его предшественника — аппарата Julian и добавила ряд экономически важных и технологически уникальных разработок. Среди них — поршневой электропривод вентилятора и встроенный газоанализатор (CO₂, N₂O, O₂, анестетик) с парамагнитным датчиком кислорода. Primus позволяет проводить ингаляционную анестезию как с низкими, так и с минимальными потоками свежего газ, обеспечивает эффективный контроль расхода газовой смеси с помощью наглядного графического эконометра. Широкий выбор режимов ИВЛ предоставляет непревзойденную функциональность и оперативный простор при хирургических вмешательствах любой сложности. Интеллектуальный интерфейс пользователя гарантирует простоту управления и контроль хода анестезии и вентиляции. Primus выпускается в трех модификациях — напольная, настенная и подвесная для анестезиологической консоли. Крепление на потолочную консоль может осуществляться с помощью уникального коммуникационного модуля Media Docking™, позволяя подключить все газы, питание и интерфейсы за считанные секунды.

Zeus воплощает в себе весь технологический потенциал компании Draeger Medical. Он является уникальным наркозно-дыхательным аппаратом, позволяющим проводить ингаляционную анестезию по любому типу контура, в том числе и по полностью закрытому. Богатый выбор режимов вентиляции ставит его на одну ступень с самыми совершенными аппаратами ИВЛ. Электронная система дозирования летучих анестетиков (DIVA) существенно упрощает рабо-

ту персонала благодаря внедрению технологии анестезии с заданной концентрацией (ТСА — target control anesthesia). Широкие функциональные возможности для контроля анестезии и ИВЛ могут быть дополнены универсальным гемодинамическим модулем мониторинга, позволяющим полноценно следить за состоянием пациента во время хирургического вмешательства. Zeus опционально комплектуется системой инфузионных насосов, управляемой с помощью единого пользовательского интерфейса, и реализующей технологию внутривенной анестезии с целевой концентрацией (ТСИ — target control injection). Zeus оснащен большим набором интерфейсов передачи данных и может быть гибко интегрирован в информационную инфраструктуру лечебного учреждения, обеспечивая доступ к электронной базе истории болезни, а также, к другим информационным ресурсам, включая Интернет.

Последние разработки лидирующих фирм в данной области направлены на оптимизацию экономических параметров, совместимость с диагностическим оборудованием или включение его в состав анестезиологического комплекса, возможность модификации.

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНЕСТЕЗИОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

При создании такого комплекса необходимо учитывать большой спектр различных параметров. Основную часть современные аппараты способны контролировать и соответственно давать отклик в процесс анестезии, что касается области вентилирования. Автоматический анестезиологический комплекс должен не только проводить анестезию, ИВЛ, мониторинг всех необходимых параметров, но и полностью автономно управлять процессом.

Современные разработки позволяют проводить мониторинг большинства показателей, но некоторые остаются под наблюдением анестезиолога. Анализ всех данных производится врачом. Соответственно необходимо создание центрального блока управления с программным обеспечением, способным к самообучению, с базой данных включающей в себя:

1. Данные по используемому анестезирующему препарату.
2. Полную историю болезни пациента.
3. Максимальное описание сопутствующих болезней легких, сердца, сосудистой системы, деятельности головного мозга.
4. Описание вида операции.

База данных должна быть систематизирована, записана в цифровом формате и содержать функции, описывающие процессы.

Так же необходимо учитывать, что использование базы данных это не жестко прописанные математические законы, а рекомендации. Существует возможность не только отклонения от первичного решения, но иногда может понадобиться противоречие ему. Управление должно основаться на логике (рис. 1).



Рисунок 1. Блок схема наркозно-дыхательной установки

Представленная блок схема наркозно-дыхательной установки состоит из трех основных блоков: *Наркозно-дыхательный аппарат*, *Система мониторинга*, *Блок управления*, связи между которыми обозначают

- ↔ контур пациента,
- ⇒ система датчиков,
- подключение системы мониторинга к блоку управления,
- ↔ подключение наркозно-дыхательного аппарата к блоку управления с обратной связью.

Наркозно-дыхательный аппарат, система мониторинга, блок управления могут быть в одном корпусе или состоять из различных аппаратов собранных в одну систему. Система мониторинга должна быть способна производить мониторинг не только стандартного набора показателей (для уже созданных аппара-

тов анестезии), но и дополнительные, например, активность головного мозга и др.

Блок управления должен выполнять не только управление и контроль всех данных, но и иметь возможность обмена данными со внешней сетью. Через локальную вычислительную сеть (ЛВС) происходит не только обмен данными с общей базой больницы, но и удаленный контроль врачами за данными о пациенте и протеканием анестезиологического процесса. Служба медицинского оборудования должна иметь полный доступ для удаленного тестирования всех систем от электроники до механики.

Если не один анестезиологический комплекс установлен в лечебном учреждении, то необходим выделенный сервер, через который должен проходить весь обмен данными. Сервер используется для внешней информационной защиты закрытых личных данных пациентов, хранения истории работы комплексов, его можно будет подключить к системе «Телемедицина», которая создается в Краснодарском крае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытым вопросом остается создание «Блока управления», то есть замена врача анестезиолога на «Искусственный интеллект». Это связано с тем, что на данный момент прописать в математических функциях и логических выражениях все возможные варианты протекания процесса анестезии в общем случае невозможно. На сегодняшний день нет достаточно большой статистической базы данных по исследованию воздействия различных анестезиологических веществ на организм человека. Ошибка в программном обеспечении недопустима, так как это может привести к нежелательным последствиям и даже смерти пациента.

Библиографический список

1. Горячев А.С. Савин И.А. «Основы ИВЛ». <http://ebookmv.nsicu.ru/index.html>
2. Dräger Россия - Официальный сайт Dräger <http://www.draeger.com/RU/ru/>

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕМОГРАММ БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ

Трюхан Н.Ю. Онищук С.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Клинический анализ крови является одним из 13 наиболее распространенных клинико-лабораторных исследований в медицинской практике. Многие десятилетия при изучении гематологических показателей использовались ручные методы. В эти годы была накоплена обширная информация, касающаяся картины крови при различных физиологических и патологических состояниях.

Среди медицинских анализов особенное значение имеет анализ крови - связующего звена между всеми системами и органами тела. Одним из самых распространенных в современной медицине лабораторным методом изучения ее состава является биохимический анализ крови.

Биохимический анализ крови важен для диагностики практически всех болезней, поэтому его назначают в первую очередь.

При исследовании биохимических составляющих крови весь спектр показателей делят на органические и неорганические. Каждый из показателей характеризует какую-то часть метаболизма, однако полное представление о патологии можно получить только при синтетической интерпретации данных.

С помощью биохимического анализа крови можно оценить обмен веществ в организме и функциональное состояние практически всех внутренних органов – сердца, почек, печени, поджелудочной железы и др. и получить информацию о метаболизме (обмен липидов, белков, углеводов). Этот способ лабораторной диагностики очень информативен для врача и отличается высокой степенью достоверности. Как правило, во время этого анализа исследуется достаточно большое количество параметров (состояние клеток крови, биохимические, иммунологические, гормональные показатели).

Одним из наиболее распространенных патологических состояний является сахарный диабет (СД). Это сложное, системное заболевание, часто приводящее к потере зрения вследствие поражения сетчатки [1]. Около 180 млн. человек в мире страдают СД. Ежегодно число больных увеличивается на 5-7%, а каждые 12-15 лет - удваивается [1] (ВОЗ, 2002), и к 2025 году предполагают, что оно достигнет 300 млн. человек [1]. В России насчитывается около 8 млн. больных СД и примерно столько же - на стадии предиабета [1].

Чрезвычайно важной является проблема диагностики диабетического макулярного отека (особенно на ранних стадиях), поскольку именно он продолжает оставаться одной из основных причин потери зрения и инвалидизации больных СД. Так, по данным Е.С. Скоробогатовой и Е.С. Либман [2], среди населения трудоспособного возраста, страдающего СД, распространенность первичной инвалидности за последние девять лет возросла на 18%.

Целью данной работы является установление математических взаимосвязей между показателями общего и биохимического анализа крови при сахарном диабете.

В настоящей работе для анализа крови использовался современный биохимический анализатор компании Siemens Advia 1650. Исследования проводились в «Краевой клинической больнице №1 имени проф. Очаповского С.В.». Были обработаны данные биохимического анализа крови 65 пациентов с диагнозом «сахарный диабет».

Видно, что между отдельными показателями (креатинин – мочевины, натрий – фосфор неорганический, Т4-свободный – С-реактивный белок и др.) существует положительная зависимость, между некоторыми показателями большие по абсолютной величине отрицательные коэффициенты корреляции (калий – С-реактивный белок, глюкоза – кальций общий, С-реактивный белок – креатинин в моче и др.), между некоторыми связь отсутствует (триглицериды – мочевины, общий белок – холестерин общий, холестерин высокой плотности – хлориды и др.)

Таблица 1а. Корреляционная матрица

	Мочевина (ммоль/л)	Креатинин (мкмоль/л)	Мочевая кислота (мкмоль/л)	Натрий (ммоль/л)	Холестерин высокой плотности (ммоль/л)	Калий (ммоль/л)	Хлориды (ммоль/л)	Билирубин общий (мкмоль/л)	Общий белок (г/л)	Аспаратаминотрансфераза (Ед/л)	Аланинаминотрансфераза (Ед/л)	Триглицериды (ммоль/л)	Холестерин общий (ммоль/л)	Холестерин низкой плотности (ρ) (ммоль/л)
Мочевина	1,00	0,93	0,60	-0,67	-0,53	-0,57	-0,45	-0,47	-0,83	-0,24	-0,21	0,02	-0,26	-0,18
Креатинин		1,00	0,65	-0,65	0,87	-0,56	-0,39	-0,36	-0,88	-0,16	-0,24	-0,23	-0,39	0,12
Мочевая кислота			1,00	-0,69	-0,21	-0,91	0,64	0,36	-0,39	0,47	0,16	-0,57	-0,49	0,16
Натрий				1,00	0,02	0,32	0,65	0,35	0,63	0,12	0,44	-0,37	-0,17	-0,36
Холестерин высокой плотности					1,00	-0,39	-0,02	0,12	0,57	0,62	0,47	0,13	0,57	0,53
Калий						1,00	0,30	0,33	0,44	-0,49	-0,34	-0,31	-0,30	-0,56
Хлориды							1,00	0,49	0,49	0,06	-0,12	-0,65	-0,49	-0,38
Билирубин общий								1,00	0,46	-0,01	-0,18	-0,55	-0,17	-0,30
Общий белок									1,00	0,20	0,19	0,12	0,07	-0,36
Аспаратаминотрансфераза										1,00	0,75	-0,26	0,37	0,41
Аланинаминотрансфераза											1,00	-0,25	0,21	-0,39
Триглицериды												1,00	0,65	0,36
Холестерин общий													1,00	0,95
Холестерин низкой плотности (ρ)														1,00

Таблица 1б. Корреляционная матрица

	Тиреотропный гормон (мМЕ/мл)	Т4 свободный (пмоль/л)	Антитела к тиреопероксидазе	Инсулин (мМЕ/л)	С-Пептид (нг/мл)	С-реактивный белок (мг/л)	Гликированный гемоглобин	Глюкоза (ммоль/л)	Кальций общий (ммоль/л)	Фосфор неорганический (ммоль/л)	Креатинин в моче (мкмоль/л)	Кортизол (нмоль/л)
Мочевина	1,00	-1,00	0,95	-0,80	-0,52	0,37	0,30	0,83	-0,45	-0,52	-0,39	0,16
Креатинин	-0,28	-0,28	0,67	-0,27	-0,29	0,73	0,00	0,77	-0,37	-0,50	-0,07	-0,14
Мочевая кислота	-1,00	1,00	-0,73	1,00	1,00	-1,00	-1,00	0,88	0,39	0,33	0,80	1,00
Натрий	-0,39	1,00	-0,99	1,00	1,00	-0,93	-0,07	-0,95	0,83	0,82	0,19	1,00
Холестерин высокой плотности	-0,29	-0,92	-0,41	1,00	1,00	-1,00	-0,17	1,00	0,15	0,79	0,23	1,00
Калий	0,97	-0,17	0,77	-1,00	-1,00	-0,94	0,16	-0,50	0,24	-0,07	-0,45	-1,00
Хлориды	0,70	-0,94	-0,52	1,00	1,00	-0,73	0,90	-0,95	0,75	0,44	0,33	1,00
Билирубин общий	1,00	-1,00	-0,70	0,58	0,24	-1,00	-0,23	-0,67	0,37	0,01	0,52	0,41
Общий белок	1,00	-1,00	-0,93	0,57	0,23	-1,00	0,93	-0,76	0,39	0,46	0,33	-0,20
Аспаратаминотрансфераза	-1,00	1,00	-0,63	0,94	0,74	-1,00	0,09	-0,14	0,16	0,56	0,84	0,71
Аланинаминотрансфераза	1,00	-1,00	-0,79	0,41	0,05	-1,00	0,58	-0,20	0,21	0,69	0,35	0,48
Триглицериды	-0,83	0,66	0,14	1,00	1,00	1,00	0,44	0,65	-0,64	-0,26	-0,31	1,00
Холестерин общий	-0,53	-0,35	-0,55	0,92	1,00	-1,00	-0,41	0,32	-0,95	-0,02	0,37	0,84
Холестерин низкой плотности (р)	-0,91	-0,30	-0,91	1,00	1,00	-1,00	-0,61	1,00	-0,87	-0,29	0,65	1,00
Альфа-Амилаза	-1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	0,50	-1,00	-0,18	0,56	0,38	-1,00	-1,00
Тиреотропный гормон	1,00	-0,49	0,47	0,13	-0,04	-1,00	0,40	-1,00	1,00	1,00	-0,30	-0,64
Т4 свободный		1,00	-0,17	-0,15	-0,36	0,98	-0,09	1,00	-1,00	-1,00	-0,06	0,98
Антитела к тиреопероксидазе			1,00	-0,45	-0,59	0,99	1,00	0,95	-0,92	-0,98	-0,15	-0,58
Инсулин				1,00	0,63	-1,00	-1,00	-0,52	0,48	0,66	0,94	0,97
С-Пептид					1,00	1,00	-1,00	-0,17	0,12	0,33	0,58	0,99
С-реактивный белок						1,00	-1,00	1,00	-1,00	-1,00	-0,79	-1,00
Гликированный гемоглобин HbA1c(IFCC)							1,00	-0,25	0,67	0,58	-0,50	-1,00

Таблица 1в. Корреляционная матрица

	Тиреотропный гормон (мкМЕ/мл)	T4 свободный (пмоль/л)	Антитела к тиреопероксидазе (МЕ/мл)	Инсулин (мМЕ/л)	C-Пептид (нг/мл)	C-реактивный белок (мг/л)	Гликированный гемоглобин HbA1c(IFCC) (%)	Глюкоза (ммоль/л)	Кальций общий (ммоль/л)	Фосфор неорганический (ммоль/л)	Креатинин в моче (мкмоль/л)	Кортизол (нмоль/л)
Глюкоза								1,00	-0,85	-0,69	-0,42	0,32
Кальций общий									1,00	0,82	0,13	0,27
Фосфор неорганический										1,00	0,33	0,47
Креатинин в моче											1,00	0,13
Кортизол												1,00

Из данных таблиц видно, что, например, коэффициент корреляции между общим белком и мочевиной довольно высокий и составляет $r = -0,83$.

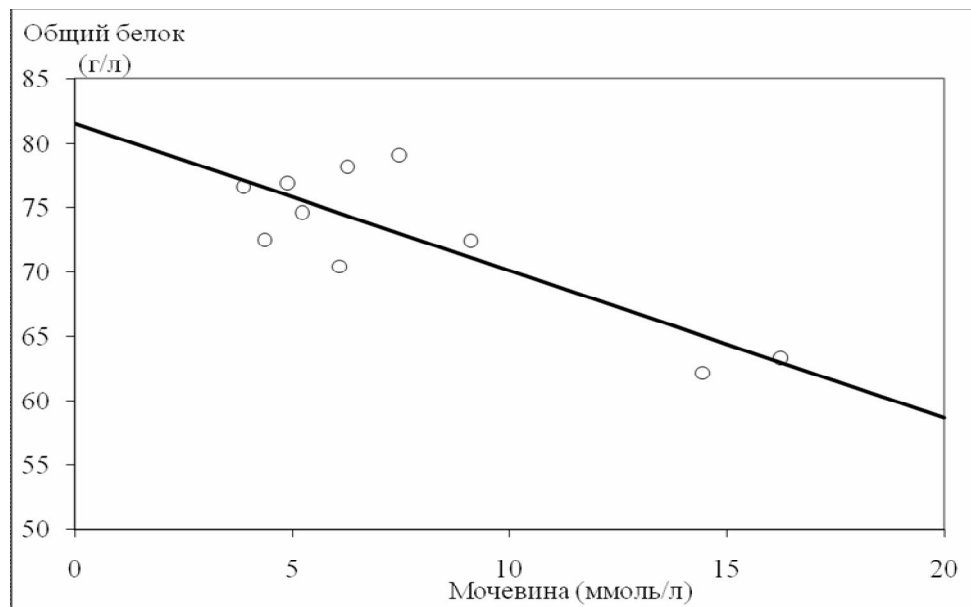


Рисунок 1 – корреляционная зависимость общего белка и мочевины.

Высокий положительный коэффициент корреляции $r = 0,93$ был найден между креатинином и мочевиной.

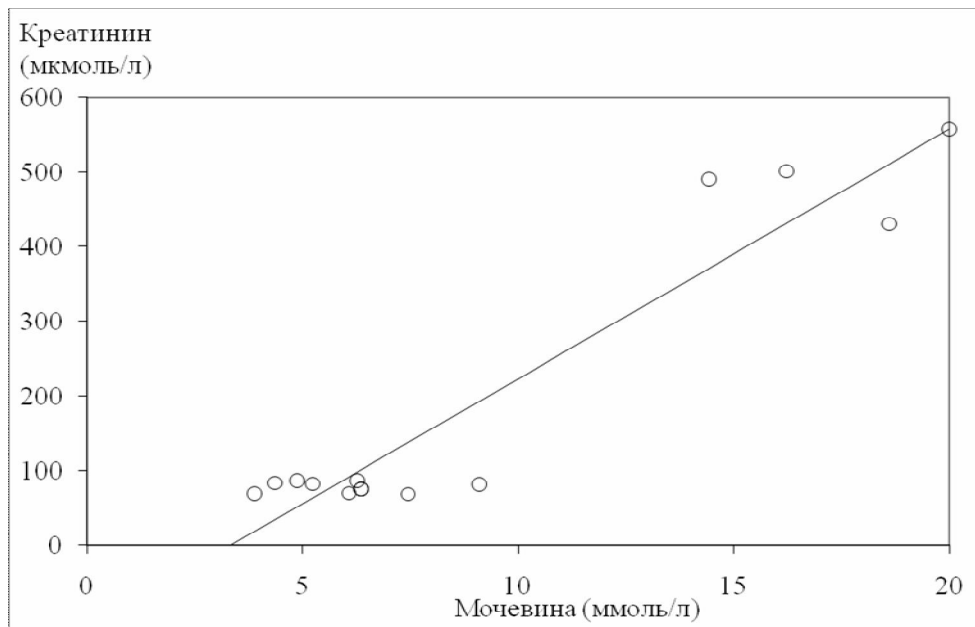


Рисунок 2 – корреляционная зависимость креатинина и мочевины.

Между креатинином в моче и креатинином в никакой зависимости не было обнаружено, коэффициент корреляции $r = -0,07$.

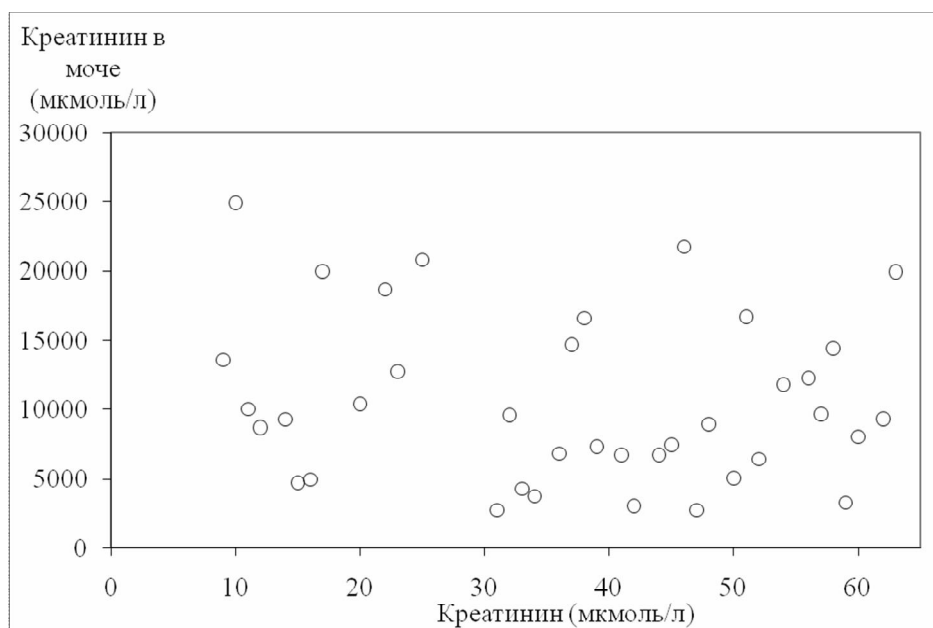


Рисунок 3 – корреляционная зависимость креатинина в моче и креатинина.

В ходе данной работы были установлены основные принципы функционирования и типы технологических устройств, используемых для автоматизации биохимического исследования. С помощью современного анализатора получены гемограммы больных сахарным диабетом.

Установлено, что имеются между отдельными показателями высокие положительные коэффициенты корреляции (креатинин – мочевина, натрий – фосфор неорганический, Т4-свободный – С-реактивный белок и др.), по абсолютной величине отрицательные коэффициенты корреляции (калий – С-реактивный белок, глюкоза – кальций общий, С-реактивный белок – креатинин в моче и др.), между некоторыми связь отсутствует (триглицериды – мочевина, общий белок – холестерин общий, холестерин высокой плотности – хлориды и др.).

Установлены коэффициенты линейной регрессии между отдельными показателями с высоким по абсолютной величине коэффициентами корреляции.

Библиографический список

1. Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ), 2002/ - URL: <http://www.who.int/publications/list/2002/ru/index.html>
2. Скоробогатова Е.С. Инвалидность по зрению вследствие сахарного диабета/ Е.С. Скоробогатова, Е.С. Либман Монография. М.: Медицина 2003. - 184 с.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЦЫ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фесенко И.Н., Скредова Ю.И., Никитин В.А., Яковенко Н.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

В настоящее время матрицы микролинз находят все более широкое применение. Они используются в системах оптической обработки информации для мультиплицирования изображения, в LCD-мониторах и CCD-камерах, в приборах для биологических и медицинских исследований [1].

Одним из методов изготовления интегрально-оптических микролинз является электростимулированная миграция ионов металлов из расплава соли в стеклянную подложку [2]. Преимущество микролинз, изготовленных этим методом, заключается в том, что вариациями процесса миграции, маскирующих покрытий и самого диффузанта можно получать линзы с различными радиусами кривизны, показателями преломления и формой (а именно, сферические, овальные, цилиндрические) с высокой точностью расположения элементов в растре. Кроме того, они имеют плоскую поверхность, что позволяет приводить их в непосредственный контакт с разными оптическими приборами.

Целью работы являлось создание матриц микролинз в стеклах, для приборов биологических и медицинских исследований.

Матрица микролинз формировалась на подложках из стекла от фотопластин размером $50 \times 50 \times 2$ мм методом электростимулированной миграции ионов из расплава солей. Стекло от фотопластин содержит значительное количество щелочных ионов, которые могут быть заменены в матрице стекла ионами серебра с целью увеличения показателя преломления в соответствующих местах подложки.

На одну из сторон предварительно очищенной стеклянной пластинки термическим вакуумным напылением наносилось алюминиевое маскирующее

покрытие толщиной 0,6–1 мкм. В маскирующем слое алюминия с помощью фотолитографии вытравливалась матрица, содержащая 53400 (200×267) круглых отверстий, диаметром 30 мкм и шагом 150 мкм.

На противоположную поверхность стеклянной пластинки наносился плоский электрод-катод толщиной 1 мкм.

Подготовленная таким образом стеклянная пластинка приводилась в соприкосновение с расплавом солей, содержащих ионы серебра.

Электростимулированная миграция ионов проводилась в соответствии с рисунком 1.

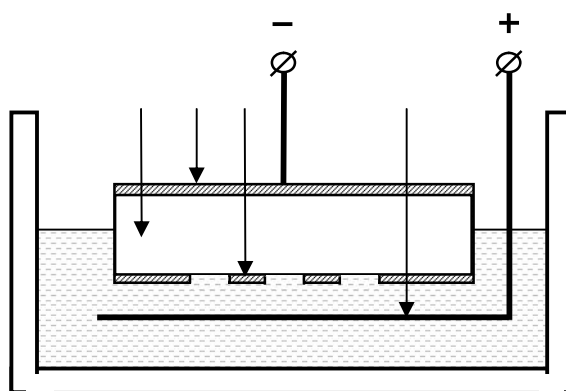


Рисунок 1 – Схема проведения электростимулированной миграции ионов

Для проведения электростимулированной миграции ионов серебра стеклянная пластинка приводилась в соприкосновение с расплавом соли AgNO_3 и NaNO_3 , взятых в соотношении 1:75 (моль).

Электростимулированная миграция ионов проводилась при температуре 380°C . Время электростимулированной миграции составило 40 минут при стимулирующем напряжении 50 В. Величина тока в процессе миграции составляла 40 мА и практически не менялась, что подтверждает высокое качество маскирующего слоя и его высокую химическую стойкость.

На рисунке 2 представлена фотография фрагмента полученной матрицы микролинз.

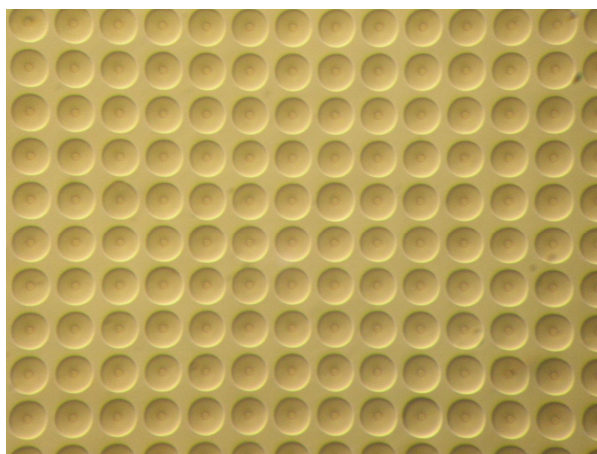


Рисунок 2 – Фотография фрагмента полученной матрицы микролинз

На рисунке 3 представлена фотография торца полученной матрицы микролинз. На фотографии видно, что микролинзы имеют полусферическую форму и ступенчатое изменение показателя преломления.

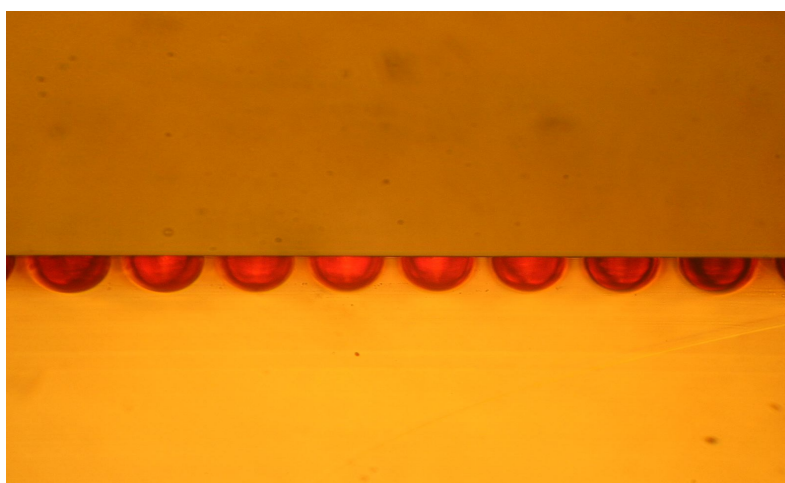


Рисунок 3 – Фотография торца полученной матрицы микролинз

Измерение параметров микролинз в матрице (диаметра микролинз – D , фокусного расстояния – F и диаметра фокального пятна – d_f) проводилось визуально при помощи микроскопа ERGAWAL и микрометра окулярного винтового МОВ-1-15^x в свете гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,63$ мкм).

Известно, что качество линз однозначно влияет на форму и диаметр фокального пятна. Поэтому качество микролинз оценивалось путем измерения

диаметра фокального пятна рисунок 4. Диаметр первого темного кольца принимался за диаметр фокального пятна d_f .

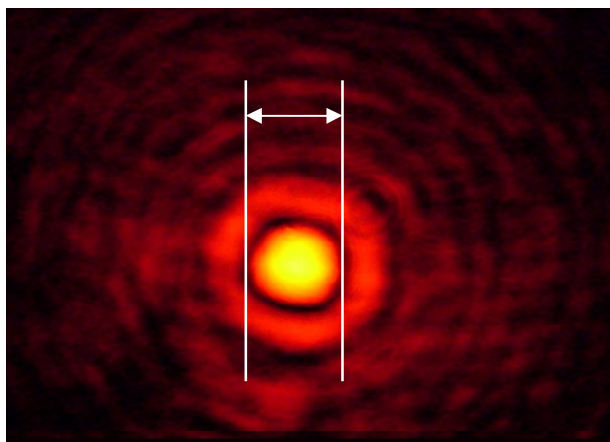


Рисунок 4 – Фотография фокального пятна микролинзы

Измерение фокусного расстояния осуществлялось по схеме, изображенной на рисунке 5. Подложка со сформированной матрицей микролинз располагалась на столике микроскопа линзами к объективу. Снизу без какой-либо коллимирующей системы вводился луч лазера, в свете которого и проводилось измерение фокусного расстояния. Для этого тубус микроскопа устанавливался в такое положение 1, при котором наблюдалось резкое изображение поверхности стеклянной подложки с матрицей микролинз, при этом снималось первое показание нониуса микроскопа. Затем тубус микроскопа переводился в положение 2, при котором наблюдался минимальный размер фокального пятна, и снималось второе показание. Разница этих показаний равняется фокусному расстоянию сформированных микролинз в воздухе.

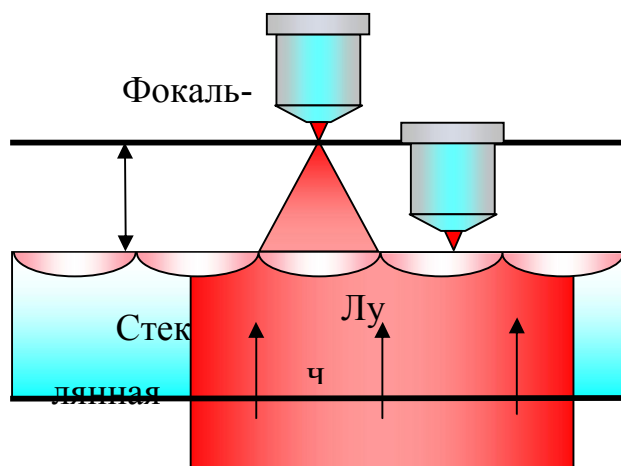


Рисунок 5 – Схема измерения фокусного расстояния микролинзы

Проведенные измерения параметров микролинз показали, что диаметр микролинз составил 130 мкм, фокусное расстояние – 2,7 мм, диаметр фокального пятна – 32 мкм.

Известно, что диаметр первого темного кольца в дифракционной картине, наблюдаемой в фокальной плоскости объектива, определяется по формуле

$$d_f = 2,44 \cdot \lambda \frac{F}{D} [3].$$

Проведенные измерения показали, что диаметр первого темного кольца микролинз в матрице практически равен дифракционному пределу, что свидетельствует об их хорошем качестве. Для изучения распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости микролинзы был собран лабораторный стенд, блок-схема которого представлена на рисунке 6.

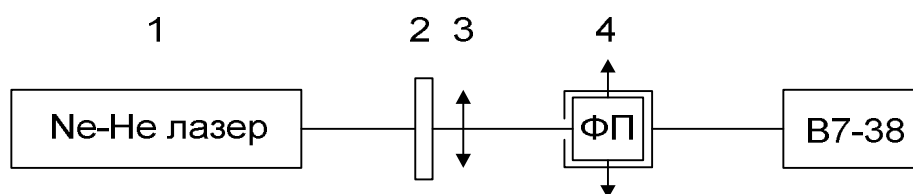


Рисунок 6 – Блок-схема лабораторного стенда для изучения распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости микролинзы

Оптическое излучение Ne-He-лазера (1) попадает на исследуемые линзы, сформированные в стеклянной подложке (2). Микрообъектив (3) необходим для получения увеличенного изображения фокального пятна в плоскости фотоприемника (4), снабженного диафрагмой. Шаг сканирования фотоприёмником составил 50 мкм (0,05 мм). Распределение интенсивности излучения регистрировалось с помощью вольтметра В7-38. На основании полученных результатов был построен график зависимости интенсивности оптического излучения в фокальной плоскости микролинзы (в относительных единицах) от координаты (рисунок 7).

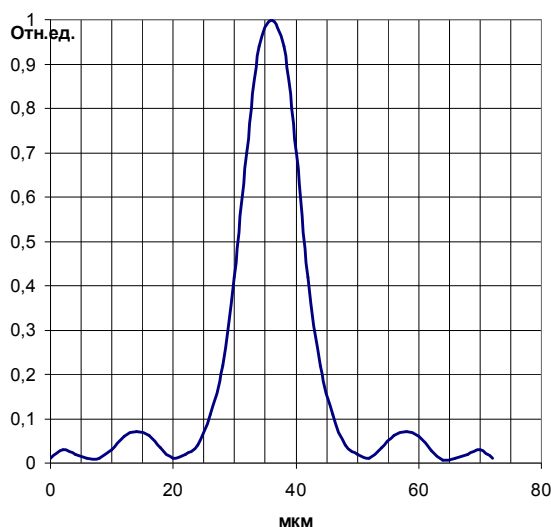


Рисунок 7 – График зависимости интенсивности оптического излучения в фокальной плоскости микролинзы (в относительных единицах) от координаты

Библиографический список

1. Integration of Chemical and Biochemical Analysis System into a Glass Microchip / K. Sato, A. Hibara, M. Tokeshi, H. Hisamoto, T. Kitamori // *Analytical Sciences*. January 2003. 19. P. 15–22.
2. Никитин В. А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике / В. А. Никитин., Н. А. Яковенко. – Краснодар: Изд-во КубГУ, 2010. 200 с.
3. Гвоздева Н. П. Прикладная оптика и оптические измерения / Н. П. Гвоздева, К. И. Коркина. М.: Машиностроение, 1976. 383 с.

ВНЕДРЕНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УЧРЕЖДЕНИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Шевченко А.В.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Важные позиции в развитии современной медицины занимает процесс внедрения и широкого использования телекоммуникационных систем в сфере здравоохранения. Развитие телемедицины в России в настоящий момент становится особенно актуальным, так как новые технологии уже в достаточной мере вошли в повседневную жизнь каждого человека.

Необходимо отметить, что на данный момент развитие телекоммуникационных технологий в медицине в России происходит скорее «точечно», нежели повсеместно. Это обусловлено, прежде всего, недостаточным финансированием и разрозненной политикой приоритетов развития здравоохранения по регионам. На фоне подготовки к Зимним Олимпийским Играм – 2014, развитие южного региона, и в частности Краснодарского края, сейчас происходит ускоренными темпами, а, следовательно, и потребность в телемедицинских проектах и их реализации заметно возросла.

В статье предлагается рассмотреть современные подходы к решению проблем в данной области, а так же основы локального внедрения телекоммуникационных систем на примере проекта расширенной видеоконференцсвязи в операционных Краевого Перинатального центра г. Краснодара.

Принципы решений в сфере телемедицины представлены компанией «Стэл-КС» на примере таких разработок как Телемедицинский программно-аппаратный комплекс **STEL ТК**. Он реализован на базе мощного производительного компьютера Stel Pro, аппаратного кодека видеоконференцсвязи компании Polysom и необходимого периферийного оборудования. Кодеки видеоконференцсвязи позволяют проводить высококачественные сеансы видеосвязи в IP-сетях (до 2 Мбит/с) и с возможностью подключения 4*BRI ISDN (до 512

кбит/с) в соответствии с протоколами H.320, H.323. Более мобильной версией подобного комплекса является **STEL TKmobile** – мобильный телемедицинский комплекс, предназначенный для оказания оперативной дистанционной консультативно-диагностической медицинской помощи. Комплекс состоит из двух пылевлагозащищённых чемоданов для компьютерного, телекоммуникационного и медицинского оборудования. В состав STEL TKmobile входит: компактный компьютер и необходимая компьютерная периферия, встроенная аппаратная система видеоконференцсвязи, видеокамера и микрофон. Медицинская укладка второго чемодана: компьютерный электрокардиограф на 12 отведений, электронный термометр, пульсоксиметр, глюкометр, автоматический тонометр с диапазоном измерения 20-280 мм.рт.ст .

Так же компанией «Стэл-КС» представлен Передвижной телемедицинский модуль **STEL TMDM**, позволяющий не только обмениваться информацией с медицинскими центрами, но и оказывать полноценную медицинскую помощь в любой удаленной точке.

Отметим так же, что проекты компании «Стэл-КС» - это лишь малая часть разработок в сфере телемедицины [1]. Продукты таких крупных компаний как Philips, Sony, Dräger, General Electric и др. уже активно используются в телекоммуникационных системах здравоохранения во всем мире.

Если рассматривать зарубежный опыт использования телемедицины в здравоохранении, то необходимо упомянуть о проекте телемедицины в Норвегии, как об одном из пионеров в этой области. Норвегия – одна из самых крупных по площади европейских стран, имеющая большую протяженность с севера на юг, основную территорию которой занимают горы, фьорды и острова. При площади 39000 кв. км население Норвегии составляет 4,7 млн. человек (около 12 человек на 1 кв. километр), причем 78% проживает в городах. Чтобы максимально практично приспособить систему здравоохранения к такой вытянутой и узкой стране и правильно использовать компетентность медицинских кадров, все 19 областей Норвегии объединены в 5 регионов здравоохранения (рис.1).

При этом север Норвегии или регион здравоохранения 5 оказывается в особом положении: на территории в 112922 кв. км проживает около 462 тыс. человек (около 4 человек на квадратный километр).



Рисунок 1. Охват проекта ТМ в Норвегии

Региональная больница в городе Тромсе – одном из трех крупнейших городов Северной Норвегии – как учреждение здравоохранения и базовая клиника медицинского факультета университета Северной Норвегии, выполняет многочисленные функции: консультативно-поликлиническая и стационарная помощь для населения города Тромсе и области, а также все виды высокоспециализированной помощи жителям других областей региона. Только сложные виды трансплантаций проводятся в Осло, а ряд крайне редких заболеваний консультируется в других центральных клиниках страны. По ряду видов помощи больница имеет наивысшую компетентность во всей стране. К числу таких разделов относится и телемедицина.

Телемедицина широко используется в Северной Норвегии с конца 1980-х годов, когда в больнице г. Тромсе стали применять телемедицинские технологии в области телерадиологии, телепатологии, теледерматологии, телеоториноларингологии (дистанционные эндоскопии). Здесь были разработаны и внедрены в практику дистанционная гастроскопия, теле-эхокардиография, удаленная передача ЭКГ, телепсихиатрия, телеофтальмология, теледиализ, телеонкология, морская телемедицина и др. [2].

Отделение телемедицины начало свою деятельность как самостоятельное подразделение в 1993 году. Сначала оно работало как особое отделение больницы, выполняющее функции, определенные непосредственно государством. В нем было всего 25 сотрудников – специалистов по информационным технологиям и компьютерным сетям, социологов, инженеров, врачей, экономистов, психологов, медсестер и др. В августе 1996 года Норвегия стала первой в мире страной, официально включившей тарифы на телемедицину в бюджет здравоохранения (рис.2). Разработаны законодательные нормы использования телемедицины. В 2002 году отделение было преобразовано в Норвежский центр телемедицины, который был определен ВОЗ как один из пяти мировых телемедицинских центров.



Рисунок 2. Телемониторинг состояния пациента, находящегося на одном из островов Северного моря

В настоящее время в Центре работают более 110 дипломированных сотрудников при общем штате сотрудников около 1000 человек. Центр финансируется министерством здравоохранения и социального обслуживания Норвегии, а также из других правительственных источников и общественных фондов.

Сейчас Норвежский центр телемедицины работает над следующими телемедицинскими проектами:

- радиология;
- дерматология;
- телемедицина при ЛОР-заболеваниях;
- эндоскопическая хирургия;
- телепсихиатрия
- телемедицинские исследования слуха новорожденных;
- кардиология;
- телеметрия при сахарном диабете;
- телемедицинское исследование глазного дна (рис. 3).



Рисунок 3. Скрининг сахарного диабета по рисунку сосудов глазного дна

Опираясь на опыт ведущих разработчиков в сфере телемедицины [3,4], можно значительно ускорить разработку и внедрение телемедицинских проектов в здравоохранение РФ. Рассмотрим проект расширенной видеоконференц-связи Перинатального центра г. Краснодара. Так как в результате мы должны

получить потоковое видео высокой четкости 1080p/720p и аудио сообщение из операционной с дополнительно выведенной информацией с монитора пациента [5] (функция картинка в картинке) – в операционных необходима установка HD камер, устройств захвата и вывода аудио потока. Через блок управления данное оборудование подключается к локальной вычислительной сети (ЛВС). Так же к ЛВС, с помощью соответствующего интерфейса, как отдельный элемент сети подключается монитор пациента. Специальный программный комплекс автоматизированного рабочего места оператора получает видео-, аудио- информацию о состоянии пациента, обрабатывает ее и выводит на экран [6]. Необходимо помнить, что данная информация является специализированной и служит для консультирования, наблюдения и обучения медперсонала, и, следовательно, доступ к ней необходимо разграничивать [7]. Рабочее место оператора так же должно быть оборудовано видеокамерой и микрофоном для обратной связи с операционной. Материалы, полученные в ходе операции, хранятся на сервере в зашифрованном виде. Срок хранения определяется внутренней распорядительной документацией учреждения (рис.4).

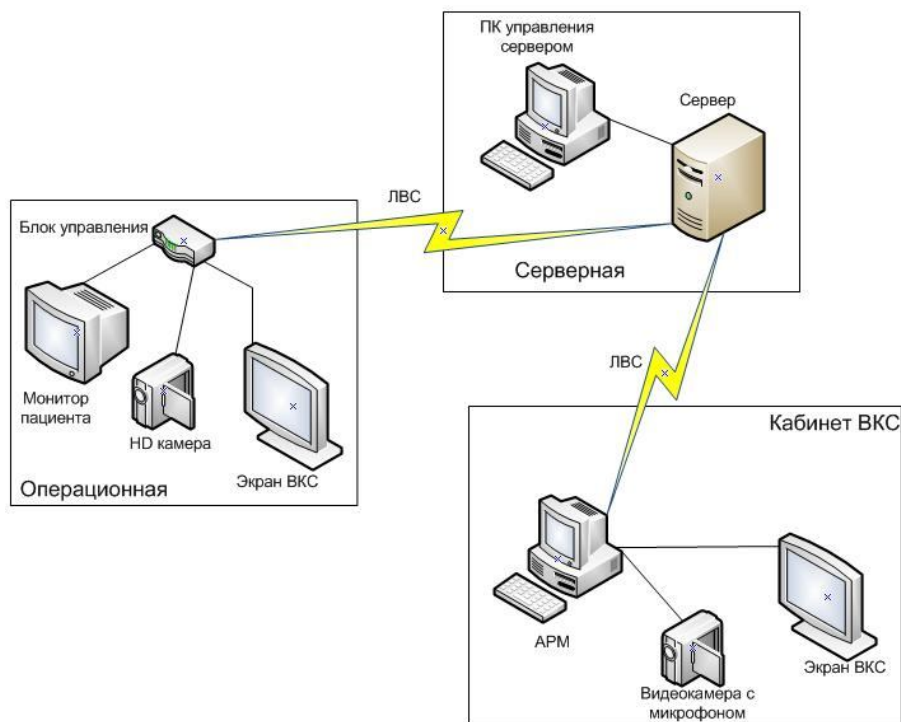


Рисунок 4. Принципиальная схема расширенной ВКС

Следует отметить, что в процессе осуществления данного проекта необходимо произвести модернизацию технической оснащенности операционных, установку автоматизированных рабочих мест оператора, повышение квалификации медицинского и инженерного персонала по работе с новым оборудованием, осуществить реконструкцию и расширение локально вычислительной сети с учетом санитарно эпидемиологических норм.

Библиографический список

1. СТЭЛ Компьютерные системы - Официальный сайт «Стэл-КС»
<http://www.stel.ru>.
2. Гусев С.Д., Кичигина Е.И., Мягкова Е.Г., Ратова М.Р., Россиев Д.А. Медицинская информатика. Электронное учебное пособие. – Официальный сайт ГБОУ ВПО КрасГМУ им. проф. В.Ф.Войно-Ясенецкого Минздравсоцразвития России <http://www.krasgmu.ru>.
3. Лаборатория ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ – Официальный сайт РНЦХ РАМН
<http://tele.med.ru>.
4. Романов С.В., Обухова С.О., Вязанкин А.С., Бердугин В.А., Абаева О.П., Ситко А.В. Опыт внедрения корпоративной медицинской информационной системы в деятельность многопрофильного федерального учреждения здравоохранения.// Врач и информационные технологии. 2011. №1. С. 3-6.
5. Аладышев А.В., Субботин Е.А. Основы медицинской информатики.// Издательство Алтайский государственный медицинский университет. 2008. С. 3 – 17.
6. Переведенцев О. В., Гусева Т. Е. Подходы к оснащению телемедицинских центров оборудованием видеоконференцсвязи. // Врач и информационные технологии. 2004. №9. С. 1 -3.
7. Акименков А.М Программный модуль для защиты информации и распределения доступа пользователей к персональным данным. // Врач и информационные технологии. 2012. №1. С. 2 – 3.

II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

ПРИЕМНИКИ И ПЕРЕДАТЧИКИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Балака Е.С., Братов А.В., Горшкова Н.М., Грюншпан А.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, Москва

Введение

В современных микросхемах информационные потоки возросли до уровня нескольких гигабит в секунду. Для передачи гигабитных информационных потоков требуются волновые линии связи и согласованные с ними скоростные интерфейсы. Большинство стандартов для систем последовательной передачи данных предусматривают включение в информационный поток дополнительной служебной информации для синхронизации этого потока. Проблема интеграции последовательных интерфейсов в структуру универсальных микросхем состоит в разнообразии стандартов для используемых каналов связи [1-4]. Основные отличия касаются методов синхронизации и уровня синфазного смещения дифференциального информационного сигнала и схемы подключения согласующих резисторов.

Целью настоящей работы является создание универсального набора функциональных блоков для приема и передачи дифференциальных сигналов, с диапазоном синфазного смещения от нуля до напряжения питания и имеющего программируемое подключение внутренних согласующих резисторов. Цель достигается применением гетероструктурных биполярных транзисторов (ГБТ) со слоями кремний-германий.

Приемник и передатчик трехуровневых сигналов

а. Элементная база

Синхронизация информационных потоков является основной проблемой, ограничивающей пропускную способность канала связи. Наиболее эффективным методом синхронизации является передача синхросигнала дополнительным уровнем. Однако, при этом возрастают требования к быстродействию и усилению используемых в схеме транзисторов. Применение ГБТ позволяет сформировать и зарегистрировать трехуровневый дифференциальный сигнал на частотах в несколько гигагерц. Для реализации проекта использованы БиКМОП технология с минимальными размерами элементов 0,18 мкм и ГБТ со слоями кремний-германий. ГБТ характеризуются граничной частотой усиления 120ГГц.

б. Передача синхросигнала дополнительным уровнем

Информация передается по согласованной экранированной парафазной линии связи. Импеданс линии связи для парафазного сигнала 100 Ом. Элементы согласования импеданса подключены к положительной шине питания. Логические уровни сигнала в линии определяются величиной выходного тока формирователя. При передаче синхроимпульса увеличивается амплитуда сигнала как для логического «0», так и для «1». Приемник имеет два канала: информационный канал регистрирует только полярность дифференциального сигнала, канал синхронизации регистрирует только изменение амплитуды без учета полярности. На рис. 1 показаны формы входного и выходного сигналов приемника. Низкочастотные сигналы синхронизации поступают в блок формирователя высокочастотных сигналов с системой фазовой автоподстройки частоты.

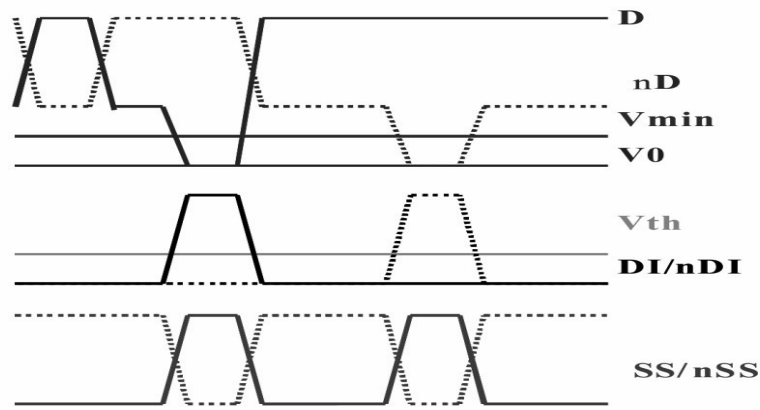


Рис. 1. Формы входного и выходного сигналов приемника

с. Приемник и передатчик многоуровневых сигналов

Приемник является критической частью системы связи, так как он должен достоверно идентифицировать состояние линии связи в условиях действия помех и рассогласования потенциалов общей шины в приемнике и передатчике [1-4]. Приемник реализован с использованием БикМОП технологии с ГБТ на основе кремний-германий. Минимальные размеры элементов 0,18 мкм. Граничная частота усиления ГБТ – 120 ГГц. Номинальное напряжение питания 3,3 В. Все ключевые элементы схемы построены на биполярных транзисторах, поликремниевых резисторах и конденсаторах со структурой металл-диэлектрик-металл. Приемник включает три основных блока: формирователь опорных напряжений (а), детектор синхросигналов (б) и детектор информационных сигналов (в), рис.2.

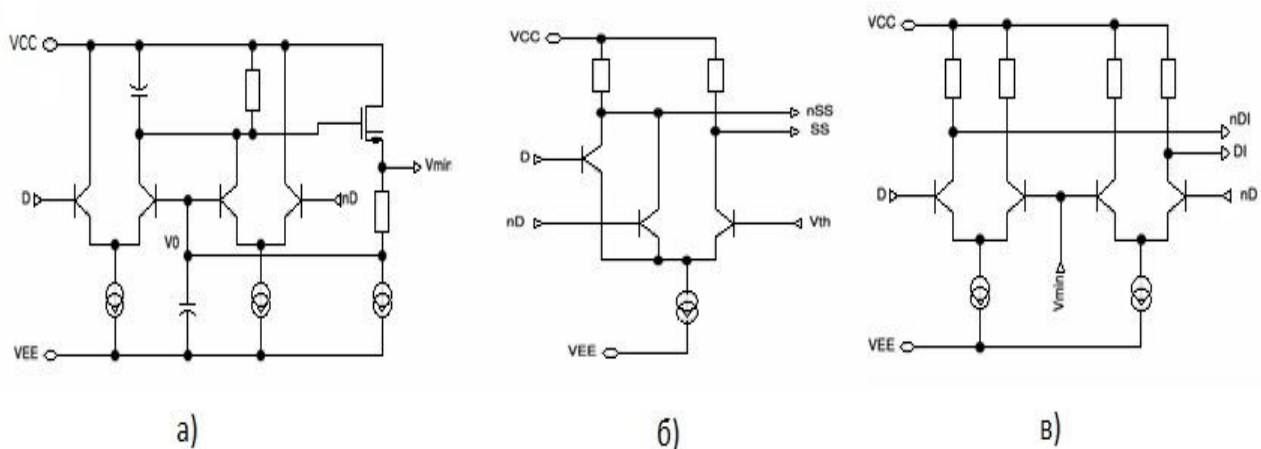


Рис. 2. Блоки приемника информационных сигналов

Формирователь опорных напряжений включает два интегрирующих дифференциальных усилителя, охваченных общей цепью отрицательной обратной связи. Цепь обратной связи включает истоковый повторитель на NМОП транзисторе и резистор смещения уровня. При стационарном режиме работы в цепи обратной связи формируется постоянное напряжение, соответствующее минимальному логическому уровню входного сигнала. Выходной сигнал формирователя снимается с резистора смещения уровня. Этот выходной опорный сигнал используется в детекторе синхросигналов для выделения импульсов с меньшей амплитудой. Детектор синхросигналов включает два компаратора напряжения, выделяющих импульсы большой амплитуды и логический элемент «ИЛИ» с парафазным выходом. Увеличение амплитуды импульса как для логического «0», так и для «1» приводит к появлению импульса на выходе детектора синхросигналов. Детектор информационных сигналов включает входной дифференциальный каскад с общей базой, источник базового тока и выходной формирователь с триггером Шмитта. Логические уровни выходного сигнала детектора не зависят от уровней и логического перепада входных сигналов. Формирователь выходных сигналов построен на двухуровневых переключателях тока. Переключатель верхнего уровня управляется информационным парафазным сигналом. Переключатель нижнего уровня управляется парафазным синхросигналом и модулирует амплитуду выходного сигнала. Согласование импедансов приемника и передатчика осуществляется на обоих концах линии связи.

d. Экспериментальные результаты

Описанные приемник и передатчик использованы в микросхемах мультиплексора из 16 каналов в 1 и демультимплексора из 1 канала в 16. Микросхемы обеспечивают преобразование и синхронизацию последовательных и параллельных информационных потоков со скоростью до 8 Гбит/сек. Микросхемы требуют один источник питания напряжением +3,3 В и потребляют около 500 мВт каждая.

Универсальный приемник дифференциальных сигналов

Согласование каналов связи в цифровых последовательных интерфейсах

Спецификация на интерфейсы типа USB (Universal Serial Bus) требует подключения согласующих резисторов к общей шине питания и уровень синфазного смещения сигналов — 230 мВ; спецификация на LVDS (Low Voltage Differential Signaling) требует подключения согласующих резисторов между сигнальными проводниками и уровень синфазного смещения — 1,2 В; прямые каналы связи между быстродействующими микросхемами типа CML (Current Mode Logic) характеризуются подключением резисторов к положительному источнику питания +3,3 В и уровнем синфазного смещения на 200 мВ ниже напряжения питания.

е. Блок программируемого подключения согласующих резисторов

В схеме предусмотрены четыре варианта подключения резисторов, рис. 3.

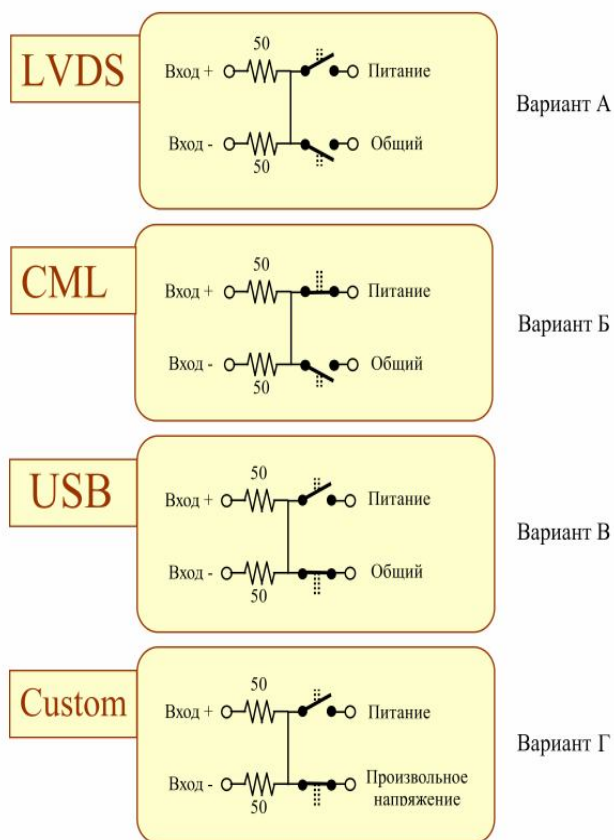


Рис. 3. Различные варианты подключения согласующих резисторов

Вариант А — соответствует спецификации на интерфейс типа LVDS. Все программируемые ключи разомкнуты, а резисторы подключены между сигнальными проводниками. Вариант Б — соответствует требованиям к каналу связи типа CML, общая точка резисторов подключена к положительной шине питания. Вариант В — соответствует спецификации на интерфейс типа USB, общая точка резисторов подключена к общей шине. Вариант Г — допускает произвольное значение синфазного смещения сигналов, согласующие резисторы подключены к дополнительной шине смещения. Проходные ключи построены с использованием NМОП и РМОП транзисторов с шириной более 1 мкм. Соотношение размеров NМОП и РМОП транзисторов обеспечивает сопротивление открытого ключа $5 \div 6$ Ом во всем диапазоне синфазных напряжений. Технологический разброс параметров элементов и изменение температуры от 20°C до 125°C приводят к максимальному отклонению суммарного сопротивления резистора и ключа $+16\%$ и -22% от номинального значения. Паразитные емкости, присутствующие в структуре микросхемы, снижают входной импеданс на 25% с увеличением частоты от 0 до 2 ГГц. Номинальное значение согласующего сопротивления 50 Ом достигается при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ и частоте входного сигнала 1 ГГц. Суммарное номинальное сопротивление поликремниевых резистора и открытого ключа на низкой частоте 56 Ом.

f. Блок регистрации дифференциального сигнала

Блок регистрации должен принимать дифференциальный сигнал с амплитудой не менее ± 150 мВ в диапазоне входных частот от нуля до 2 ГГц. Для снижения влияния помех и предотвращения возбуждения передаточная характеристика приемника должна иметь гистерезис не менее 25 и не более 125 мВ. Допустимое смещение синфазного уровня от 0,1 В до $U_{\text{пит}} - 0,1$ В.

При построении электрической схемы в быстродействующих переключателях тока использованы гетероструктурные биполярные транзисторы с резистивной нагрузкой. Статические цепи источников тока и формирователей опорных напряжений включают как ГБТ, так и КМОП транзисторы, рис. 4.

Наиболее сложная проблема – это большой диапазон синфазного смещения сигнала почти равный величине напряжения питания. Для регистрации дифференциального сигнала на уровне синфазного смещения равном напряжению питания необходимо, чтобы ГБТ не входили в режим насыщения, а напряжение коллектор-эмиттер было не менее 400 мВ. Для регистрации дифференциального сигнала на уровне синфазного смещения близком к нулю необходимо обеспечить положительное смещение входных сигналов на величину больше напряжения эмиттер-базы. В отсутствие смещения биполярные транзисторы будут закрыты и тока в нагрузке не будет. В блоке регистрации использованы два дифференциальных переключателя тока, один со смещением входного сигнала, другой без смещения. Оба дифференциальных переключателя подключены к общим нагрузочным резисторам. При отсутствии управления током переключателей изменение синфазного смещения сигнала приводит к изменению тока общих нагрузочных резисторов, а увеличение тока и напряжения на резисторах – к насыщению биполярных транзисторов.

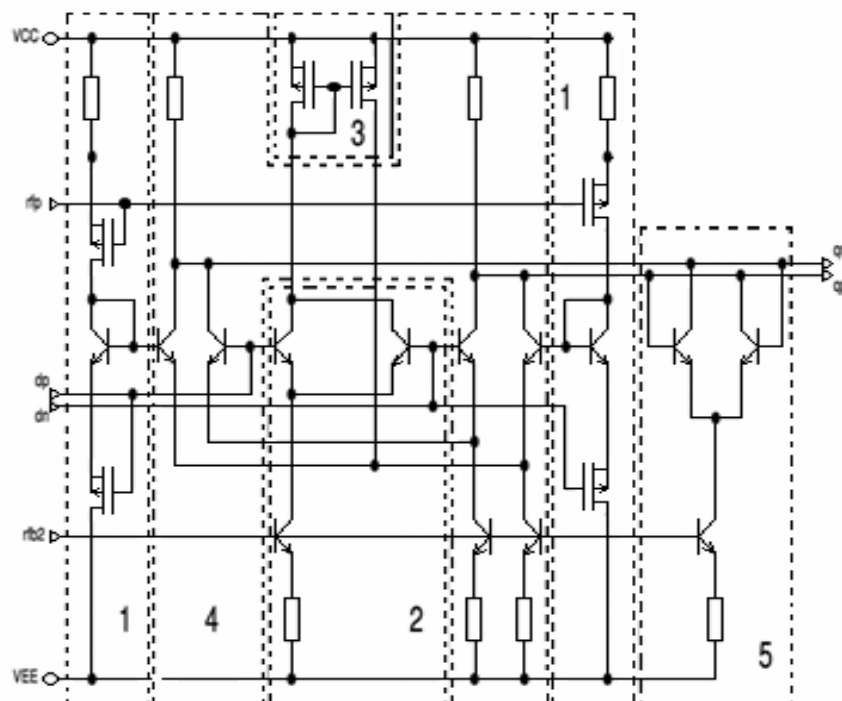


Рис. 4. Электрическая схема универсального приемника

Для стабилизации режимов работы в схему введена цепь перераспределения токов переключателей. В эту цепь входят: дополнительный источник тока, эквивалент первого переключателя без смещения входного сигнала, токовое зеркало на РМОП транзисторах и перехватывающая связь с источником тока второго переключателя. При высоком синфазном смещении первый переключатель работает в нормальном режиме, а ток эквивалента через токовое зеркало полностью компенсирует ток второго переключателя. Ток в нагрузке равен току первого переключателя. При низком синфазном смещении ток первого переключателя уменьшается, а ток второго увеличивается на ту же величину. При равенстве токов первого и второго переключателей, ток в нагрузке не зависит от смещения входного сигнала и равен току одного переключателя.

g. Триггер Шмита – формирователь гистерезиса передаточной характеристики

Устойчивость приемника к помехам обеспечивается гистерезисной передаточной характеристикой. При допустимой величине гистерезиса от 25 до 125 милливольт — номинальное значение 60 мВ.

Триггер Шмитта построен на дифференциальном переключателе тока, охваченном цепью положительной обратной связи, который подключен к общим нагрузочным резисторам входных переключателей. Величина гистерезиса регулируется соотношением токов триггера и входных переключателей. Номинальное значение тока триггера равно одной трети тока входного переключателя. Суммарный ток переключателя и триггера создает в общей нагрузке логический перепад 300 мВ, соответствующий требованиям к библиотеке логических элементов типа *CML* на основе ГБТ.

h. Преобразователь уровней сигналов *CML* в уровни КМОП

В случае необходимости согласовать дифференциальные сигналы приемника с КМОП логикой в схему включается каскад преобразования уровней, рис. 5.

Каскад включает два эмиттерных повторителя на основе ГБТ, два каскадных усилителя на РМОП транзисторах с автосмещением опорного напряжения и

триггер на КМОП транзисторах. Нагрузочные РМОП транзисторы триггера включены по схеме с общим затвором. Опорным напряжением служит напряжение питания КМОП элементов (1,8 В). Постоянный ток потребляется только цепью автосмещения. Схемы преобразователя обеспечивает быстродействие не менее 1,5 ГГц.

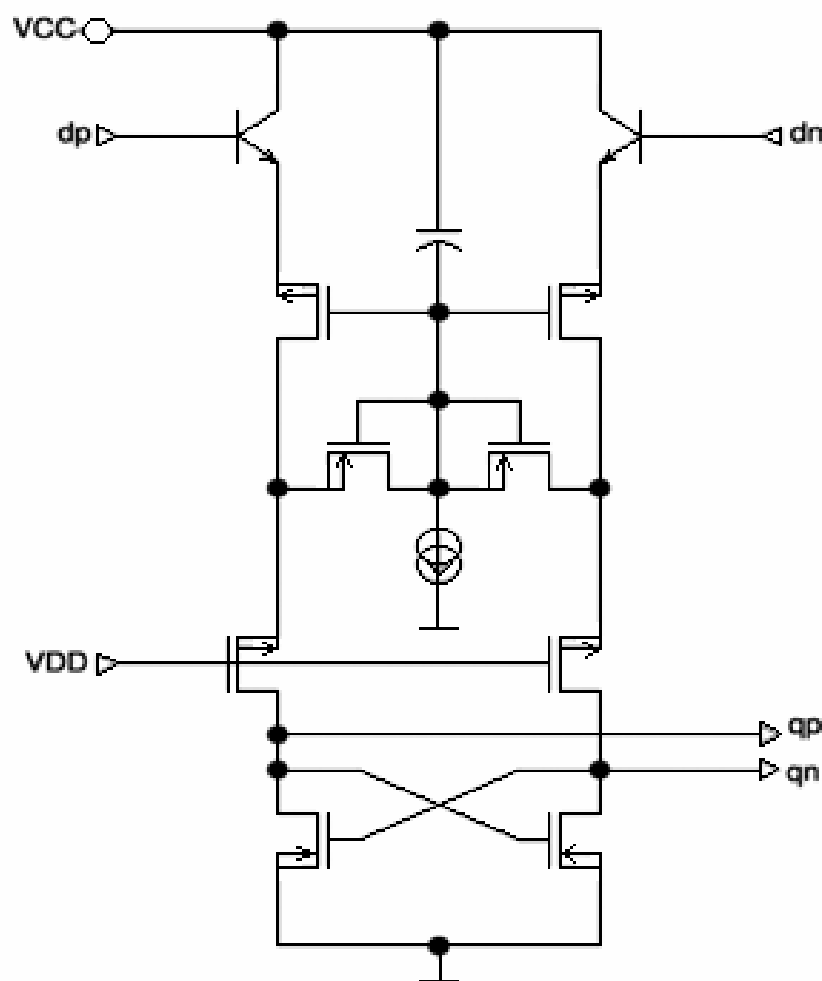


Рис. 5. Электрическая схема каскада преобразования уровней

i. Экспериментальные исследования

Универсальный преобразователь входных дифференциальных сигналов практически реализован в составе тестового кристалла. Измерения образцов подтверждают адекватность модели преобразователя и соответствие измеренных параметров их расчетным значениям. Результаты измерений и расчетные

значения параметров приведены в табл. 1. Универсальный преобразователь входных дифференциальных сигналов обеспечивает совместимость с любыми типами высокоскоростных последовательных интерфейсов (*LVDS*, *USB* и др.). Выходные уровни преобразователя адаптируются к уровням внутренних логических элементов микросхем типа *CML*, *CMOS* и др. Максимальная рабочая частота не менее 1,5 ГГц, потребляемая мощность не более 2 мВт.

Таблица 1. Параметры универсального преобразователя.

Параметры		Расчетные значения		Измеренные значения		Единицы
Имя	Обозначение	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	
Напряжение питания	V_{CC}	2,75	3,5	2,7	3,5	В
Синфазное напряжение смещения	V_{CM}	-0,4	$V_{CC}+0,1$	-0,7	$V_{CC}+0,1$	В
Дифференциальный гистерезис	V_{hyst}	40	-	60	-	мВ
Чувствительность	ΔV_{IN_SE}	± 20	-	± 30	-	мВ
Частота сигнала	f_{IN}	0	1	0	1,5	ГГц
Токопотребление	I_{VCC}	0,5	0,6	-	0,56	мА

Энергоэффективный LVDS передатчик

Энергоэффективность линии связи LVDS

Наиболее распространенным скоростным интерфейсом для локальных связей в цифровых устройствах является Low-Voltage Differential Signaling (LVDS) [1, 2]. Дифференциальный сигнал LVDS передается парой экранированных проводов с волновым сопротивлением 50 Ом. Основное преимущество LVDS интерфейса – это небольшой логический перепад сигнала - 250÷400 мВ [1].

Это позволяет снизить потери энергии в линии связи. Кроме того, допускается достаточно большое синфазное смещение дифференциального сигнала, что очень важно при различии потенциалов общей шины в приемнике и передатчике. Кроме энергии на передачу сигнала требуется дополнительная энергия на согласование импедансов приемника, передатчика и линии связи. Со стороны приемника согласующий резистор с номиналом 100 Ом подключается между сигнальными проводниками. Сопротивление передатчика для каждого выхода должно быть 50 Ом [2].

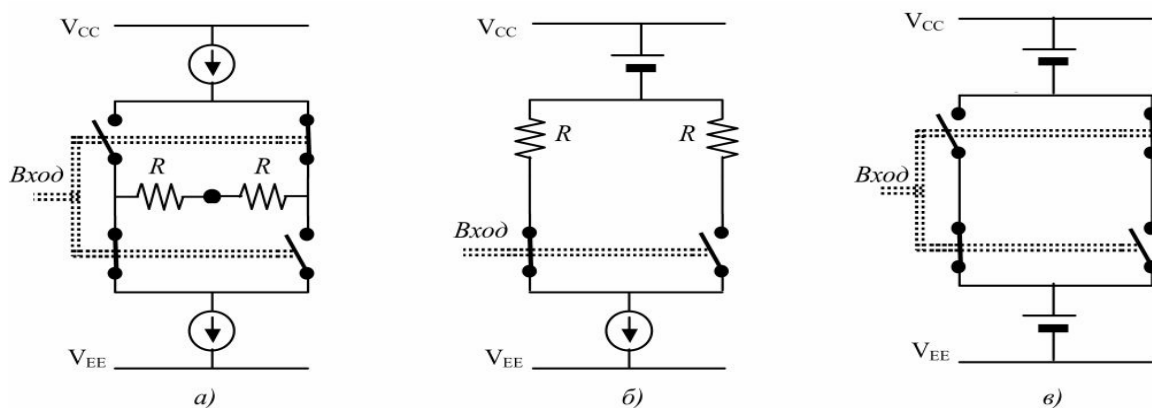


Рис. 6. Эквивалентные схемы выходного каскада передатчика LVDS

ж. Варианты построения передатчиков

Стандарт [5] определяет ряд важных параметров LVDS передатчика:

- 1) логический перепад 325 ± 75 мВ;
- 2) уровень синфазного смещения дифференциального сигнала $1,125 \pm 0,2$ В;
- 3) выходное сопротивление каждого выхода на низкой частоте от 40 до 140 Ом;
- 4) разность выходных сопротивлений дифференциальных выходов не более 6%.

Выходной каскад передатчика содержит низкоомные транзисторные ключи, коммутирующие линии связи с источниками тока или напряжения. Возможны три основных варианта построения выходного каскада. В первом варианте (рис. 6а) линии связи переключаются между источниками втекающего и вытекающего токов. Для согласования импедансов между линиями связи включаются дополнительные резисторы. Требуемая величина синфазного смещения сиг-

налов достигается наличием обратной связи с одним из источников тока. Это решение самое простое и распространенное. Основным недостатком является удвоение выходного тока, вызванное дополнительными согласующими резисторами. Во втором варианте (рис. 6б) ключи коммутируют линии связи только с одним источником тока. Согласующие резисторы постоянно подключены к источнику напряжения. При волновом сопротивлении экранированного проводника 50 Ом согласующие сопротивления также должны быть по 50 Ом. Ток для согласования импедансов будет вдвое больше тока линии связи. Это решение самое простое, но энергетически невыгодное. Применяется очень редко. В третьем варианте (рис. 6в) ключи коммутируют линии связи между источниками напряжения. Согласующие резисторы включены последовательно с линией связи. Выходное сопротивление передатчика является суммой сопротивлений источника напряжения, транзисторного ключа и согласующего резистора. Это решение самое сложное, но обеспечивает минимальный выходной ток, равный току в линии связи.

к. Схемотехника энергоэффективного LVDS передатчика

На рис. 7 приведена схема быстродействующего передатчика, построенного на КМОП и биполярных транзисторах. Схема содержит входной усилительный и выходной коммутирующий каскады. На входы $I_{пп}$, $I_{пр}$ поступает дифференциальный сигнал с амплитудой $0,3 \div 0,4$ В с выхода переключателя тока с резистивной нагрузкой. Эмиттерные повторители смещают этот сигнал примерно на два вольта, что обеспечивает нормальную работу первого усилительного каскада. Ключевые транзисторы выходного каскада переключаются в противофазе и коммутируют выходные цепи со стабилизируемыми источниками напряжения.

Для стабилизации опорных коммутируемых напряжений V_H , V_L использованы быстродействующие операционные усилители. Согласующие резисторы R_S включены последовательно в выходные цепи. Нелинейность сопротивления верхних коммутирующих ключей Q_5 , Q_6 компенсируется резисторами R_5 и R_6 .

Ограничение насыщения и нелинейность сопротивления нижних ключей (Q_7 , Q_8) компенсируются резисторами R_9 , R_{10} и диодами D_1 , D_2 . Величина логического перепада определяется резисторами R_7 , R_8 . Синфазное смещение сигнала задается опорными напряжениями на входах операционных усилителей V_{RH} , V_{RL} . Схема передатчика достаточно сложная и требует оптимизации параметров элементов для достижения требуемых выходных параметров передатчика.

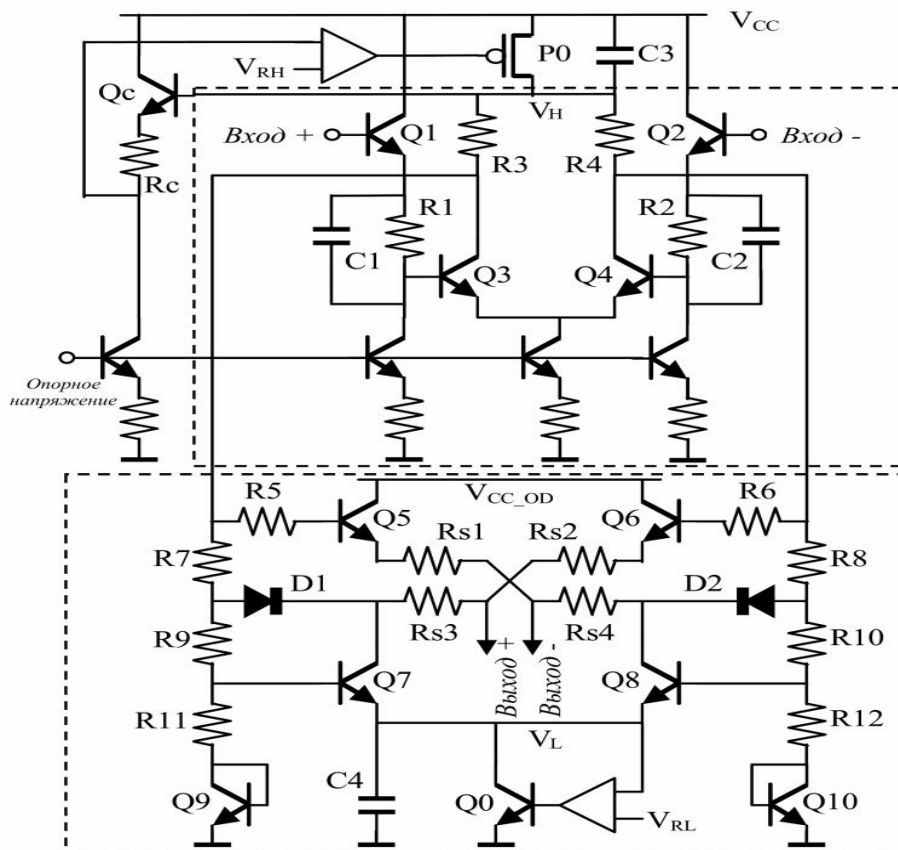


Рис. 7. Электрическая схема энергоэффективного передатчика LVDS.

I. Экспериментальные исследования LVDS передатчика

LVDS передатчик реализован в составе тестового кристалла, изготовленного по БиКМОП технологии с минимальными размерами элементов 0,35 мкм. Би-полярные гетероструктурные транзисторы со слоем кремний-германий в базе характеризуются граничной частотой усиления 50 ГГц [3]. Измерения тестовых кристаллов показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных параметров. Расчетное значение максимальной выходной частоты дифференци-

ального сигнала 1,2 ГГц. Подтвердить быстродействие измерениями удалось до частоты 800 МГц. Измерения сигналов более высоких частот не проводилось из-за ограничений параметров измерительной аппаратуры. Основные параметры передатчика приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры LVDS передатчика

№	Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметра			
			Стандарт, минимум	Стандарт, максимум	Расчёт	Изм.
1	Напряжение питания	В	3,1	3,5	3,3±0,2	3,3±0,2
2	Выходное дифф. напряжение	В	0,25	0,40	0,28÷0,36	0,27÷0,30
3	Напряжение смещения вых. сигнала	В	1,125	1,275	1,16	1,15
4	Выходной импеданс на низкой частоте	Ом	40	140	47÷117	88÷95
5	Выходной импеданс на высокой частоте	Ом	40	140	43÷123	52÷88
6	Потребляемый ток на высокой частоте	мА	-	-	4,1÷5,6	4,4÷5,2
7	Выходной ток при замыкании выхода на общую шину	мА	-	40	16,5	21÷22
8	Выходной ток при замыкании выходов между собой	мА	-	12	6,5	5,4÷5,6
9	Диапазон выходных частот	МГц	-	-	500	500

Заключение

Применение гетероструктурных биполярных транзисторов в приемопередающих блоках цифровых последовательных интерфейсов позволяет значительно улучшить их технические характеристики и дает новые возможности для повышения скорости передачи информации.

Библиографический список

1. “Universal Serial Bus Specification”, Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC, Philips, Revision 2.0, April 27, 2000.
2. “InfiniBand™ Architecture Specification”, Volume 1 and 2, Release 1.1 November 6, 2002, Final.
3. “RapidIO™ Interconnect Specification”, Part VI: Physical Layer 1x/4x LP-Serial Specification, Rev. 1.2, 06/2002.
4. IEEE Standard 802.3ae-2002, Publication Date: 2002 Page(s): 0_1-516E-ISBN: 0-7381-3288-3 ISSN: ISBN: 0-7381-3287-X Year: 2002.
5. “Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits”, ANSI/TIA/EIA-644-1995, Telecommunications Industry Association, March 1996.

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В СОЕДИНЕНИЯХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН СТАНДАРТА G.655

Бартышов В.В., Прохоров В.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Одной из составляющих потерь в соединениях одномодовых оптических волокон (ОВ), вызываемых внешними факторами, являются потери за счет наличия воздушного промежутка (зазора) между торцами сращиваемых световодов (см. рис. 1). В этом случае возникают дополнительные френелевские потери, обусловленные частичными отражениями светового потока на границе раздела сердцевина волокна – зазор. Учет наличия перехода волокно–зазор–волокно позволяет оценить как величину вносимых потерь за счет френелевских отражений от торцов сращиваемых волокон, так и величину возвратных потерь, обусловленных появлением отраженного в обратном направлении светового потока.

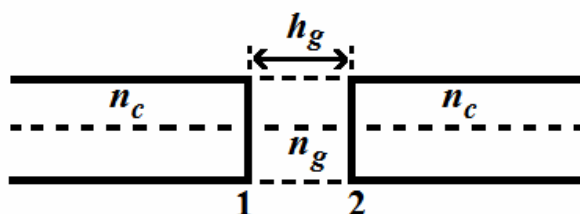


Рис. 1. Торцевое соединение ОВ

(n_c и n_g – показатели преломления сердцевины и зазора, соответственно; h_g – толщина зазора).

В работе [1] предложена методика расчета потерь в соединениях ОВ при наличии зазора между их торцами с учетом интерференционных явлений и свойств среды в зазоре, а также ширины спектра излучения источника. В данной работе указанная методика используется для численной оценки вносимых и возвратных потерь в соединениях типовых ОВ, удовлетворяющих рекомендации G.655 [2]. В соответствии с этим для рабочей длины волны $\lambda_0 = 1550$ нм

рассматривается одномодовое ОВ на основе кварцевого стекла с показателем преломления сердцевины $n_c = 1,468$ и диаметром $d = 8,3$ мкм.

Согласно исходной методике [1] рассматриваются процессы отражения и преломления электрической компоненты E_0 поля фундаментальной волноводной моды в зазоре между двумя волокнами при условии нормального падения волны на торец. Напряженность электрического поля в прошедшей волне будет складываться из напряженностей прошедших зазор волн, испытавших различное количество переотражений между торцами волокон:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_0 \cdot \tau_{1l} \cdot \tau_{2l} \cdot \exp(-i\omega_0 n_g h_g)}{1 - r_{2l} \cdot r_{1r} \cdot \exp(-i\omega_0 n_g 2h_g)}$$

где величины τ и ρ – коэффициенты пропускания и отражения от торцов входного 1 и выходного 2 волокон при падении света слева (l) или справа (r) [3]:

$$\tau_{1l} = 2n_c / (n_c + n_g), \quad \tau_{2l} = 2n_g / (n_c + n_g), \quad \rho_{2l} = \rho_{1r} = (n_g - n_c) / (n_c + n_g); \quad (1)$$

$\omega_0 = 2\pi/\lambda_0$; n_g – показатель преломления среды зазора; h_g – толщина зазора.

Интенсивность излучения в прошедшей в выходное ОВ волне с учетом соотношений (1) принимает вид

$$I_{\text{пр}} = |E_{\text{пр}}|^2 = E_0^2 \cdot \frac{4n_c^2 n_g^2}{4n_c^2 n_g^2 + (n_g^2 - n_c^2)^2 \cdot \sin^2(\omega_0 n_g h_g)}$$

С учетом того, что интенсивность излучения в падающей волне равна $I_{\text{пад}} = E_0^2$, для вносимых потерь $\delta = -10 \cdot \lg(I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}})$ в соединении ОВ получаем следующее выражение:

$$\delta(n_g, h_g) = -10 \cdot \lg \left(\frac{4n_c^2 n_g^2}{4n_c^2 n_g^2 + (n_g^2 - n_c^2)^2 \cdot \sin^2(\omega_0 n_g h_g)} \right). \quad (2)$$

Результаты расчета вносимых потерь (2) в зависимости от показателя преломления среды в зазоре приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что амплитуда осцилляций резко уменьшается на двух интервалах изменения показателя преломления зазора: $n_g \in (1,46; 1,48)$ и $n_g \in (1,54; 1,56)$, для которых величина

вносимых потерь не превышает 0,0002 дБ и 0,002 дБ, соответственно, для всех возможных значений толщины зазора из диапазона $h \in (1; 10)$ мкм. В силу этого для получения некоторых типовых зависимостей в последующем используется в качестве иммерсионной среды в зазоре обезвоженный глицерин с показателем преломления $n_g = 1,478$.

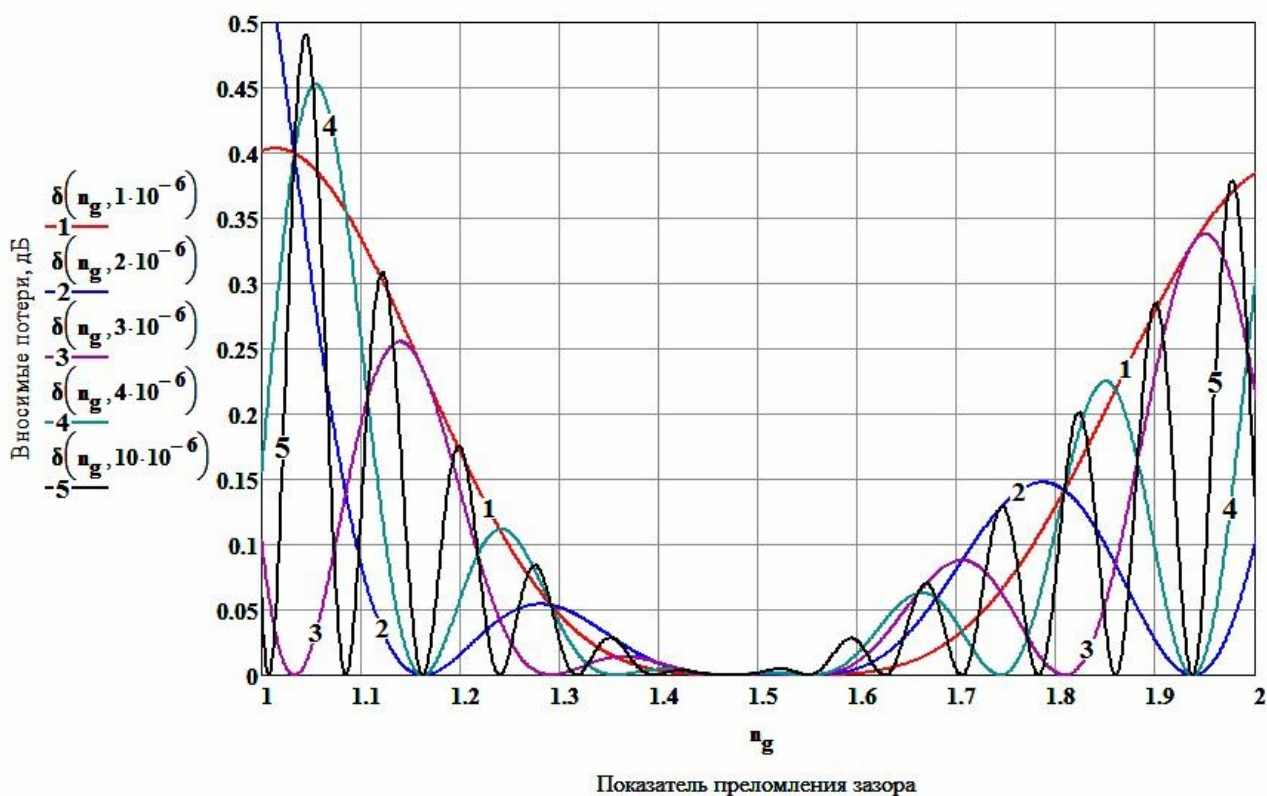


Рис. 2. Зависимость вносимых потерь от показателя преломления зазора $\delta(n_g)$ при различных значениях толщины зазора $h_g = 1, 2, 3, 4, 10$ мкм.

На рис. 3 приведены типовые зависимости вносимых потерь (2) от толщины зазора между ОВ для первого типового интервала $n_g \in (1,46; 1,48)$. Из рис. 3 видно, что вносимое затухание осциллирует с постоянной амплитудой практически независимо от величины зазора.

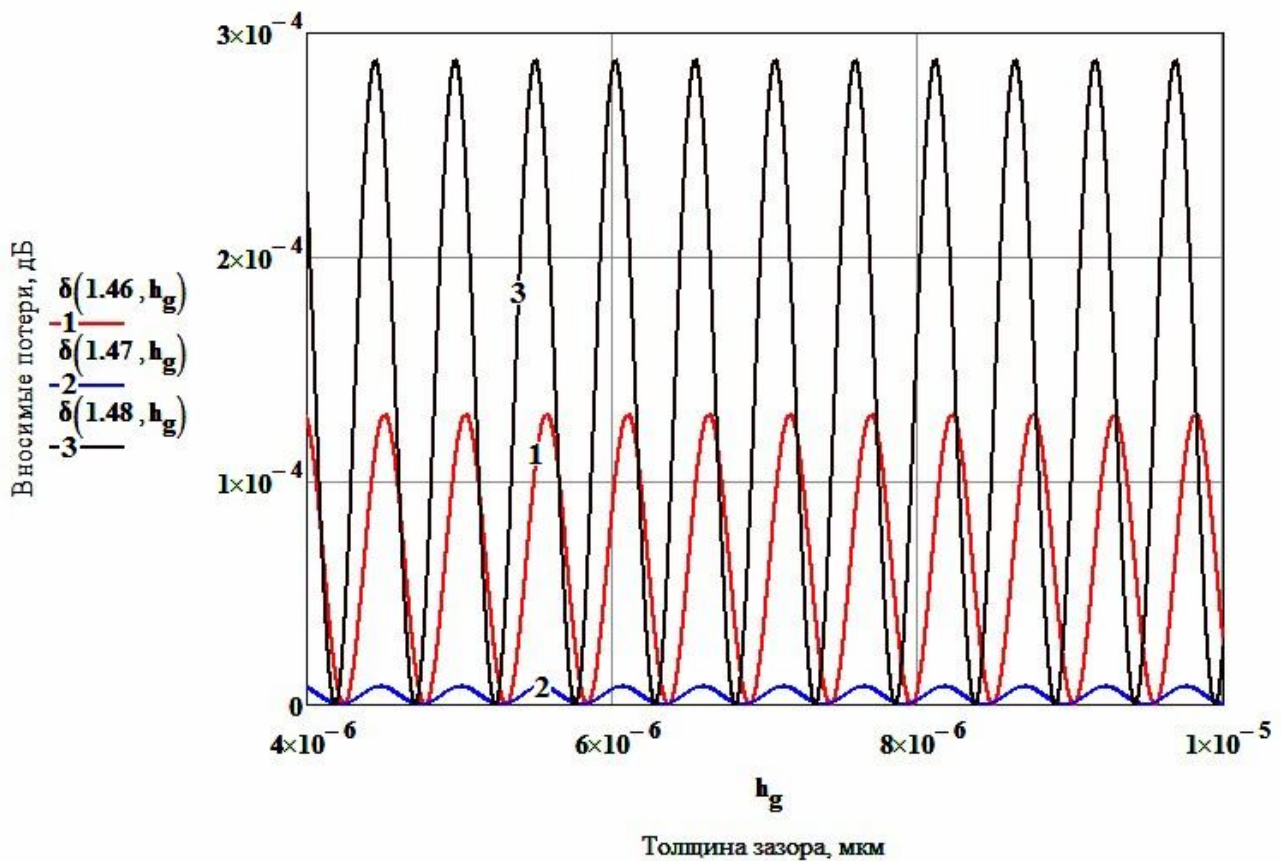


Рис. 3. Зависимость вносимых потерь от толщины зазора $\delta(h_g)$ при различных значениях показателя преломления зазора $n_g = 1,46; 1,47; 1,48$.

Оценим теперь влияние спектра источника излучения, аппроксимируя его гауссовой кривой:

$$F(\lambda, \Delta\lambda) = \frac{\exp\left\{-\left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right]^2\right\}}{\int_{\lambda_0 - 10 \cdot \Delta\lambda}^{\lambda_0 + 10 \cdot \Delta\lambda} \exp\left\{-\left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right]^2\right\} d\lambda},$$

где λ_0 – центральная длина волны (1550 нм); $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника. В этом случае интенсивности излучения в падающей и прошедшей волне будут определяться следующими выражениями:

$$I'_{\text{пад}} = \int_{\lambda_0 - 10 \cdot \Delta\lambda}^{\lambda_0 + 10 \cdot \Delta\lambda} I_{\text{пад}} \cdot F(\lambda, \Delta\lambda) d\lambda; \quad I'_{\text{пр}} = \int_{\lambda_0 - 10 \cdot \Delta\lambda}^{\lambda_0 + 10 \cdot \Delta\lambda} I_{\text{пр}} \cdot F(\lambda, \Delta\lambda) d\lambda.$$

Отсюда рассчитываются вносимые потери в зазоре с учетом ширины

спектра источника излучения:

$$\delta(\Delta\lambda, n_g, h_g) = -10 \cdot \lg \left(\frac{\int_{\lambda_0-10\cdot\Delta\lambda}^{\lambda_0+10\cdot\Delta\lambda} \frac{4n_c^2 n_g^2}{4n_c^2 n_g^2 + (n_g^2 - n_c^2)^2 \cdot \sin^2(\omega_0 n_g h_g)} F(\lambda, \Delta\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0-10\cdot\Delta\lambda}^{\lambda_0+10\cdot\Delta\lambda} F(\lambda, \Delta\lambda) d\lambda} \right). \quad (3)$$

Следует отметить, что соотношение (3) является приближенным, поскольку в нем не учитываются дисперсионные свойства сред сердцевины ОВ и зазора. На рис. 4 приведены результаты расчета вносимых потерь (3) с использованием иммерсионного слоя в зазоре ($n_g = 1,46; 1,47; 1,48$) для широкополосного источника излучения ($\Delta\lambda = 100$ нм).

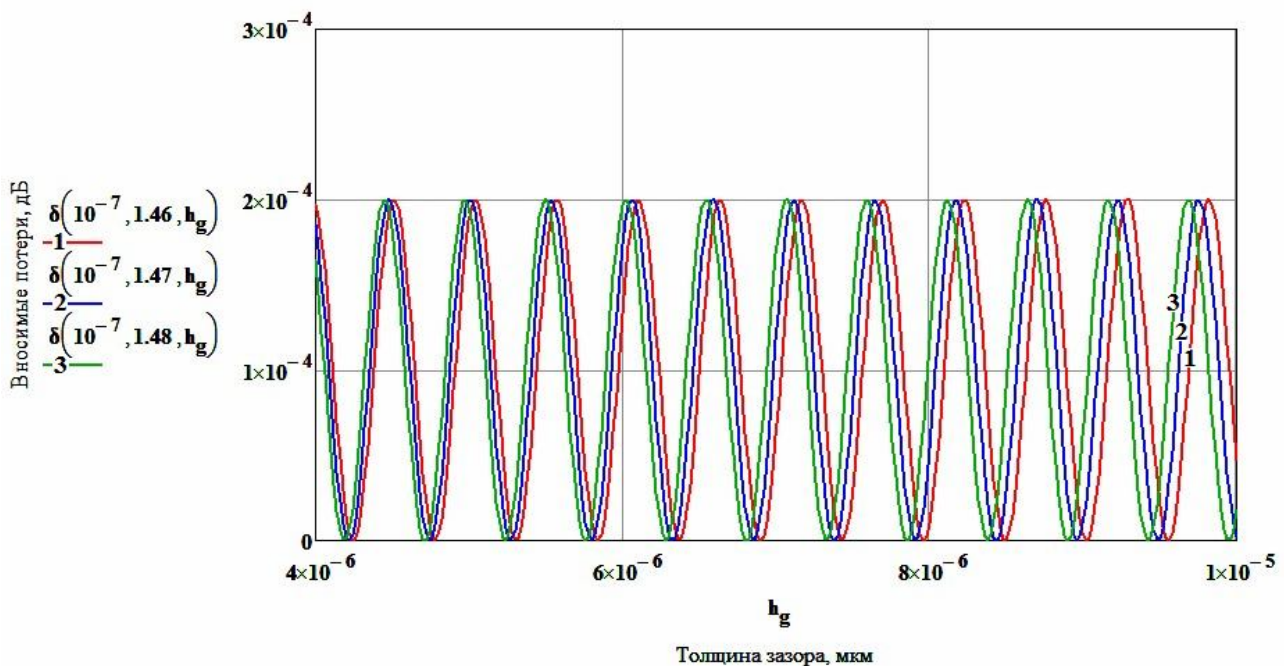


Рис. 4. Зависимость вносимых потерь $\delta(\Delta\lambda, n_g, h_g)$ от толщины зазора h_g с учетом ширины спектра $\Delta\lambda$ источника излучения

Очевидно, что по сравнению с аналогичными результатами для монохроматического источника (рис. 3) в данном случае имеет место резко выраженное усреднение вносимых потерь, причем величина достигаемой полосы усредне-

ния $\Delta\delta \in (0; 0.0002)$ дБ совершенно не зависит от ширины спектра $\Delta\lambda$ – зависимости $\delta(\Delta\lambda)$ для узкополосных источников ($\Delta\lambda = 1$ нм и 10 нм) выглядят точно так же, как и приведенные на рис. 4.

Совершенно аналогично можно рассчитать величину возвратных потерь, обусловленных появлением отраженного в обратном направлении (т.е. в ОВ 1, см. рис.1) светового потока $I_{отр}$. Возвратные потери $\delta_B = -10 \cdot \lg(I_{отр}/I_{пад})$ имеют следующий вид:

$$\delta_B(n_g, h_g) = -10 \cdot \lg \left(\frac{(n_g^2 - n_c^2)^2 \cdot \sin^2(\omega_0 n_g h_g)}{4n_g^2 n_c^2 + (n_g^2 - n_c^2)^2 \cdot \sin^2(\omega_0 n_g h_g)} \right). \quad (4)$$

Результаты расчета возвратных потерь (4) в зависимости от показателя преломления среды в зазоре приведены на рис. 5.

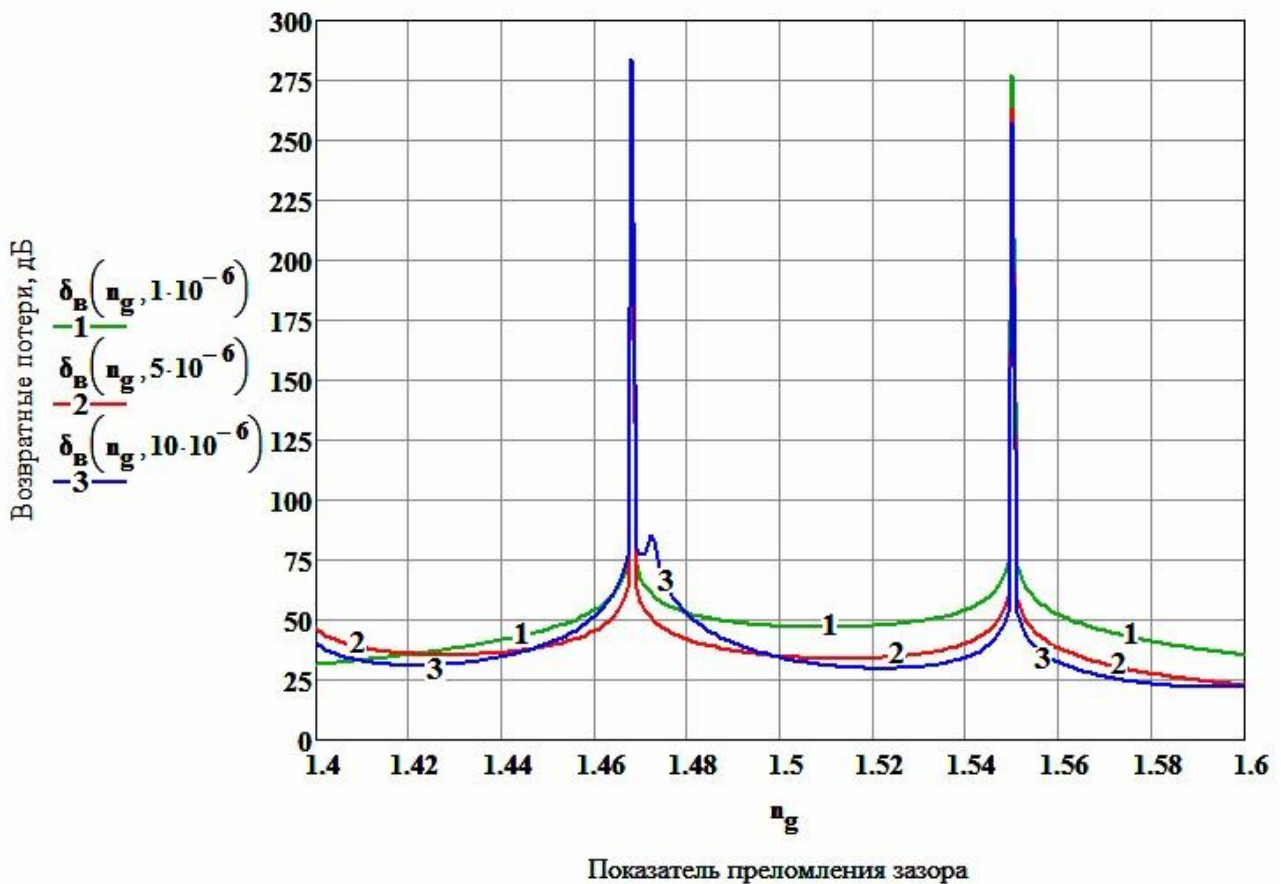


Рис. 5. Зависимость возвратных потерь от показателя преломления зазора при различных значениях толщины зазора $h_g = 1, 5, 10$ мкм.

Из рисунка видно, что величина возвратных потерь на отмеченных ранее интервалах изменения показателя преломления зазора: $n_g \in (1,46; 1,48)$ и $n_g \in (1,54; 1,56)$ составляет, как минимум, 43,5 и 32 дБ, соответственно. Существующие рекомендации для типовых ОВ требуют, чтобы возвратные потери составляли величину не менее 40 дБ [2]. Надлежащим подбором необходимых параметров зазора можно добиться того, чтобы эти жесткие требования были успешно удовлетворены. Наглядной иллюстрацией этому служат рис.6 и 7, на которых представлены зависимости вносимых и возвратных потерь для предпочтительного интервала показателей преломления иммерсионной среды зазора.

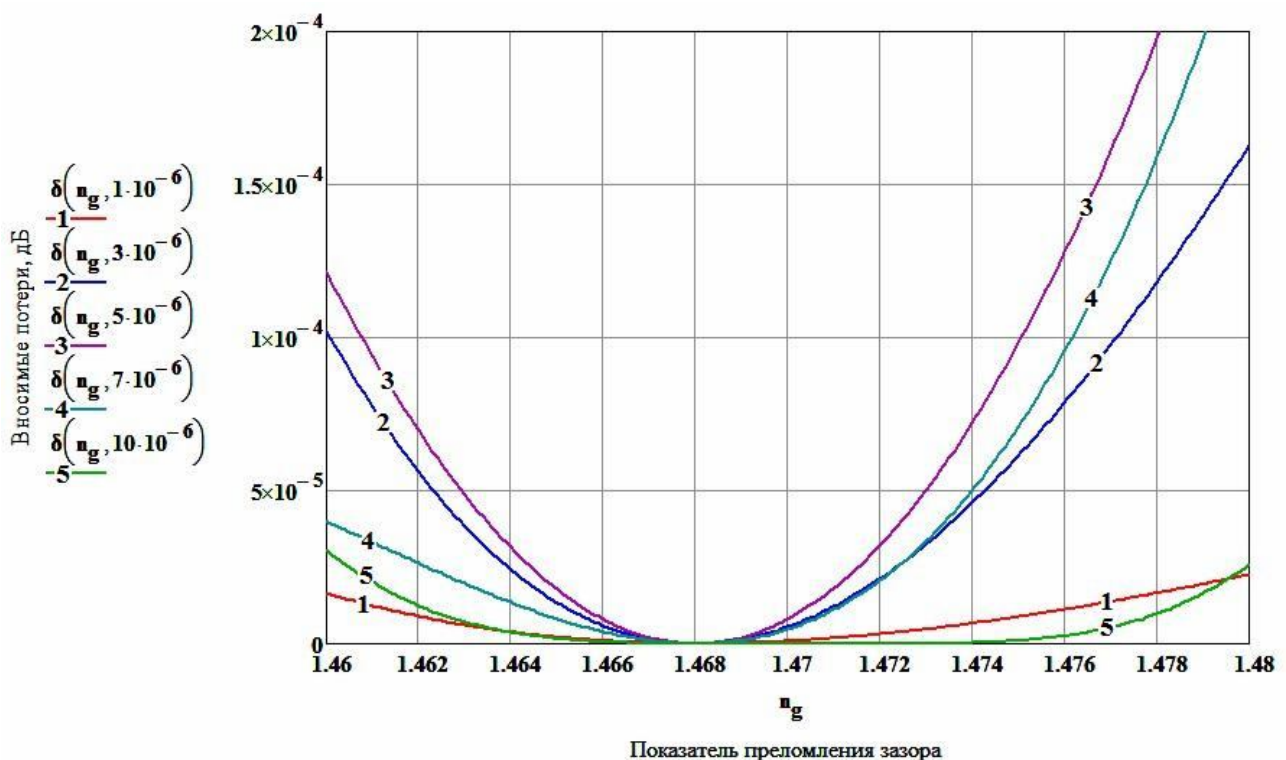


Рис. 6. Зависимость вносимых потерь от показателя преломления зазора $\delta(n_g)$ при различных значениях толщины зазора $h_g = 1, 3, 5, 7, 10$ мкм.

Зависимость возвратных потерь от толщины зазора при $n_g = \text{const}$ демонстрирует осциллирующий характер в пределах фиксированного диапазона значений. В частности, для иммерсионного обезвоженного глицерина данная полоса значений возвратных потерь составляет $\delta_v(1,478; h_g) \in (43,5; 110)$ дБ для

толщин зазора $h_g \in (1; 10)$ мкм.

Таким образом, для стандарта G.655 вносимые и возвратные отражательные френелевские потери в соединениях ОВ являются ничтожно малыми и практически могут не приниматься во внимание.

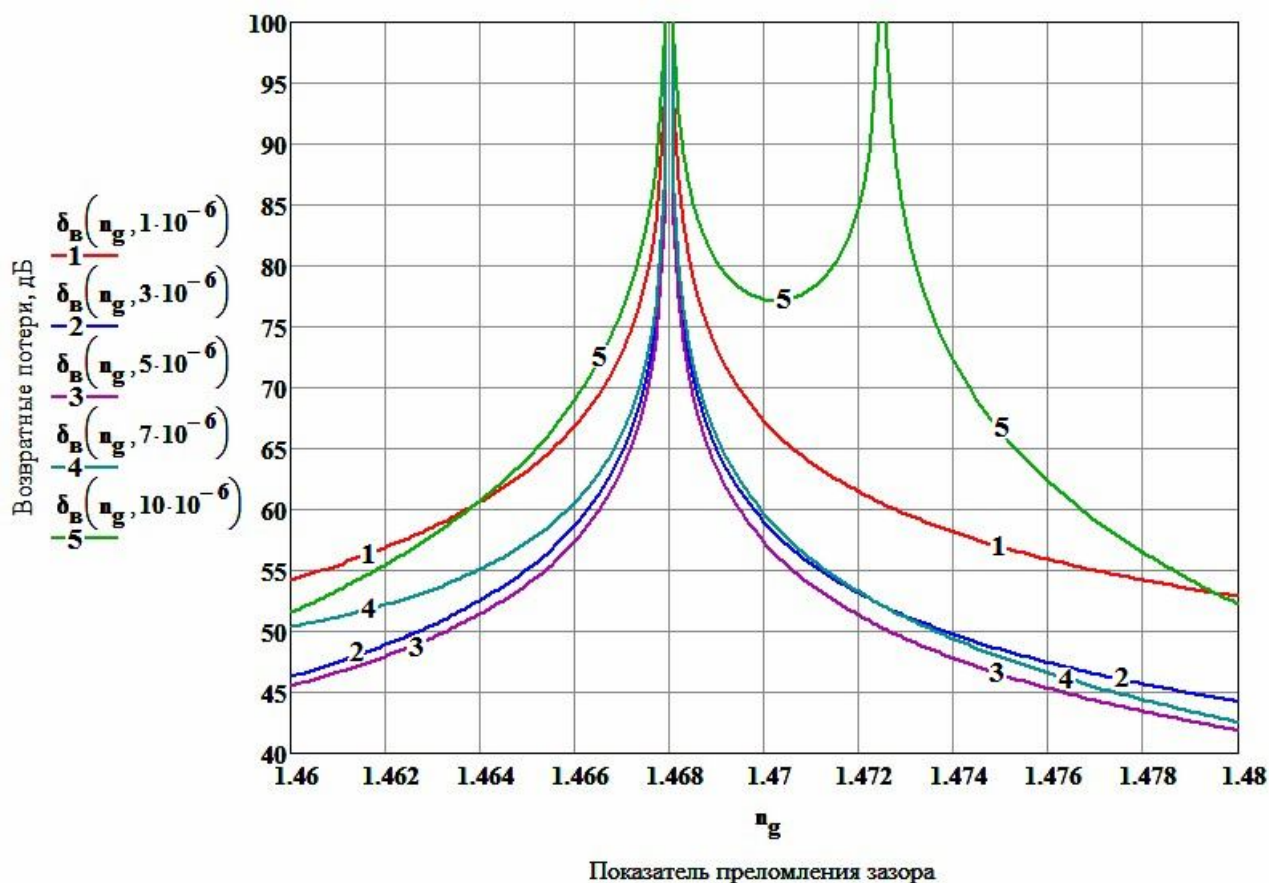


Рис. 7. Зависимость возвратных потерь от показателя преломления зазора $\delta_B(n_g)$ при различных значениях толщины зазора $h_g = 1, 3, 5, 7, 10$ мкм.

Библиографический список

1. Павлова Н. Н., Глаголев С. Ф., Былина М. С. Теоретическое исследование потерь в соединениях одномодовых оптических волокон // Фотон-Экспресс. 2007. № 7. С. 36–38.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 590 с.
3. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. – СПб.: Лань, 2008. – 480 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГРАФИЧЕСКОМ ФОРМАТЕ

Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Реутов В.В.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Задачи программного обеспечения тепловизионного оборудования

Тепловидение является одной из самых перспективных наукоемких технологий XXI века. Являясь дальнейшим развитием приборов и систем технического зрения, тепловизоры в перспективе будут иметь более широкое распространение, чем предыдущее поколение, ориентированное на видимый диапазон. Термографический образ (термограмма) – изображение объекта, полученное камерой, улавливающей инфракрасное излучение объекта. Для получения термографических изображений используются специальные тепловизионные камеры (или тепловизоры). Различные системы диагностики и контроля на базе тепловизора нашли широкое применение в промышленности и технике (неразрушающий контроль, техническая и медицинская диагностика), в силу того, что применение тепловизоров абсолютно безопасно и дает практически готовый анализ состояния оборудования уже на момент проведения инфракрасной диагностики.

Тепловизоры являются оптико-электронными измерительными приборами, работающими в инфракрасной области электромагнитного спектра [1]. Тепловое излучение от исследуемого объекта через оптическую систему передается на приемник, представляющий собой матрицу термоэлектрических детекторов. Далее полученный сигнал, посредством электронного блока измерения, регистрации и математической обработки оцифровывается и отображается на экране ЖК монитора тепловизора или персонального компьютера. В большинстве современных моделей используются неохлаждаемые детекторы излучения.

В электронном блоке тепловизоров осуществляется ряд преобразований сигнала приемника ИК излучения в реальном времени, а также вывод сигнала в

форме удобной для его визуализации. Обычно эти функции выполняет микропроцессор с помощью специализированного программного обеспечения. Микропроцессор выполняет поддержку метрологических характеристик тепловизоров на требуемом уровне, предварительную обработку изображений с целью снизить "белый" шум, например, усреднение по нескольким кадрам. Основная обработка тепловизионной информации, в особенности при использовании быстродействующих тепловизоров, осуществляется не в реальном времени, а с помощью специальных компьютерных программ. Таким образом, программное обеспечение (ПО) тепловизоров можно разделить на внутреннее и внешнее.

С помощью внутреннего ПО формат приемника ИК излучения преобразуется в телевизионный формат для вывода информации через аналоговый порт, или в цифровой формат порта ввода-вывода компьютера. Большинство современных тепловизоров имеют стандартный видеовыход или цифровой выход. Построение изображения на ЖК мониторе тепловизора выполняется с помощью внутреннего ПО.

Внешнее ПО обеспечивает согласование тепловизора с компьютером, стандартную или специализированную обработку изображений и генерирование отчетов. Оно позволяет проводить анализ термограмм, в частности, изменять основные установки тепловизора (коэффициент излучения, диапазон измерения и т.д.), определять среднюю температуру в областях различной формы, строить профили, изотермы, гистограммы и т.п. При составлении отчетов возможно введение видимых изображений, полученных с помощью видео или цифровой камеры. Внешнее программное обеспечение поставляется в комплекте с тепловизором.

Цифровая обработка и анализ термограмм по числовым значениям сигнала позволяют распознать и выделить как локальные элементы, так и целые области изображения, которые не поддаются обнаружению и описанию простыми визуальными методами. Кроме того, компьютерная обработка информации делает возможным количественный анализ изображения, т.е. позволяет дать чис-

ленную оценку характеристикам исследуемых областей и ввести критерии их классификации. Применение такого подхода, например, в медицинских диагностических исследованиях решает проблему количественного описания степени тяжести заболевания.

Разработка методик количественной диагностики на основе цифрового анализа термограмм встречается с рядом принципиальных трудностей, обусловленных спецификой электронной системы сбора и построения изображения. Одной из таких проблем являются помехи оцифрованного сигнала, на основе которого строится изображение, искажающие полезную информацию. Поэтому при разработке программных модулей для отображения информации особое внимание уделяется повышению качества и информативности термограмм путем снижения влияния случайных помех, усиления цветовых контрастов, выделения наиболее существенной информации об исследуемом объекте.

Кадр данных ИК детектора состоит из $N \times M$ точек. Каждой точке соответствует цифровое значение сигнала $I(X, Y)$ или эквивалентной ему температуры $T(X, Y)$, где $X=0, \dots, N-1$, $Y=0, \dots, M-1$. Каждый кадр записывается на диск компьютера в виде файла. Формат файла может быть текстовым, содержащим M строк, в каждой из которых последовательность N действительных чисел (значений температуры), разделённых запятыми, графическим или специальным форматом фирмы-производителя ИК детектора.

Термограммы вставляются в отчеты в графической форме, построенной с помощью отображения значений температуры в каждой точке в некоторое пространство цветов. Внешнее ПО позволяет представить каждую термограмму в различных цветовых палитрах и выбрать наиболее подходящую из них. Обратная задача (определение значений температуры по цветовым составляющим каждого пикселя термографического изображения), не решается программным обеспечением тепловизоров.

Целью работы является создание компьютерной программы определения значений температуры в каждой точке термограммы, представленной в графическом формате.

Программа определения значений температуры из тепловизионных изображений в графическом формате

Для построения графических форматов тепловизионных изображений наиболее часто используется цветовая модель RGB. В RGB модели каждый цвет представляется тремя компонентами (первичными основными цветами): красным R, зеленым G и синим B. Математическое преобразование, соответствующее отображению действительных значений температуры $T(X, Y)$ в точке с координатами X, Y ($X=0, \dots, N-1, Y=0, \dots, M-1$) в цветовое пространство RGB имеет вид

$$R(X, Y) = F_R(T(X, Y)), G(X, Y) = F_G(T(X, Y)), B(X, Y) = F_B(T(X, Y)). \quad (1)$$

Функции $F_R(T(X, Y)), F_G(T(X, Y)), F_B(T(X, Y))$ принимают целочисленные значения в диапазоне от 0 до 255. Область действительных значений температуры отображается в пространство целых чисел, поэтому преобразование (1) в общем случае не является взаимно однозначным.

Вид функций $F_R(T(X, Y)), F_G(T(X, Y)), F_B(T(X, Y))$ определяет цветовую палитру изображения. Пространство RGB содержит $n = (256)^3 = 16777216$ различных точек. Множество \mathfrak{Z} значений температуры $T(X, Y)$ конечно. Пусть m – число различных значений температуры в множестве \mathfrak{Z} . Если $m \leq n$, то возможно построить взаимно однозначное отображение (1).

Большинство используемых в практике тепловизионных исследований цветных палитр не обеспечивает взаимно однозначного соответствия между температурой и ее цветовым образом. В этом случае задача определения значений температуры по цветовым составляющим каждого пикселя термографического изображения решается приближенно с точностью, достаточной для зрительного восприятия.

Для решения задачи определения значений температуры в каждой точке термограммы, представленной в графическом формате, создана компьютерная программа «Термографический анализатор». Основные функции программы:

- определение численных значений температуры по RGB составляющим термограммы;
- преобразование графического формата термограммы в числовой формат значений температурного поля;
- повышение качества и визуального восприятия термограммы за счет созданных новых цветовых палитр;
- трехмерное представление любого элемента термограммы.

Окна программы «Термографический анализатор» с исходной термограммой и восстановленным значением температуры показаны на рис. 1, рис. 2, соответственно.

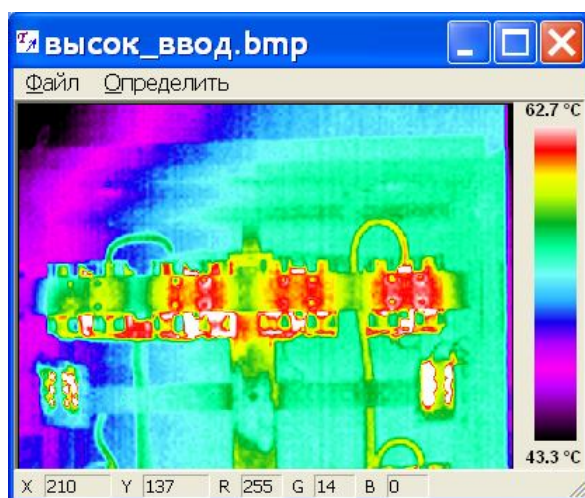


Рис. 1. Окно программы с исходной термограммой

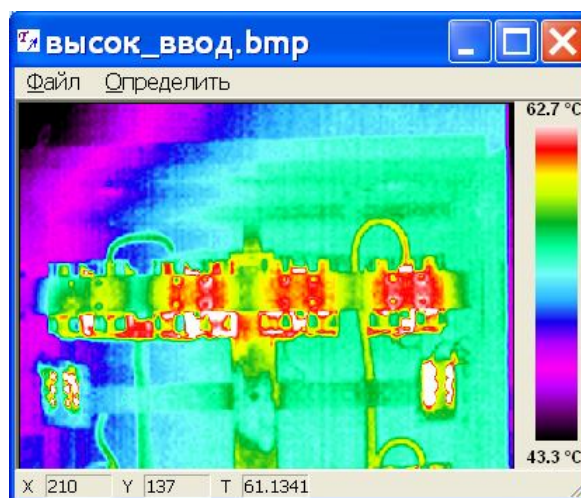


Рис. 2. Термограмма с восстановленным значением температуры

На рис.1 представлена термограмма высоковольтного ввода оборудования силовой подстанции, полученная с помощью тепловизора IRISYS 4010, сохраненная в формате *.bmp. Правая часть термограммы содержит палитру, наличие которой является необходимым условием для восстановления значений температуры. В нижней части окна программы находится статусная панель, в которой отображаются координаты курсора $X = 210$, $Y = 137$ и значения $R = 255$, $G = 14$, $B = 0$ в этой точке.

Используя команды пункта главного меню «Определить», находим значения температуры в каждой точке термограммы. Найденный массив значений $T(X,Y)$ ($X=0,\dots,N-1$, $Y=0,\dots,M-1$) сохраняется в текстовом файле формата *.csv. На рис. 2 в статусной панели отображается найденное значение температуры $T = 61.1341$ °C в точке с координатами $X = 210$, $Y = 137$.

Найденные значения температуры позволяют перевести тепловизионное изображение в другие цветовые палитры, заложенные в программу «Термографический анализатор», с помощью преобразования (1). Программа содержит 24 цветовых палитры. Примеры преобразований показаны на рис. 3, рис. 4, рис. 5. В статусной панели окон (рис. 3, рис. 4) отображаются ширина $W = 404$ и высота $H = 261$ изображения в пикселях.



Рис. 3. Термограмма в монохромной палитре

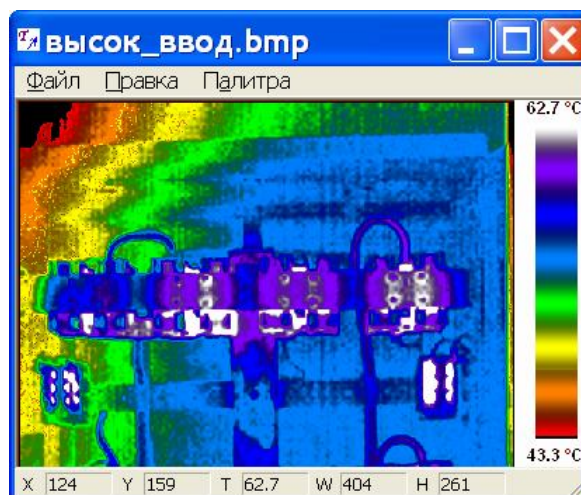


Рис. 4. Термограмма в палитре Спектр

Монохромная палитра (рис. 3) содержит 256 градаций серого цвета, в каждой точке изображения $R = G = B$.

Палитра Спектр (рис. 4) соответствует зрительным ощущениям при наблюдении за нагретыми телами и закону смещения Вина, согласно которому максимум спектральной мощности излучения абсолютно чёрного тела смещается при повышении температуры тела в направлении уменьшения длины волны.

Программа позволяет рассмотреть детали любого элемента термограммы. Проиллюстрируем это утверждение следующим примером. Используя команды пункта меню «Правка», выделим элемент термограммы с координатами верхнего левого угла $X = 257$, $Y = 102$ и размером $W = 64$ и высота $H = 45$ (рис. 5). Построим трехмерное контрастированное изображение этого элемента (рис. 6).

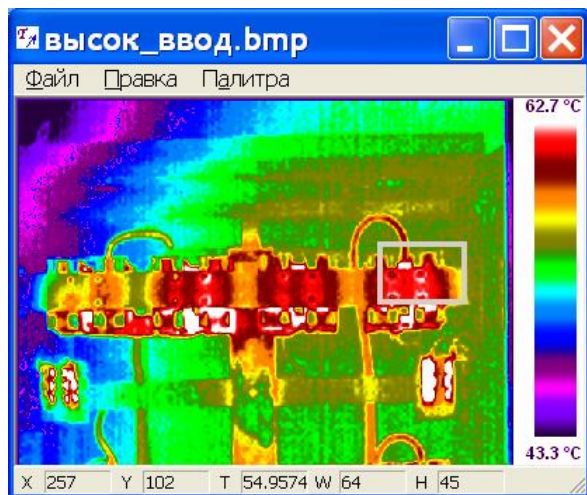


Рис. 5. Термограмма в палитре Ра-
дуга – негатив в выделенном эле-
ментом

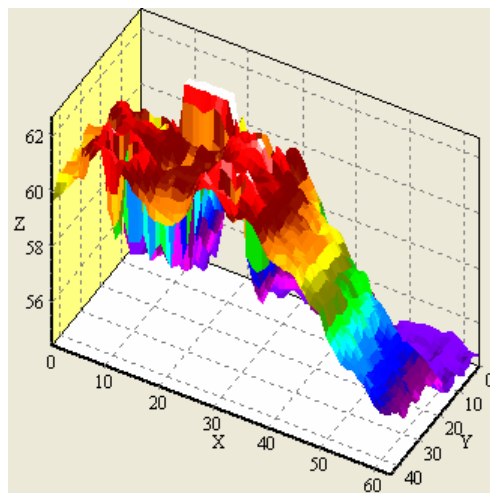


Рис. 6. 3D изображение выде-
ленного элемента

Заключение

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение обработки ИК данных, направленные на решение задач повышения качества и информативности тепловизионного изображения, визуализации и хранения результатов. Впервые решена обратная задача восстановления радиационного теплового поля по графическому RGB представлению в виде термограммы. Это позволяет представить термограмму в новых цветовых палитрах.

Библиографический список

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы "смотрящего" типа // М: Логос, 2004. 444 с.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ОТ РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ ОБЪЕКТОВ

Григорьян Л.Р., Сахно М.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

В практике проведения физических экспериментов возникает задача анализа (сравнения) параметров сигналов от разнесенных в пространстве объектов. Например, при беспроводных методах исследования параметров разнесенных датчиков, размещенных в труднодоступных для человека местах.

При решении поставленной задачи необходимо решить две основные проблемы:

- 1) привязки измерительных процедур к единой шкале времени;
- 2) минимизации времени проведения измерительной процедуры.

Для решения первой задачи в работе предложено использовать приемники GPS, что позволяет создать на больших территориях единую шкалу времени. Для решения второй задачи целесообразно использовать алгоритмы определения параметров сигнала за время одного его периода.

Способы дискретного анализа параметров сигналов за время менее периода их следования

Применение методов дискретного анализа параметров сигналов за время менее периода их следования наиболее перспективно при исследовании амплитудных и фазовых параметров гармонических сигналов в диапазоне инфранизких частот. Использование микропроцессоров позволяет расширить область использования этих методов и сократить время измерения [1].

В измерительной практике в ряде случаев возникает задача исследования амплитудно-разностного и фазо-разностного параметров двух сигналов, для решения которой применяется алгоритм дискретного исследования разности

фаз и отношения амплитуд. При этом снимается вычислительная нагрузка с аналоговых узлов, обладающих принципиально неустранимой погрешностью, и перекладывается вся тяжесть преобразований на численные методы, позволяющие уменьшать погрешности преобразований до любых, сколь угодно малых значений. Очень важным этапом этих алгоритмов является выбор начала измерений (выборка «0»). Момент выбора произволен относительно измеряемого сигнала, следовательно, измеряемый фазовый сдвиг тоже произволен и будет иметь различные, случайные значения при каждом очередном измерении. Этот факт не может сказаться на результате измерений, поскольку в первую очередь интересует разность фаз двух сигналов, а выборки производятся синхронно.

Отсюда следует важнейшее диагностическое правило: если алгоритм измерения фазы (разности фаз) сигнала приводит к зависимости результата от момента начала измерения или, что равнозначно, от начальной разности фаз сигналов, то мы наблюдаем случайный разброс результатов измерения с максимальным отклонением равным максимальной фазовой погрешности. Это означает, что разрешающая способность измерений численно равна максимальной погрешности вносимой алгоритмом измерения разности фаз сигналов. Тот же результат будет и в случае флуктуаций моментов выборки одного канала относительно другого. Такое же правило применимо к результатам измерения амплитуд сигналов и их отношению.

Способы дискретного анализа параметров сигнала за время нескольких периодов их следования

Возможности алгоритмических методов анализа дискретных сигналов целесообразно рассмотреть на примере реализации цифрового синхронного детектора. Принцип действия ключевого синхронного детектора поясняет рис. 1. Устройство имеет дифференциальный вход. Два равных детектируемых сигнала подаются в противофазе на быстродействующий электронный переключача-

тель. Для простоты на рис. 1 переключатель изображен как механический. Будем считать, что он идеален, т.е. переключение происходит мгновенно и его сопротивление в замкнутом состоянии равно нулю.

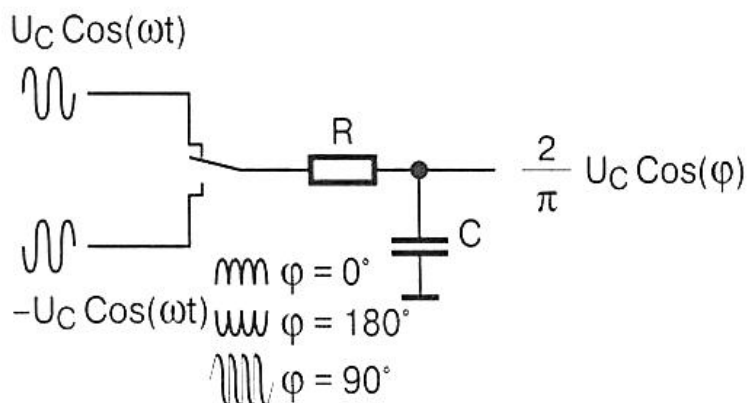


Рис.1. Ключевой синхронный детектор

Работой переключателя управляет сигнал, обычно называемый опорным. Пусть опорный сигнал управляет работой переключателя так, что его подвижный контакт всегда соединяется с тем входом, на котором на данный момент существует положительное напряжение. Такое возможно, если опорный сигнал синхронизирован с детектируемым, поэтому данный детектор называется синхронным [2]. Первое замечательное свойство синхронного детектора – способность линейно детектировать при любой амплитуде детектируемого сигнала.

Если фазу опорного сигнала поменять на 180° , то выходное напряжение поменяет полярность, так как переключатель будет пропускать только отрицательные полуволны входного напряжения. Если сдвиг по фазе будет равен 90° , то переключатель будет пропускать и положительные и отрицательные полуволны. Анализ схемы устройства при произвольном фазовом сдвиге приводит к выводу, что на выходе интегрирующей цепочки в этом случае сигнал равен $\frac{2}{\pi} U_C \cos(\varphi)$.

Второе замечательное свойство синхронного детектора заключается в его фазовых свойствах. Он может работать как фазовый детектор. Если помимо

данного синхронного детектора использовать еще один такой же детектор, фаза опорного сигнала которого дополнительно смещена на 90° , то на выходе этого дополнительного детектора сигнал будет равен $\frac{2}{\pi} U_c \sin(\varphi)$. В результате появляется возможность разделить активную и реактивную составляющую сигнала.

Третье замечательное свойство синхронного детектора – его частотно-избирательные характеристики. Частотно-избирательные свойства синхронного детектора можно существенно улучшить, используя вместо интегрирующей RC-цепочки фильтр нижних частот более высокого порядка.

Синхронный детектор чаще всего используется в синхронном режиме. Для этого необходимо иметь синхронный опорный сигнал. Если детектор входит в состав какого-либо закрытого измерительного комплекса, то проблемы с созданием синхронного опорного сигнала обычно нет. Трудности возникают при детектировании сигналов, пришедших извне, например, радиосигналов. В этом случае используют асинхронный режим, при котором на выходе получается сигнал разностной частоты с дальнейшей цифровой обработкой полученного результата. В этом случае процесс измерения в данной схеме происходит практически в реальном масштабе времени, и процессы преобразования и анализа разделены во времени. При этом после дискретизации сигналов и преобразования отсчетов в цифровой код, происходит их последующая обработка по определенным алгоритмам: фильтрация, анализ с использованием быстрого преобразования Фурье, сжатие данных и т.д.

Исследование сигналов на основе измерения амплитудно-фазовых параметров гармонических сигналов по трем выборкам

Рассмотрим решение задачи анализа параметров сигналов от разнесенных в пространстве объектов на примере оценки амплитудно-фазовых параметров гармонических сигналов по трем выборкам, взятым в течение одного периода их следования. Можно показать, что если выборки следуют равномерно в пределах периода сигнала, т. е. через 120° , то методическая погрешность данного

метода минимальна и при дискретности аналого-цифрового преобразования $14 \div 16$ разрядов не превышает $0,01^\circ$.

Рассмотренный метод дискретного преобразования сигналов обладает значительными модернизационными возможностями. Так если число выборок за период выбрать кратным $3,6 \cdot 10^n$, где $n=1, 2, 3 \dots$, то возможно реализовать алгоритм одноканального цифрового синхронного детектирования, являющегося полным аналогом синхронного детектирования с двумя ортогональными синхронными детекторами. Однако при этом исключается зависимость от точности синхронизации и нестабильности коэффициента преобразования синхронных детекторов, что позволяет получить в устройстве предельную точность и чувствительность алгоритмического синхронного детектирования, недостижимую с аналоговым синхронным детектированием, реализованным в прототипах.

На основе рассмотренных методов реализованы два патента:

- трассопоисковый приемник;
- измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций.

Методическая погрешность измерения разности фаз определяется только временем рассогласования тактовых секунд импульсов поступающих с GPS приемников в микропроцессоры приемника и генератора. Учитывая, что расстояние между приемником и генератором не превышает несколько километров, нестабильность тактовых импульсов определяется только инструментальной погрешностью GPS приемников, которая не превышает ± 50 нс. При частоте сигнала 975 Гц фазовая погрешность составляет $\pm 0,02^\circ$. Столь малая методическая погрешность позволяет использовать фазовый метод также для отсчета расстояния от точки привязки генератора до места повреждения изоляции, что по сравнению с маркероискателями значительно упрощает обозначение и повторный поиск дефектов исследуемого объекта.

При этом математический алгоритм обработки выборок сигналов равноценен преобразованию сигнала двумя синхронными детекторами, опорные сигналы которых сдвинуты на 90° [3], что известно так же, как корреляционный способ оптимальной обработки сигналов со случайной фазой [4].

Заключение

Проведенный анализ имеющихся алгоритмов исследования параметров сигнала по дискретно-квантовым выборкам за время менее периода, работа синхронного детектора, анализ различных алгоритмов фильтрации для дискретно-квантовых выборок за время нескольких периодов исследования позволили разработать измерительный комплекс для поиска и диагностики подземных коммуникаций. Комплекс обладает высокой точностью, чувствительностью и избирательностью во всем рабочем диапазоне частот. Одновременно в отличие от известных решений в предлагаемом трассопоисковом комплексе наряду с амплитудной идентификацией мест повреждения используется и фазовая идентификация, вытекающая из представления трубопровода как искусственной линии связи.

Библиографический список

1. Угольников В. Н, Мешков В. П. Методы измерения амплитуды гармонического сигнала за время менее периода. Метрология, 1984, №8, С. 8-11.
2. Генри Петин. Ключевой синхронный детектор.//Научно-технический журнал «Схемотехника». М.: «ИД Скимен», 2003, № 3(29), С.14-15.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. М.: Мир, 1982, 1983.
4. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. М.: Советское радио. 1970. 336 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ИЗ-ЗА АВАРИЙ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Кононенко А.В., Яковенко Н.А., Сморщевский В.С.

ОАО «Ростелеком», Краснодар

Основой современных телекоммуникационных сетей являются волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) [1]. Оптические волокна волоконно-оптических линий передачи являются пассивной средой передачи для стационарного оборудования оптических транспортных сетей связи. По каналам связи оптических транспортных сетей в настоящее время передаются все виды трафика: речевые сигналы фиксированных и мобильных сетей связи, передача данных в сети «Интернет», передача видеосигналов сетей кабельного телевидения и другие сигналы.

Авария на ВОЛС всегда приводит к перерывам передачи этого трафика и, соответственно, к значительным экономическим потерям.

Очевидно, что экономические потери $\mathcal{E}_{\text{пот}}$ из-за перерыва связи, вследствие аварии на ВОЛС зависят от двух основных составляющих:

- Объем потерянного трафика из-за аварии T_{LOSS} (байт);
- Средней стоимости единицы измерения трафика, т.е. средней стоимости одного байта D .

$$\mathcal{E}_{\text{пот}} = T_{\text{LOSS}} \times D$$

Объем потерянного трафика из-за аварии T_{LOSS} также зависит от двух основных составляющих:

$$T_{\text{LOSS}} = T_{\text{alm}} \times V_{\text{inf}},$$

где T_{alm} - продолжительность перерыва связи из-за аварии;

V_{inf} – суммарная информационная скорость передачи трафика по всем оптическим волокнам ВОЛП.

Количественно общий объем потерянного трафика необходимо определять с учетом следующих особенностей современных оптических транспортных сетей связи:

1. В современных оптических транспортных сетях передача информации производится по двум оптическим волокнам. При этом по одной ВОЛП может быть организована передача трафика по нескольким независимым оптическим системам связи, которые работают параллельно. В предельном случае количество таких систем на одной ВОЛС:

$$n_c = \frac{m_{ov}}{2},$$

где m_{ov} - количество оптических волокон в волоконно-оптической линии связи.

2. В каждой отдельной оптической системе связи вид передаваемого трафика и информационная скорость его передачи могут отличаться от других систем в данной ВОЛП.
3. Практика показывает, что более чем в 90% случаев аварий ВОЛС разрушаются все оптические волокна и возникает перерыв связи продолжительностью T_{alm} по всем оптическим системам связи работающим в аварийной ВОЛС.
4. В оптических системах связи различают линейную скорость передачи всех символов линейного сигнала V_{LINE} , и информационную скорость передачи полезной информации V_{inf} , которая всегда меньше линейной, т.к. в линейном сигнале, кроме полезной информации, также передаются служебные символы.

Общая информационная скорость передачи суммарного трафика по всем оптическим системам связи ВОЛП складывается из суммы информационных скоростей в каждой отдельной системе связи:

$$V_{inf} = \sum_{i=1}^{n_c} V_{inf_i},$$

где V_{inf_i} - информационная скорость в i -ой системе связи данной ВОЛП.

Информационная скорость в оптической системе связи всегда меньше линейной и зависит от варианта загрузки оптической системы связи сигналами разного вида (речь, данные, видео). Линейная скорость передачи указывается в технических характеристиках оптической системы связи.

В общем виде взаимосвязь линейной и информационной скоростей может быть выражена через коэффициент загрузки K_z конкретной системы связи:

$$V_{inf_i} = V_{LINE_i} \times K_{z_i}.$$

Коэффициент загрузки равен отношению количества байт полезной информации в цикле передачи (фрейме) линейного оптического сигнала, которые определяют информационную скорость передачи (I), к общему количеству байт в цикле передачи (фрейме) линейного оптического сигнала (L), которые определяют линейную скорость передачи.

$$K_z = \frac{I}{L}.$$

Коэффициент загрузки K_z всегда меньше 1, и для современных оптических систем связи находится в пределах:

$K_z \approx 0.81 \dots 0.82$ для систем связи, загруженных речевыми сигналами.

$K_z \approx 0.74 \dots 0.78$ для систем связи, загруженных сигналами передачи данных.

$K_z \approx 0.77 \dots 0.80$ для систем связи с разнородной загрузкой.

Средняя стоимость единицы измерения трафика D (байт) существенно отличается в оптических системах связи загруженных речевыми сигналами и в оптических системах связи загруженных передачей данных.

Для случая передачи речевых сигналов величина $D_{речь}$ может быть рассчитана исходя из усредненной стоимости 1 минуты разговора $C_{раз}$:

$$D_{речь} = \frac{C_{раз}}{B},$$

где B – количество байт переданных за 1 минуту разговора в стандартном цифровом канале связи:

$$B = \frac{V_{кан} \times 60}{8},$$

где $V_{\text{кан}}$ – скорость передачи символов (бит) в стандартном цифровом канале связи (64 кбит/с); 8 – число бит в 1 байте.

При практических расчетах следует учитывать, что усредненная стоимость 1 минуты разговора значительно отличается для различных уровней сети связи:

- Для местной сети связи (в пределах одного населенного пункта) необходимо определить и использовать величину $C_{\text{раз}_M}$;
- Соответственно для внутрисловоной связи (внутри области, края) и для магистральной междугородной сети связи необходимо определять и учитывать величины $C_{\text{раз}_B}$ и $C_{\text{раз}_\text{маг}}$.

Для случаев передачи данных величина $D_{\text{данные}}$ равна усредненной стоимости 1 мегабайта трафика в минуту, причем в данном случае нецелесообразно учитывать уровень сети, в связи с особенностями маршрутизации в пакетных сетях.

Продолжительность перерыва связи T_{alm} в общем случае состоит из следующих составляющих:

- T_1 , интервал времени в течении которого технический персонал, обслуживающий станционное оборудование оптической транспортной сети определяет пропадание передачи информации на конкретном участке сети связи и диагностирует аварию на ВОЛП данного участка.
- T_2 , интервал времени в течении которого технический персонал, обслуживающий станционное оборудование оптической транспортной сети передает информацию об аварии на ВОЛП техническому персоналу, на эксплуатационно-техническом обслуживании которого находится данная ВОЛП.
- T_3 , интервал времени в течении которого, технический персонал, обслуживающий линейно-кабельные сооружения ВОЛП, локализует место аварии.
- T_4 , интервал времени необходимый для выезда технического персонала на место аварии.

- T_5 , интервал времени для непосредственного устранения аварии на месте.

Таким образом:
$$T_{alm} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5$$

При прочих равных условиях уменьшить величину T_{alm} и, соответственно, уменьшить общий объем потерянного трафика и экономические потери из-за аварий на ВОЛП можно исключив из общего времени перерыва связи составляющие T_1, T_2, T_3 . Технически это можно осуществить путем использования на сетях связи ВОЛП автоматизированных систем мониторинга состояния оптических волокон.

Принимая во внимание все сложности, которые возникают при эксплуатации ВОЛП, можно с уверенностью сказать, что традиционные методы эксплуатации и поддержания работоспособности ВОЛП не позволяют в полной мере охватить и устранить все потенциальные неисправности кабельной сети.

Решить данную задачу может только автоматизированный комплекс контрольно-измерительного оборудования, который будет производить непрерывный контроль оптического волокна (причем как "темного", так и "активного"). В случае обнаружения каких-либо отклонений параметров от эталонных, данный комплекс будет предупреждать обслуживающий персонал всеми доступными способами (от вывода сообщений на экран монитора до звонка на мобильный телефон).

Такой комплекс называется системой дистанционного мониторинга оптических волокон (Remote Fiber Test System-RFTS) [2], он способен осуществлять контроль как физического уровня сети (с помощью рефлектометра), так и оптического уровня (с помощью анализатора оптического спектра), контроль любых других необходимых параметров ВОЛП, таких как вносимое затухание, поляризационная модовая дисперсия (ПМД), хроматическая дисперсия (ХД) и т.п.

Библиографический список

1. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – 2 - е изд. исправл. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
2. Некрасов С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей. – Технологии и средства связи, 2000, №5, с. 28-32.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Котенко Е.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Проектированием объектов комплексными системами безопасности в настоящее время заняты многие проектные организации разного масштаба своей деятельности. Практически все они сталкиваются с необходимостью повышения производительности труда, чтобы реализовать наибольшее количество проектов наименьшими силами.

Развитие современных технических средств обеспечения безопасности объектов и расширение выполняемых ими функций привело к появлению интегрированных систем безопасности, которые позволяют эффективно противостоять различным угрозам.

Эффективность применения интегрированных систем безопасности (охраны) определяется качеством разработанного проекта системы физической и противопожарной защиты объекта. Общий план этапов выпуска проектной и рабочей документации показан на рис. 1. Проектированием комплексных систем безопасности объектов занимается отдельная категория инженерно-технического персонала – инженеры-проектировщики комплексных систем безопасности (далее – проектировщики). Обученность проектировщиков является залогом качественного исполнения проектов, разработанных в соответствии с требованиями нормативных и руководящих документов.

Все системы управления проектами основаны на декомпозиции технологического процесса на отдельные операции. Для каждой технологической операции определяются параметры сложности работы, влияющие на сроки ее выполнения [1].

Каждая подсистема интегрированной системы безопасности - ИСБ (охранно-пожарная сигнализация, контроль и управление доступом, охранное те-

леведение и пр.) характеризуется своими показателями, которые определены в ГОСТ, РД, НПБ и других документах. Опираясь на эти документы, необходимо сформулировать основные показатели подсистем и ИСБ в целом. Раздел можно выполнить в виде таблицы. Если ИСБ планируется развертывать поэтапно, то основные показатели можно указать по этапам с нарастающим итогом. Можно также указать предельные показатели ИСБ, чтобы показать ее резервы [2].

При разработке проектов слаботочных сетей существует ряд достаточно рутинных процессов, занимающих много времени:

1. Разработка кабельного журнала является одной из самых трудоемких операций, требующих пунктуальности и внимания.
2. Составление спецификаций оборудования и материалов. Зачастую заказчики полагают, что спецификация составляется до изготовления проектной документации, хотя именно на основании проектных расчетов определяется техническое решение и, в результате создается спецификация, в соответствии с которой осуществляется закупка оборудования. Поэтому все инженерные расчеты, ссылки на существующие нормы и стандарты должны быть обоснованными [3].
3. Составление ведомостей объемов работ.

Вопросам планирования работ и рациональным способам контроля их исполнения посвящено достаточно много работ. Для их реализации имеется целый спектр отечественных и импортных программных комплексов, таких как Microsoft Project, OpenProj, eGroupWare, Task Manager, ПРОДОК и др. [1].

Для автоматизации процесса разработки проектной документации (в том числе и вышеперечисленных документов) существует целый ряд систем автоматизации проектных работ (САПР). В настоящее время в качестве САПР используется большое количество программных комплексов, таких как «Компас», NanoCAD, ProgeCAD, AutoCAD, LinuxCAD, BricsCAD, EPLAN Electric, CATIA-NX, Solid Edge, Solid Works, TurboCAD, Pro/ENGINEER и др.

Наиболее распространенной и применяемой при проектировании инженерных сетей здания, в том числе и слаботочных, является, несомненно, система автоматизированного проектирования AutoCAD различных версий. На рисунке 2 представлена структурная схема автоматической пожарной сигнализации выполненная в программе AutoCAD.

Для адаптации к конкретным задачам проектировщиков различных систем на базе AutoCAD самим производителем (компанией Autodesk) и другими производителями специализированного программного обеспечения создано большое количество специализированных прикладных приложений, таких как AutoCAD Mechanical, AutoCAD Electrical, GeoniCS, PLANT-4D, AutoPLANT, СПДС GraphiCS, и других.

К сожалению, возможности AutoCAD и применяемых в настоящее время функциональных приложений не позволяют в автоматическом режиме корректно формировать кабельный журнал с расчетом длин трасс, корректно формировать спецификации с суммированием элементов по позициям, что позволило бы существенно сократить время на разработку рабочей документации и устранить технические ошибки при коррекции указанных документов.

Наиболее трудоемкой задачей при внедрении САПР в проектной организации представляется необходимость формирования и поддержания в актуальном состоянии базы данных используемого оборудования и материалов.

Некоторые организации формируют свои базы данных, содержащие в себе наименование и комплектность оборудования, а так же ряд других параметров, такие как вольт -амперные характеристики (ВАХ) и др. Для облегчения работы проектировщиков и увеличения объемов продаж производимого оборудования многие производители идут на создание собственных баз данных своего оборудования. Так, ведущие производители электротехнического оборудования Schneider Electric, RITTAL, Lampertz, Beckhoff и др. создают и поддерживают в актуальном состоянии базы выпускаемого ими оборудования.

Несомненно, создание программных продуктов, позволяющие производить расчет аспирационных систем, пневматический расчет, расчет массы горючего вещества находящегося за фальшпотолком, акустический расчет и др. позволит проектировщикам качественно осуществлять подбор необходимого оборудования и другие проектные решения за короткий промежуток времени.

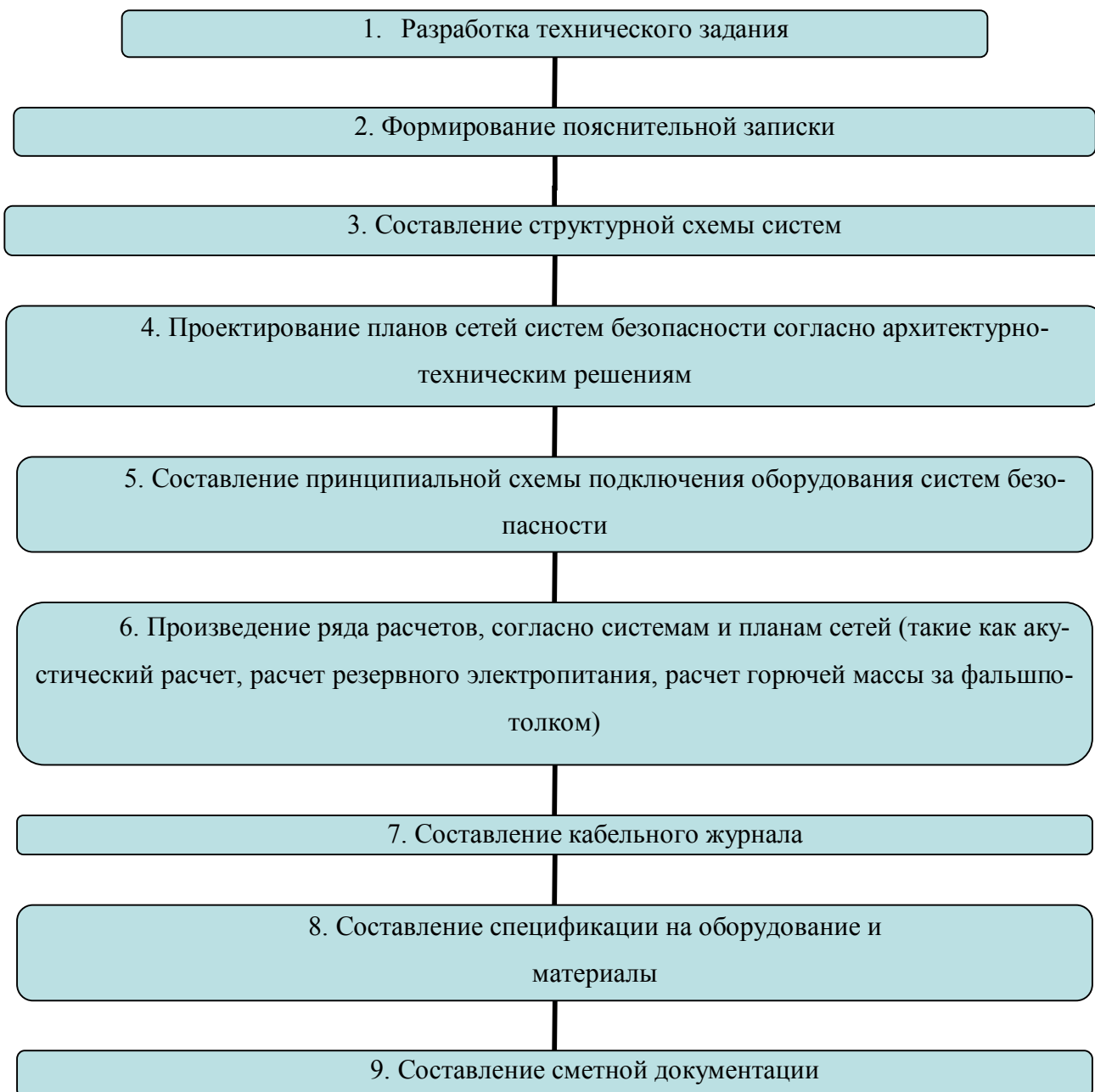


Рисунок 1. Общий план этапов выпуска проектной и рабочей документации

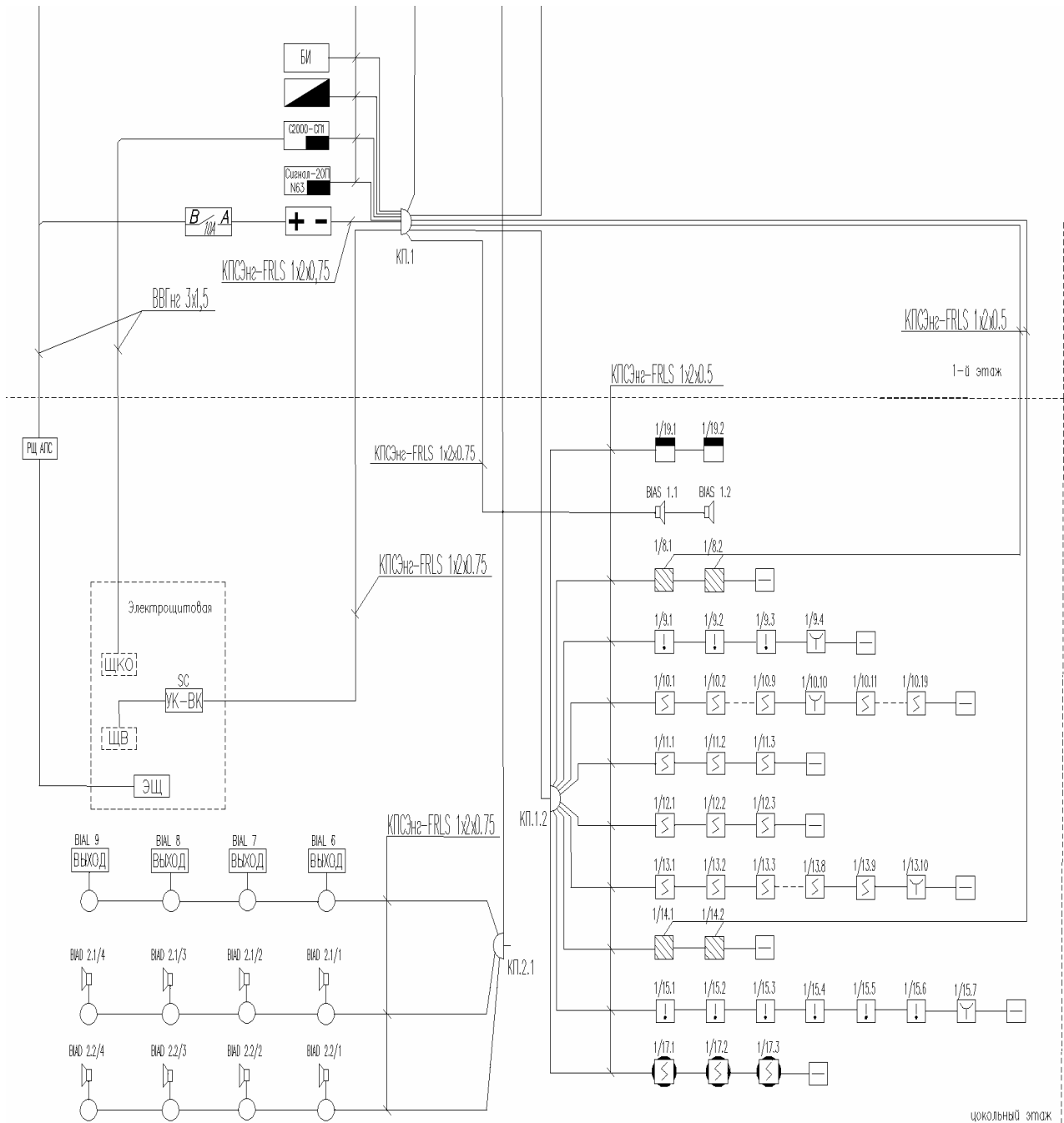


Рисунок 2. Фрагмент структурной схемы автоматической пожарной сигнализации.

Стоит так же уделить внимание одной из важных задач, а именно это контроль за исполнением документов и принятых решений – одна из важнейших функций управления, целью которой является содействие своевременному и качественному исполнению документов, обеспечение получения аналитиче-

ской информации, необходимой для оценки деятельности структурных подразделений, филиалов, конкретных сотрудников [4].

С учетом того, что постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий» от 5 марта 2007 № 145 предусмотрен порядок проведения экспертизы в отношении документации, разработанной в объеме стадии «проектная документация», заказчик должен подготовить ее в соответствии с указанным положением, и представить для проведения государственной экспертизы [5].

Контроль рабочей документации, выпущенной на базе проектной документации, так же необходимо проводить соответствующими органами, а главное выполнять поэтапно соответствие выполнения монтажных и пусконаладочных работ с рабочей документацией. Это позволит повысить качество выполняемых работ на каждом этапе их проведения, а так же повысит ответственность организаций и сотрудников принимающих участие в реализации проекта.

Библиографический список

1. Александр Мальцев. Проектирование систем безопасности: проблемы автоматизации. // Журнал ТЗ № 5 2011. с. 42 – 44. <http://www.tzmagazine.ru>
2. Крошкин А.Н. Проектная документация для интегрированных систем безопасности. http://www.security-bridge.com/biblioteka/stati_po_bezопасности/proektnaya_dokumentaciya_dlya_integrirrovannyh_sistem_bezопасности/
3. Сергей Орлов. "Журнал сетевых решений/LAN". http://www.security-bridge.com/biblioteka/stati_po_bezопасности/avtomatizaciya_proektirovaniya_sks/
4. Анализ организации контроля исполнения документов. http://www.bestreferat.ru/referat-111198.html#_Тoc199090576
5. С.И. Круглик. ПИСЬМО ОТ 22.06.2009 №19088-СК/08 МИНРЕГИОНА РФ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СИММЕТРИЧНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Митькина А.С., Акжигитов А.Х., Никитин В.А., Яковенко Н.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Для получения симметричных интегрально-оптических волноводных элементов было применено их заглубление в стеклянную подложку под действием внешнего электрического поля. Заглубление волноводных элементов позволяет улучшить ряд очень важных параметров.

С одной стороны заглубление волновода (погружение волновода в стеклянную подложку) значительно снижает оптические потери света в волноводе, обусловленные шероховатостью поверхности, волновод не касается поверхности подложки, а, следовательно, небольшие царапины и дефекты подложки не приводят к рассеянию света.

С другой стороны – при заглублении волновод приобретает круглую форму поперечного сечения и становится симметричным, поскольку окружен со всех сторон стеклом, примерно как сердцевина оптического волокна оболочкой. Кроме того, при заглублении волновода электростимулированной миграцией ионов уменьшается коллоидная окраска волноводов.

Таким образом, если подобрать технологические режимы изготовления и заглубления волноводных элементов (канальных волноводов), то они могут быть состыкованы с оптическими волокнами практически без потерь [1].

Изготовление заглубленных канальных волноводов проводилось следующим образом.

В качестве подложек использовались пластинки размером $50 \times 50 \times 2$ мм из стекла К8, которое содержит 72% SiO_2 , 8,15% B_2O_3 , 10,45% K_2O , 7,2% Na_2O , 1,55% CaO , 0,4% MgO , 0,2% As_2O_3 . Наличие в составе стекла наиболее подвижных ионов Na^+ и K^+ , позволяет использовать его в качестве подложки при

получении волноводов и волноводных структур методом ионного обмена и электростимулированной миграции ионов.

Заглубленные канальные интегрально-оптические волноводы изготавливались в два этапа:

– на первом этапе необходимо было получить интегрально-оптические канальные волноводы в стеклянной подложке методом ионного обмена из расплава соли, содержащей ионы серебра;

– на втором этапе провести погружение полученных канальных волноводов в стеклянную подложку с целью уменьшения оптических потерь и придания волноводам круглой формы поперечного сечения.

Очистка стеклянных подложек проводилась в ацетоне и в тлеющем разряде под колпаком вакуумной установки при разрежении $1-10^{-1}$ Па непосредственно перед нанесением маскирующего покрытия. По окончании очистки вакуум в камере увеличивался до $10^{-3}-10^{-4}$ Па и производилось термическое напыление алюминия на одну из сторон стеклянной подложки. Толщина напыленной алюминиевой пленки составляла $0,6 - 1$ мкм. Эта напыленная алюминиевая пленка играла роль маскирующего слоя при формировании канальных интегрально-оптических волноводов в стеклах методом ионного обмена из расплава соли.

В алюминиевом маскирующем слое с помощью фотолитографии создавались каналы будущих волноводов шириной 2 мкм и длиной 50 мм.

Далее стеклянная подложка с маскирующим слоем помещалась в расплав солей AgNO_3 и NaNO_3 , взятых в молярном соотношении $1:200$.

При контакте стеклянной пластинки с расплавом солей в местах не защищенных маскирующим слоем происходил ионный обмен $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$, при этом ионы натрия диффундировали из стекла в расплав, а на их место из расплава внедрялись ионы серебра, приводящие к увеличению показателя преломления. Таким образом, в стеклянной подложке формировались интегрально-оптические канальные волноводы.

Ионный обмен проводился при температуре 330°C. Время ионного обмена составило – 80 минут.

После окончания ионного обмена алюминиевый маскирующий слой удалялся путем травления в 30% растворе КОН.

Для получения симметричных интегрально-оптических волноводов с минимальными потерями и круглой формой поперечного сечения было проведено их заглубление в стеклянную подложку.

Заглубление волноводов проводилось при помощи электростимулированной миграции ионов Na^+ в стеклянную подложку из расплава соли NaNO_3 [2]. Для этого на сторону стеклянной подложки, свободную от волноводных структур, методом термического напыления наносилась пленка алюминия толщиной 1 мкм, выполнявшая роль тонкопленочного катода в процессе электростимулированной миграции ионов. Для устранения возможности затекания расплава соли на катод, последний имел размеры меньше, чем стеклянная подложка и напылялся через маску.

Погружение интегрально-оптических волноводов с помощью электростимулированной миграции ионов осуществлялось на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

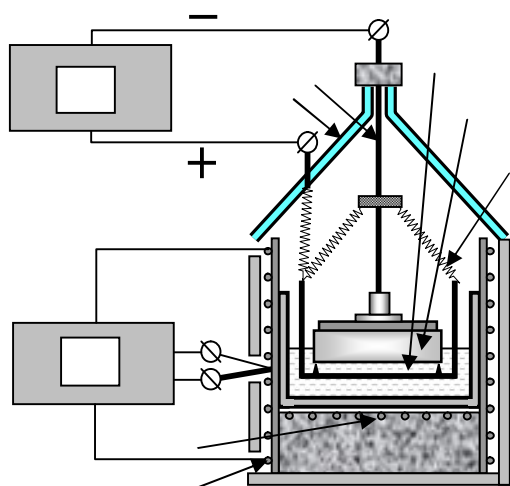


Рисунок 1 – Схема установки для проведения электростимулированной

Установка включает муфельную печь с системой терморегулирования, устройство погружения образца в расплав, блок питания с защитой от короткого замыкания и систему контроля электрического тока в процессе диффузии.

Муфельная печь состояла из двух независимых нагревателей, один из которых представлял со-

бой вольфрамовую спираль, намотанную на кварцевую трубу (1), второй нагреватель (2) имел плоскую поверхность и осуществлял подвод тепла снизу. Применение двух независимых нагревателей с предварительным подбором их параметров позволило добиться максимальной стабильности и минимального градиента температуры в области диффузии. Поддержание температуры в заданных пределах достигалось с помощью хромель-алюмелевой термопары (3), находящейся в непосредственной близости с расплавом, и терморегулирующего устройства (4). Терморегулирующее устройство было выполнено на базе регулирующего милливольтметра МР-64-02 и тиристорной схемы. Источником внешнего стимулирующего напряжения служил универсальный источник питания Б5-50 (5).

Устройство, осуществляющее подвод стимулирующего напряжения к образцу и его погружение в расплав, состояло из кварцевой воронки (6), через которую пропускался металлический стержень (7), играющий роль подводящего электрода (катода).

Перемещением подводящего электрода (7) вдоль оси воронки (6) образец приводился в соприкосновение с расплавом соли. Фиксация образца после соприкосновения его с расплавом и обеспечения надежного смачивания осуществлялась зажимом (8). Анодом служила серебряная лодочка (9).

Стеклопластиковая пластинка (10) с нанесенным на противоположную сторону тонкопленочным электродом зажимался между катодом и анодом с помощью пружин (11), соединенных с катодом через изоляторы (12) таким образом, что тонкопленочный электрод находился в непосредственном контакте с катодом, а противоположная сторона пластинки была обращена к лодочке. Лодочка погружалась в расплав соли до тех пор пока поверхность пластинки не смачивалась расплавом соли. Затем от источника питания (5) Б5-50 к расплаву и катоду прикладывалось постоянное электрическое стимулирующее напряжение 290 В. Температура расплава была 380°C, время протекания процесса 60 минут. Величина электрического тока составила 15 мА.

Под действием электрического тока ионы Ag^+ канальных волноводов мигрируют вглубь подложки, а на их место входят ионы Na^+ из расплава соли $NaNO_3$, восстанавливая первоначальную структуру стекла. Это приводит к заглоблению канальных волноводов.

После окончания процесса заглобления интегрально-оптических канальных волноводов в стеклянную подложку, образец остывал, а тонкопленочный катод стравливался в растворе щелочи.

Для исследования изготовленных интегрально-оптических канальных волноводов необходимо ввести в них оптическое излучение. Наиболее эффективно можно ввести свет в канальный волновод, сфокусировав его на торце волновода. Для этого торцы волноводов должны быть полированными без сколов и сколов.

Внешний вид торца интегрально-оптического заглобленного волновода представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид торца интегрально-оптического заглобленного волновода

Из рисунка 2 видно, что торец полученного волновода имеет практически круглую форму поперечного сечения, кроме того сам волновод оторван от поверхности стекла.

Геометрические размеры выходных торцов заглобленных интегрально-оптических ка-

нальных волноводов измерялись при помощи микроскопа «ERGAVAL» и микрометра оптического винтового «МОВ1-15^x» и составили 9×10 мкм. Глубина погружения волноводов составила 3-4 мкм.

Числовая апертура заглубленных канальных волноводов измерялась из геометрических соображений. Методика измерения числовой апертуры волновода по его выходному излучению показана на рисунке 3. Отношение радиуса r светящегося пятна к величине перемещения h тубуса микроскопа является тангенсом угла α . Подставив полученные значения r и h и учитывая, что показатель преломления воздуха $n_0 = 1$, можно рассчитать числовую апертуру заглубленного канального волновода по формуле

$$NA = n_0 \cdot \sin \alpha = \sin \left(\arctg \frac{r}{h} \right).$$

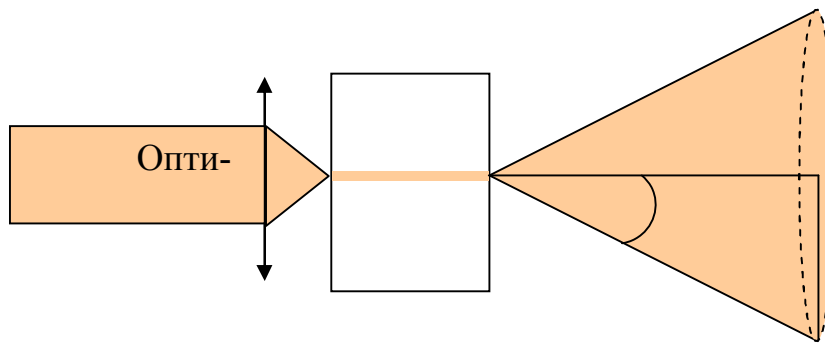


Рисунок 3 – Определение угла α для расчета числовой апертуры волновода

Проведенные измерения показали, что числовая апертура полученных интегрально-оптических волноводов составляет $NA=0,1$.

Библиографический список:

- 1 Zou J. Two-step K –Na and Ag –Na ion-exchanged glass waveguides for C-band applications / J. Zou, F. Zhao, R. T. Chen // Applied Optics 2002. 41. 36. P. 7620-7626
- 2 Никитин В. А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике / В. А. Никитин, Н. А. Яковенко. – Краснодар, Из-во КубГУ, 2010. 200 с.

МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ В ВОЛНОВОДНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Орлянский С.А., Прохоров В.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Функциональность, размеры и эффективность интегрально-оптических схем определяются составляющими их базовыми волноводными элементами (Y-образными разветвителями, линиями задержки, изгибами и т.п.), что предъявляет особые требования к оптимизации их конструкции. Недавно был предложен новый метод проектирования и оптимизации топологии волноводных элементов, получивший название метода согласования волновых фронтов (WFM) [1]. При использовании этого метода возможно получить оптимальное распределение показателя преломления для требуемого волноводного элемента.

Рассмотрим кратко сущность метода WFM, принцип его использования для оптимизации волноводных конструкций по данным работ [1–3] и, наконец, результаты собственной работы по WFM-оптимизации S-образного волноводного изгиба.

Как известно [4], в основе метода распространяющегося пучка (ВРМ) лежит трехмерное скалярное волновое уравнение (уравнение Гельмгольца), имеющее следующий вид:

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x, y, z) \right\} E(x, y, z) = 0.$$

Согласно FFT-ВРМ теории [4] решение данного уравнения можно получить, разделив область расчета на M равных отрезков вдоль оси распространения. При этом поле ϕ_{m+1} на $(m+1)$ -м шаге расчета вычисляется из поля ϕ_m на m -м шаге расчета $\phi_{m+1} = (AB_{m+1}A)\phi_m$, где A и B_{m+1} – операторы распространения в свободном пространстве и смещения фазы, обусловленной распределением показателя преломления $n_{m+1}(x)$, соответственно.

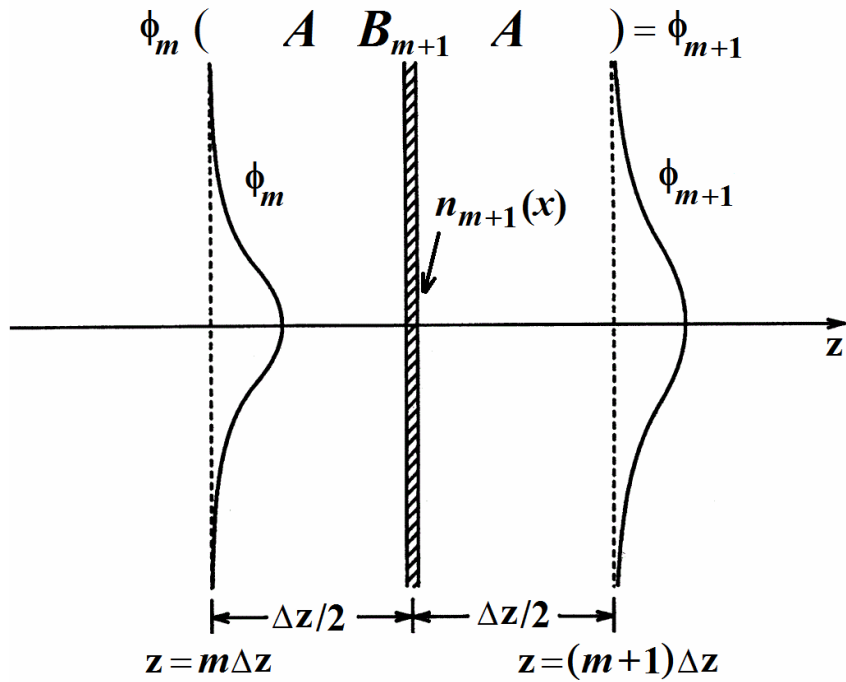


Рис. 1. Схематическое представление области расчета в методе WFM

В методе WFM область расчета (см. рис. 1) делится на небольшие прямоугольники (пиксели) с шагом Δz и Δx по оси z и x , соответственно (Δz и Δx – параметры, определяемые в методе FFT-BPM, используются и в WFM). Входящее световое электрическое поле при $z = 0$ выражается через $\phi_0(x)$, а желаемое выходящее поле при $z = M \cdot \Delta z$ есть $\psi_M(x)$, где индексы 0 и M обозначают номер шага расчета в z -направлении.

Коэффициент пропускания, равный коэффициенту связи между входом и желаемым электрическим полем на выходе, задается формулой:

$$\eta = \left| \int \psi_M^*(x) \phi_M(x) dx \right|^2. \quad (1)$$

Согласно FFT-BPM теории, выходящее поле $\phi_M(x)$ при $z = M \cdot \Delta z$ выражается как

$$\phi_M = (AB_M A)(AB_{M-1} A) \dots (AB_1 A) \phi_0. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) определяется коэффициент пропускания:

$$\eta = \left| \int \psi_m^*(x) (BB_m B) \phi_{m-1}(x) dx \right|^2, \quad (3)$$

а полевые функции ϕ и ψ задаются следующими операторными уравнениями:

$$\phi_{m-1}(x) = (BB_{m-1}B)(BB_{m-2}B)\dots(BB_0B)\phi_0(x), \quad (4)$$

$$\psi_m^*(x) = (BB_{m+1}B)(BB_{m+2}B)\dots(BB_M B)\psi_M^*(x). \quad (5)$$

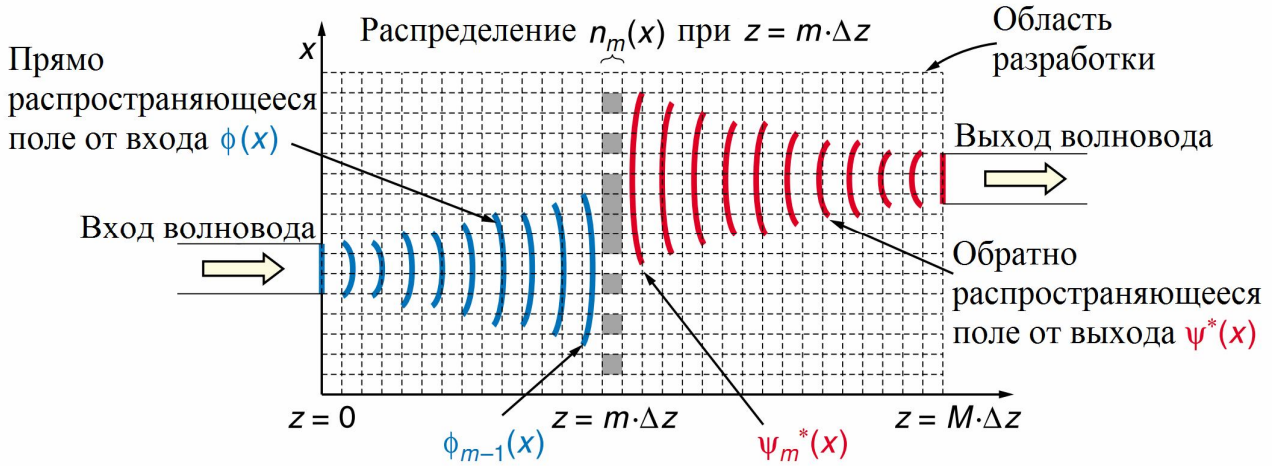


Рис. 2. Конфигурация распространяющихся полей в методе WFM

Здесь $\phi_{m-1}(x)$ обозначает электрическое поле входящего света, прибывшего в $z = (m-1)\Delta z$, а $\psi_m^*(x)$ обозначает мнимое электрическое поле, распространяющееся обратно от $z = M\Delta z$ к $z = m\Delta z$ (см. рис. 2). Если изменить распределение показателя преломления при $z = m\Delta z$ на значение $n_m(x) + \delta n_m(x)$, то изменение коэффициента пропускания вычисляется из (3):

$$\delta\eta \cong 2k\Delta z\sqrt{\eta} \int \text{Im}[\psi_m^*(x)\phi_{m-1}(x)] \cdot \delta n_m(x) dx \quad (6)$$

Можно улучшить коэффициент пропускания η соответствующим выбором $\delta n_m(x)$, пропорционального величине $\theta(x, m\Delta z) = \text{Im}[\psi_m^*(x)\phi_{m-1}(x)]$. Если $\theta(x, m\Delta z) > 0$, то можно улучшить коэффициент пропускания, присваивая $n_m(x)$ значение показателя преломления волноводной среды, а если $\theta(x, m\Delta z) < 0$ – подложки. Таким образом, оптимизация распределения показателя преломления осуществляется путем согласования волновых фронтов распространяющейся вперед и распространяющейся обратной волн. Повторение данного алго-

ритма для каждого m дает оптимальное распределение показателя преломления, т.е. оптимальную форму волновода.

Поясним физический смысл данного метода на примере применения к S-образному изгибу волновода (см. рис. 3). Голубые линии показывают волновой фронт, рассчитанный для начального распределения показателя преломления с помощью метода распространяющегося пучка (BPM). Красные линии обозначают волновой фронт распространяющейся обратной волны. Принимая во внимание оба волновых фронта, мы подставляем в пиксель между ними материал с высоким показателем преломления чтобы уменьшить скорость распространения света, и материал с низким показателем преломления чтобы увеличить скорость распространения света.

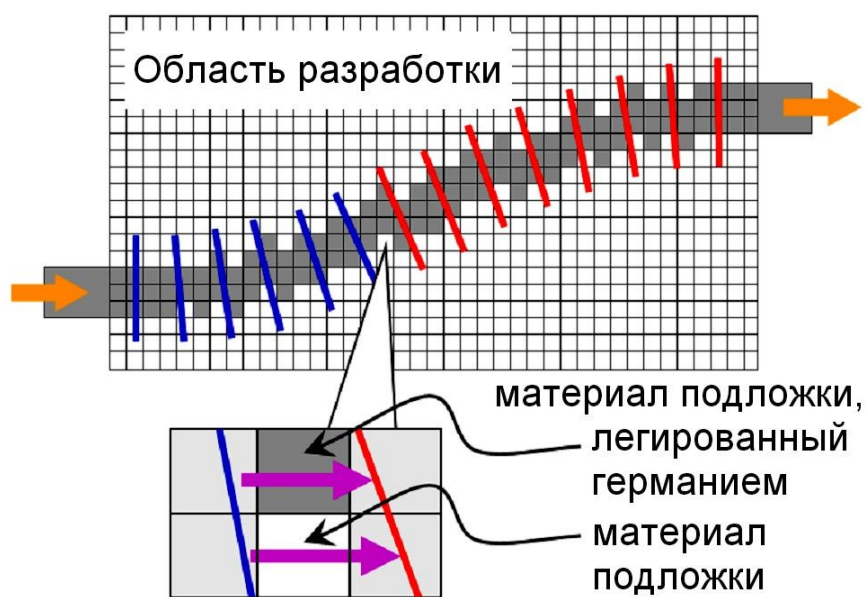


Рис. 3. Иллюстрация схемы пикселизации в методе WFM

С целью экспериментального подтверждения принципа WFM авторами метода [1–3] была изготовлена серия волноводных образцов на основе диоксида кремния по PLC технологии [5]. Ширина волноводных слоев составляла 6 мкм, а отличие показателя преломления между волноводной средой и оболочкой составляло 0,75%.

На основе данного метода авторы сконструировали оптический разветвитель с разделением сигналов по длинам волн 1.3/1.5 мкм [2] (рис. 4), одновременно применяя WFM для каждой длины волны. Выбор показателя преломления волноводной среды или подложки для каждого пикселя решается «большинством голосов» среди длин волн. Измеренный спектр (рис. 5) показывает, что входящий свет был успешно разделен по двум выходам в зависимости от его длины волны. Вносимые потери, включая потери на соединения волоконно-волоконно, составили около 5 дБ, как результат рассеяния на ряде пикселей волноводной среды.



Рис. 4. Разработанный шаблон разветвителя [2]

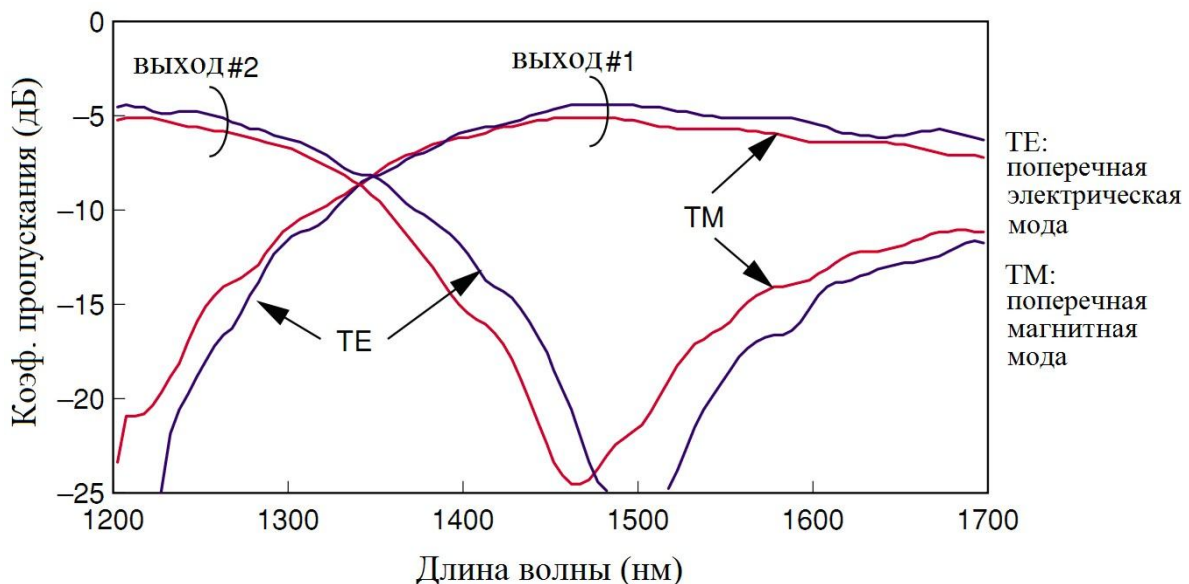


Рис. 5. Измеренный спектр пропускания [2]

Когда нам не нужен волновод с зависимостью от длины волны, волноводная среда должна иметь сплошную структуру чтобы снизить нежелательные

потери на рассеяние. Примером могут послужить волноводные линзы [3]. Для этого налагается следующее условие: нельзя изменить показатель преломления пикселя на показатель преломления подложки, если он окружен пикселями волноводной среды. В результате было создано две волноводных линзы с неровными контурами, находящиеся друг напротив друга, разделенных неограниченной меньшим показателем преломления областью, как показано на рис. 6. В результате проведенной WFM-оптимизации (см. рис. 7) потери для неограниченной области длиной 500 мкм были эффективно уменьшены до 0,9 дБ при помощи двух линз, по сравнению с прямым или коническим волноводом.

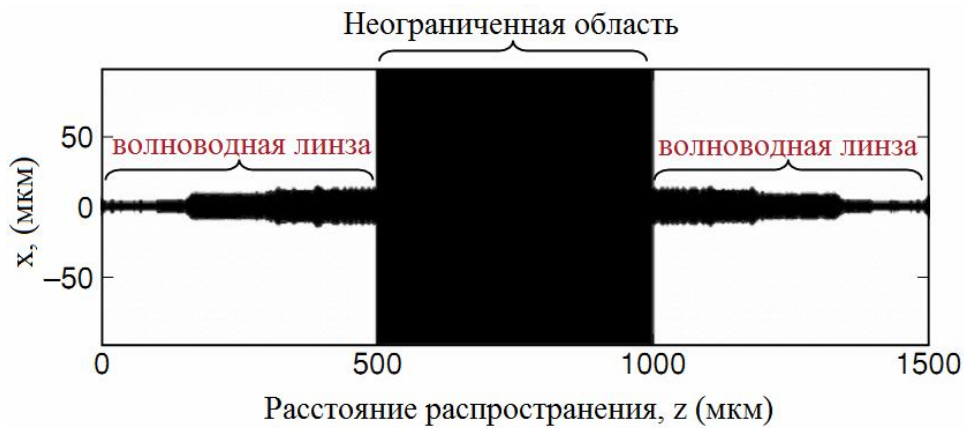


Рис. 6. Разработанный шаблон волноводных линз [3]

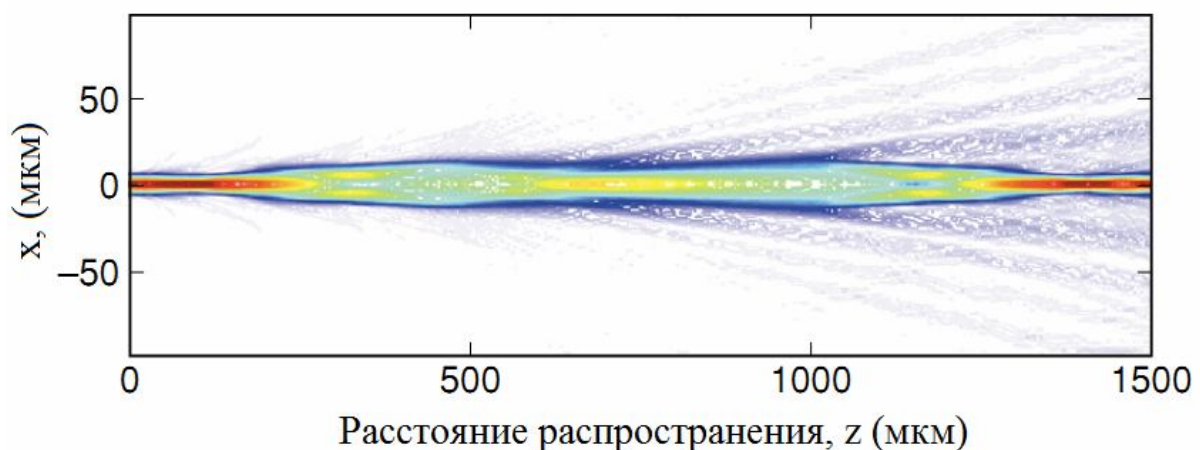


Рис. 7. Результаты моделирования распространения световой волны в волноводных линзах [3]

На основе рассмотренной методики нами был разработан алгоритм практической реализации метода WFM для оптимизации S-образного изгиба волновода и написана соответствующая MATLAB-программа. За основу были выбраны каналные волноводы с поперечным сечением 6×9 мкм², полученные посредством электростимулированного ионного обмена из расплава соли KNO_3 в стеклянных подложках К8 ($K^+ : K8$ -волноводы) с показателями преломления подложки $n_s = 1,5123$ и волноводной среды $1,5213$ ($\Delta n = 0,009$). Распределение показателя преломления и моделирование процесса распространения света показаны на нижеследующих рисунках 8–10.

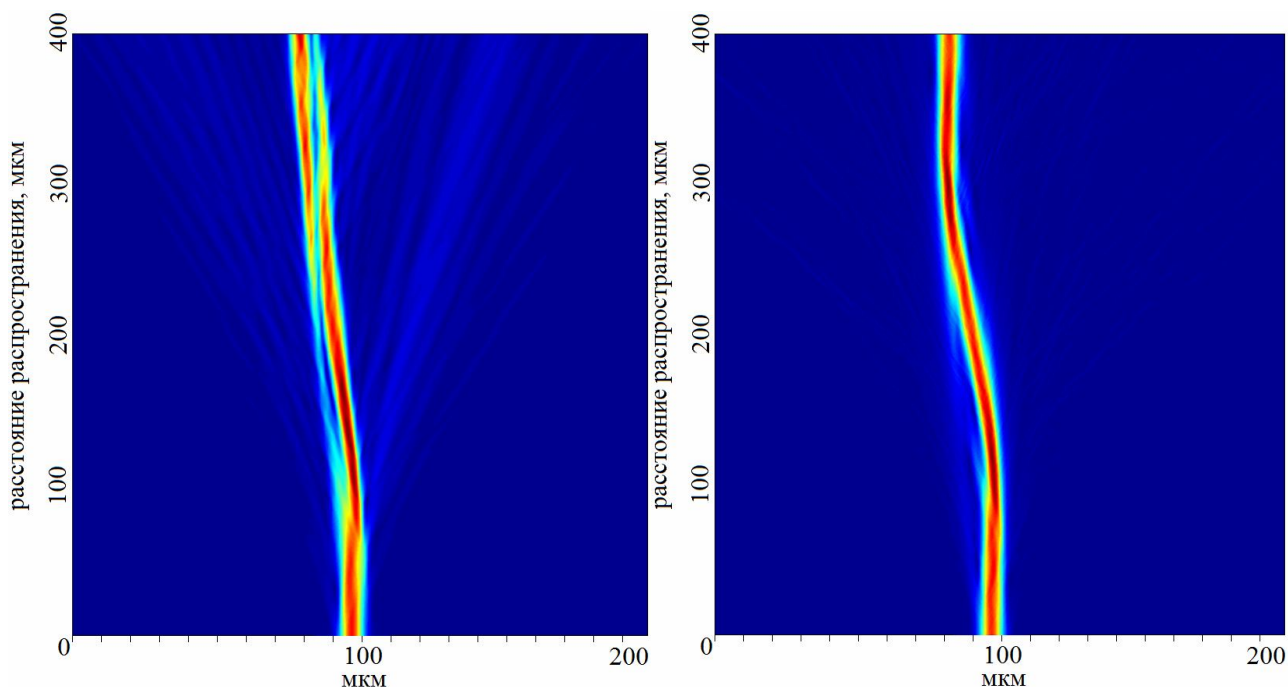


Рис. 8. Результаты моделирования до (слева) и после (справа) оптимизации волновода



Рис. 9. Начальное распределение показателя преломления



Рис. 10. Распределение показателя преломления после оптимизации

Предполагаемые входные и выходные поля фундаментальных мод волновода расположены на расстояниях $x = 125$ мкм и $x = 136$ мкм, соответственно. Принятый размер пикселя составлял 1×1 мкм², шаг расчета $\Delta z = 0.5$ мкм и $\Delta x = 0.25$ мкм, длина волны излучения полагалась равной $0,7$ мкм. В качестве начального распределения показателя преломления был принят неизогнутый волновод, для которого коэффициент пропускания составлял величину $-0,87$ дБ. В оптимизированном же волноводе коэффициент пропускания достаточно высок: $-0,06$ дБ. Рис. 9 достаточно красноречиво демонстрирует эффективность проведенной WFM-оптимизации S-образного изгиба оптического волновода.

Библиографический список

1. Sakamaki Y., Saida T., Hashimoto T., Takahashi H. New optical waveguide design based on wavefront matching method // Journal of Lightwave Technology. – 2007. Vol. 25, № 11. – P. 3511–3518.
2. T. Saida T., Hashimoto T., Ogawa I., Kohtoku M., Shibata T., Takahashi H., Suzuki S. Fabrication of wavelength splitter designed by wavefront matching method // Optical Fiber Commun. Conf. (OFC), Anaheim, CA, 2005, Paper OThV2.
3. Saida T., Sakamaki Y., Hashimoto T., Shibata T., Takahashi H., Suzuki S. Optical waveguide lens with modulated width designed by wavefront matching method // Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, MD, 2005, Paper CWF1.
4. Okamoto K. Fundamentals of Optical Waveguides. – N.-Y.: Academic Press, 2006.
5. Himeno A., Kato K., Miya T. Silica-based planar lightwave circuits // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 1998. Vol. 4, № 6. – P. 913–924.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАЗМОННОГО ВОЛНОВОДА

Селина Н.В., Векшин М.М., Тумаев Е.Н., Яковенко Н.А., Благодарь М.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

В настоящее время развитие высокоэффективных технологий передачи и обработки данных привело к необходимости создания интегрально-оптических схем на плазмонах [1]. Использование таких схем в оптоэлектронных приборах приведет к уменьшению их размеров и повышению эффективности. На основе поверхностных плазмонов могут создаваться различные волноводные структуры, которые образуют стандартную компонентную базу элементов интегральной оптики.

В роли перспективных плазмонных волноводов выступают полосковые металлические передаточные линии, такие, например, как наноразмерный полосковый волновод из золота на подложке из оксида кремния. Уровень затухания волноводных плазмонных мод поддерживает распространение оптического сигнала на расстояния до единиц сантиметров. Понимание процессов формирования мод и оптимизация волноводов осуществляются на основе решения уравнений Максвелла в этой геометрии. Целью настоящей работы является развитие аналитического подхода к решению векторного волнового уравнения, описывающего свойства плазмонных полосковых волноводов.

1. Теоретическое рассмотрение задачи

С целью решения поставленной задачи рассмотрим распространение электромагнитных волн в неоднородной среде. В уравнениях Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \frac{i\omega}{c} \vec{H} \qquad \operatorname{rot} \vec{H} = -i\varepsilon \frac{\omega}{c} \vec{E}$$

диэлектрическая проницаемость среды ε есть функция координат точки. Подставив \vec{H} из уравнений Максвелла дает уравнение для напряженности электрического поля \vec{E} :

$$\Delta\vec{E} + \varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E} - \text{graddiv}\vec{E} = 0.$$

Исключение же \vec{E} дает уравнение для \vec{H} :

$$\Delta\vec{H} + \varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H} + \frac{1}{\varepsilon} [\nabla\varepsilon \cdot \text{rot}\vec{H}] = 0.$$

Из последнего уравнения следует уравнение:

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - \varepsilon \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) = \mu_0 \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial^2 H_x}{\partial t^2}$$

В случае рассматриваемого волновода, не содержащего анизотропных слоев и имеющего правильную прямоугольную форму поперечного сечения, для описания свойств волноводных мод подходит полувекторное волновое уравнение [2]:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \left(\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 \right) H = 0, \quad (1)$$

$H = H_x$ – поперечная компонента магнитного поля, ω – частота излучения, $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$ – распределение диэлектрической проницаемости в поперечном сечении волноводной структуры, β – константа распространения волноводной моды.

На рисунке 1 показан оптический микрополосковый волновод. Он состоит из пленки золота толщиной d и шириной d_1 , помещенной в однородную диэлектрическую среду оксида кремния.

Исключая угловые сегменты из области сечения волновода диэлектрическую проницаемость для такой геометрии можно записать в едином аналитическом виде:

$$\varepsilon(x, y) = \varepsilon_0 \theta(|x| - d/2) \theta(|y| - d_1/2) + \varepsilon_1 \theta(d/2 - |x|) \theta(|y| - d_1/2) + \varepsilon_1 \theta(d_1/2 - |y|) \theta(|x| - d/2)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость золота на частоте, соответствующей длине волны 1.55 мкм, ε_1 – диэлектрическая проницаемость окиси кремния на той же частоте, $\theta(x)$ - функция Хевисайда.

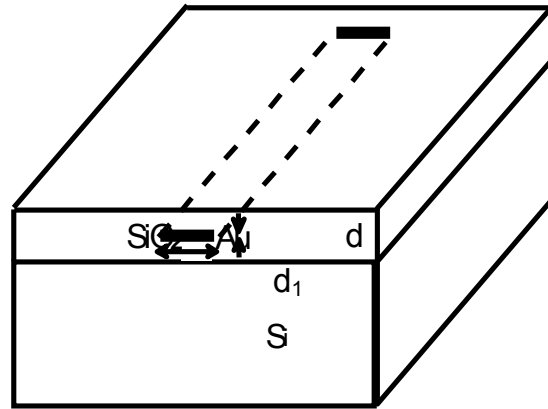


Рис.1. Оптический плазмонный микрополосковый волновод.

Представим диэлектрическую проницаемость золота ε_0 в виде двух слагаемых: $\varepsilon_0 = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}$ и проведем для каждого из них преобразование:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{01}\theta(|x| - d/2)\theta(|y| - d_1/2) &= \\ &= \varepsilon_{01}\theta(|x| - d/2) - \varepsilon_{01}\theta(d_1/2 - |y|)\theta(|x| - d/2) \end{aligned}$$

Окончательно выражение для диэлектрической проницаемости примет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, y) &= \theta(|x| - d/2)(\varepsilon_{01} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_{01})\theta(d_1/2 - |y|)) + \\ &+ \theta(|y| - d_1/2)(\varepsilon_{02} + (\varepsilon_1 - \varepsilon_{02})\theta(d, 2 - |x|)) \end{aligned}$$

Для упрощения вычислений при решении уравнения (1) введем обозначения: $\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2 = \kappa^2$. Перенесем первое и третье слагаемое правой части уравнения

(1) в левую часть, уравнение примет вид: $\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - \kappa^2 H$. Обе части

уравнения обозначим функцией $-\kappa_1^2 H$:

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) - \kappa^2 H = -\kappa_1^2 H \quad (2)$$

Перенесем второе и третье слагаемое правой части уравнения (1) в левую часть, уравнение примет вид: $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \kappa^2 H$. Обе части уравнения обозначим функцией $-\kappa_2^2 H$:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \kappa^2 H = -\kappa_2^2 H. \quad (3)$$

Для того, чтобы определить связь между функциями κ_1^2 и κ_2^2 , сложим попарно левые и средние части уравнений (2,3), получим, что в обоих случаях сумма равна: $-\kappa^2 H$. Следовательно, κ^2 равно: $\kappa^2 = \kappa_1^2 + \kappa_2^2$. В области $|x| > d/2$, $|y| < d_1/2$ мы имеем планарный волновод, в этой геометрии поле не зависит от координаты x , поэтому $\kappa_1^2 = 0$, а в области $|x| < d/2$, $|y| > d_1/2$ — $\kappa_2^2 = 0$. Отсюда следует, что κ_1^2 отлично от нуля при выполнении неравенства $|x| < d/2$, а κ_2^2 — в области $|y| < d_1/2$. Следовательно, κ^2 можно представить в виде:

$$\kappa^2 = \kappa_1^2 \theta(|x| - d/2) + \kappa_2^2 \theta(|y| - d_1/2).$$

Сравнивая выражения для $\varepsilon(x, y)$ и κ^2 , и учитывая независимость функций Хевисайда от различных переменных, приходим к равенствам:

$$\kappa_1^2 = \kappa_{10}^2 + \left((\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \frac{\omega^2}{c^2} + \kappa_{20}^2 \right) \theta(|x| - d/2), \quad \kappa_2^2 = \kappa_{20}^2 + \left((\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \frac{\omega^2}{c^2} + \kappa_{10}^2 \right) \theta(|y| - d_1/2).$$

Таким образом, функция κ_2^2 испытывает скачек на границах волновода, перпендикулярных оси y . А функция κ_1^2 испытывает скачек на границах волновода, перпендикулярных оси x . Здесь κ_{10}^2 и κ_{20}^2 — константы, причем $\kappa_{10}^2 + \kappa_{20}^2 = \kappa_0^2$, $\kappa_0^2 = \varepsilon_0 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2$. Определив правые части уравнений (2,3), можно приступить к решению этих уравнений.

В [3] нами решено уравнение (2), получен результат, который в наших обозначениях запишется в виде:

$$H(x, y) = H_0(y) \exp \left(- \int \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) dx \right),$$

где $a(x, y)$ определяется интегральным уравнением

$$a(x, y) = \int \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} dx + \int_{x_0}^x \left(\frac{\varepsilon_0 \beta^2}{\varepsilon \kappa_{10}} - \kappa_{10} \right) \sin^2(a(x, y)) \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) dx}{\varepsilon_0}. \quad (4)$$

Откуда следует, что при $\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = 0$ решение имеет вид:

$$H(x, y) = H_0(y) \cos(\kappa_{10} x), |x| < d/2, |y| < d_1/2.$$

Найдем еще одно решение уравнения (2), полагая первой средой в порядке проведения интегрирования оксид кремния, а второй – металл. Правая часть уравнения (2) при этом запишется в виде: $\kappa_1^2 = \kappa_{11}^2 + \left((\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \frac{\omega^2}{c^2} + \kappa_{21}^2 \right) \theta(|x| - d/2)$,

где $\kappa_{11}^2 + \kappa_{21}^2 = \kappa_{01}^2$, $\kappa_{01}^2 = \varepsilon_1 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2$. Проводя интегрирование по переменной $L - x$, то

при $\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = 0$ получим выражение для магнитного поля:

$$H(x, y) = H_L(y) \cos(\kappa_{11}(L - x)), |x| > d/2, |y| < d_1/2.$$

Рассмотрим подробнее уравнение (4), учитывая (2) и дважды дифференцируя по x , получаем:

$$-\frac{\partial \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) \right)}{\partial x} + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) \right)^2 = -\kappa_1^2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}.$$

Это линейное дифференциальное уравнение вида $f'(x) - \alpha(x)f(x) = g(x)$.

Его решение [4]: (предполагается, что $\alpha(x) = f(x) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a)$)

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) = \exp \left(\int \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) dx \right) \int \kappa_1^2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \exp \left(- \int \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \kappa_{10} \operatorname{tg}(a) dx \right) dx.$$

В левой части этого уравнения стоит функция: $\frac{\partial \ln(H(x, y))}{\partial x}$, в правой же –

интеграл: $\frac{1}{H(x)} \int \kappa_1^2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} H(x) dx$. Для первого решения (2), интегрируя в области

$x < d, y < d_1$, где $H(x, y) = H_0(y) \cos(\kappa_{10} x)$, имеем: $\kappa_{10} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \operatorname{tg}(x \kappa_{10})$. Для второго решения

уравнения (2) в области $x > d, y < d_1$, где $H(x, y) = H_L(y) \cos(\kappa_{11}(L - x))$, интеграл, деленный на $H(x)$, равен $\kappa_{11} \operatorname{tg}(\kappa_{20}(L - x))$. Так как размер подложки много больше толщины пленки, то в предельном случае можно считать размер подложки беско-

нечно большим. Поскольку оба решения справедливы и непрерывны, а также, имея в виду комплексный характер κ_{11} и устремляя L к бесконечности, получаем дисперсионное уравнение:

$$\kappa_{10} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \operatorname{tg}(d\kappa_{10}/2) = i\kappa_{11}. \quad (5)$$

Решая уравнение (3), соответственно получим:

$$\kappa_{20} \operatorname{tg}(d_1\kappa_{20}/2) = \kappa_{21} \operatorname{tg}(\kappa_{21}(d_1/2 - \infty)) = i\kappa_{21}. \quad (6)$$

Имея два уравнения относительно $\kappa_{10}, \kappa_{20}, \beta$, а также уравнение:

$$\kappa_{10}^2 + \kappa_{20}^2 = \varepsilon_0 \frac{\omega^2}{c^2} - \beta^2, \text{ найдем три этих величины.}$$

Проведенные вычисления показали, что поперечную компоненту магнитного поля можно записать в виде $H = H(x)H(y)$. Действительно, в области $|y| < d_1/2$ поперечная компонента магнитного поля равна: $H_0 F(x) \cos(\kappa_{20}y)$, а в области $|x| < d/2 - H_0 F_1(y) \cos(\kappa_{10}x)$. Окончательно из работы [3] получаем решение уравнений (2-3):

$$F(x) = \begin{cases} \cos(\kappa_{10}x), 0 \leq |x| \leq d/2 \\ \cos(f(x)) \times \left| \frac{g - \sin^2(\kappa_{10}d/2)}{g - \sin^2(f(x))} \right|^{1/2}, |x| > d/2 \end{cases} \quad (7)$$

где

$$f(x) = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{g}{g-1}} \operatorname{tg} \left(\frac{\frac{\kappa_{11}^2}{\kappa_{10}\varepsilon} (|x| - d/2) + \sqrt{\frac{g}{g-1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{g+1}{g}} \operatorname{tg}(y_0) \right)}{\sqrt{\frac{g-1}{g}}} \right) \right), \quad g = \frac{\kappa_{11}^2 \varepsilon_0}{(\beta^2 \varepsilon_0 - \kappa_{10}^2 \varepsilon_1) \Delta \varepsilon},$$

$$y_0 = \kappa_{10} d/2.$$

Функция $F_1(y)$ записывается аналогично, но с другим коэффициентом

$$g = \frac{\kappa_{21}^2}{\frac{\omega^2}{c^2} \Delta \varepsilon}, \text{ и заменой } y_0 = \kappa_{10} d/2 \text{ на } x_0 = \kappa_{20} d_1/2 \text{ и } \kappa_1 \text{ на } \kappa_2.$$

2. Численный расчет и обсуждение результатов

Проанализируем формулы (5-7) аналитически и графически. Сначала рассмотрим дисперсионные уравнения (5-6). Проведенные нами вычисления соответствуют рассмотрению двух одномерных трехслойных структур. Полученное в ходе расчета уравнение (5) совпадает с дисперсионным уравнением для структуры «диэлектрик-металл-диэлектрик» [1,3]. Рассчитанное по этому уравнению значение эффективного показателя преломления близко к показателю преломления оксида кремния, однако оно имеет мнимую часть, характеризующую потери в металле. Уравнение (6) в свою очередь совпадает с дисперсионным уравнением для диэлектрического волновода [5], и расчет с эффективным показателем преломления в области металла определяет значение β . Этот параметр характеризует потери волновода.

В случае плазмонного волновода потери связаны с поглощением в металле и характеризуются пробегом плазмонного сигнала. Дисперсионное уравнение (5) соответствует увеличению пробега плазмонной волны с уменьшением толщины металла в отличие от второго возможного для среды «диэлектрик-металл-диэлектрик» дисперсионного уравнения, соответствующего антисимметричной по x поперечной компоненте магнитного поля, пробег плазмонов для которого уменьшается с уменьшением толщины пленки. В случае уравнения (5) пробег составляет единицы сантиметров для толщины металлической пленки 10 нм и определяет малые потери плазмонного волновода. В таблице 1 приведены значения потерь волновода на единицу его длины в зависимости от толщины золотой пленки.

Далее рассмотрим уравнение (7). На рисунке 2 показана зависимость поперечной компоненты магнитного поля от координат. Параметры уравнения (7) рассчитаны из уравнений (5-6) с показателями преломления диэлектрика $n_d = 1.4558$ и металла $n_m = \sqrt{-131.9475 + 12.65i}$ для длины волны 1.55 мкм, при размерах пленки $d = 20$ нм и $d_1 = 8$ мкм. Можно видеть, что поле спадает при удале-

нии от пленки, как в направлении x , так и в направлении y . Эффективный размер моды по уровню $1/e$ - 12 мкм (по оси “X”); 15 мкм (по оси “Y”). Ширина канала 8 мкм позволяет осуществить стыковку с минимальными потерями со стандартным одномодовым волокном SMF-28, имеющим эффективный радиус моды 9-10 мкм.

Таблица 1.

Расчетные значения потерь энергии в плазмонном микрополосковом волноводе на единицу его длины

d , нм	10	20	30	40	50	60
Потери, дБ/см	1.36	2.04	29.9	92.4	100.6	128.8

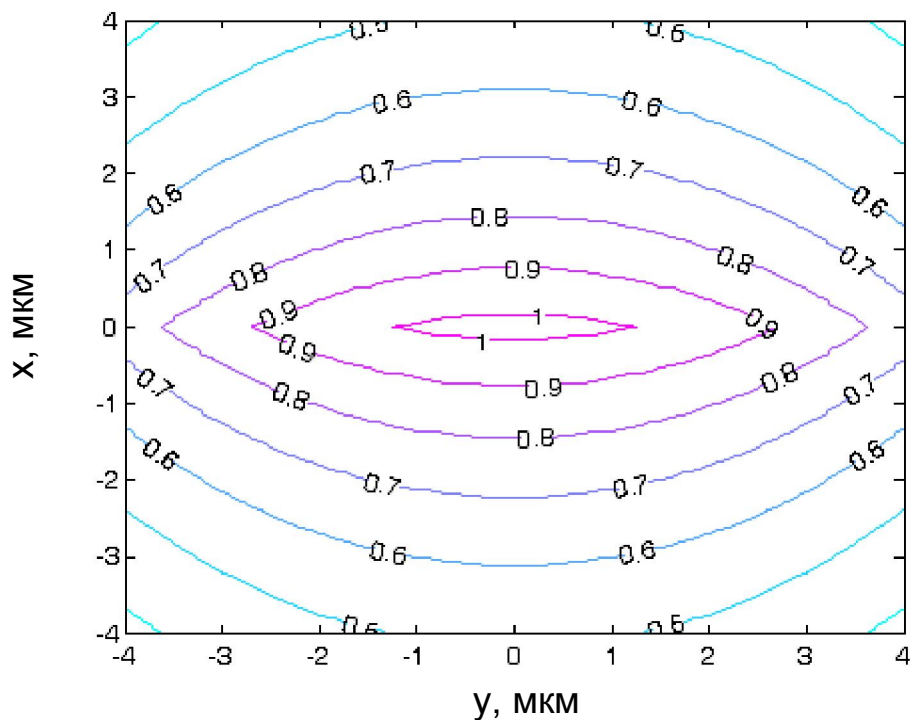


Рисунок 2. Распределение напряженности магнитного поля фундаментальной моды в поперечном сечении плазмонного микрополоскового волновода.

Выводы

Таким образом, применение полученного нами в работе [3] результата для трехслойной среды (планарного волновода) возможно в более сложном двумерном случае, то есть для канального волновода. Такое обобщение позволяет анализировать распространение электромагнитной волны в микрополосковом волноводе. Аналитический расчетный результат, показал что плазмонный волновод, состоящий из тонкой золотой микрополоски на подложке из оксида кремния, имеет, при толщине пленки в 10-15 нм малые потери на единицу длины волновода. Уменьшение толщины пленки приводит к уменьшению потерь. Этот результат совпадает с численным расчетом, который можно провести прямым конечно-разностным решением волнового уравнения. Преимущество аналитического решения перед численными методами связано с простотой вычислений, большей общностью и возможностью быстро проанализировать влияние параметров плазмонного волновода на распространение электромагнитных волн.

Библиографический список

1. Климов В.В. Наноплазмоника, Физматлит. 2010. 481с.
2. Xu S.L., Huang W.P. Stern M.S., Chaudhuri S.K. "Full-vectorial mode calculations by finite difference method" // IEE Proceedings (Optoelectronics), 1994, v.141, N5, P.281-286
3. Селина Н.В., Векшин М.М., Тумаев Е.Н., Яковенко Н.А. Аналитический подход к расчету электромагнитного поля в системе «металл-диэлектрик-металл» // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2010, №3, с.43.
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука. 1971. 576с.
5. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир. 1984. 512с.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

Томилин А.Н.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Современное здание, независимо от своего типа – жилой ли это дом, офисный или торговый центр, или же спортивное сооружение – содержит большой объем инженерного оборудования. Причем доля инженерного оборудования в общей стоимости здания непрерывно растет. Почему? Потому что с каждым годом также неуклонно повышаются представления о комфортности пребывания человека в здании.

В настоящее время поддержанием в здании требуемых санитарно-гигиенических условий, обеспечением его безопасности и защищенности от внештатных ситуаций занимаются множество подсистем инженерного оборудования, каждая из которых характеризуется достаточно большим набором контролируемых технологических параметров и сигналов управления. В совокупности, все они образуют то, что называется системой жизнеобеспечения здания.

В общем случае, такая система включает в себя следующие направления (подсистемы):

- вентиляции и кондиционирования воздуха (приточные и вытяжные системы, центральные кондиционеры и кондиционеры доводчики: фанкойлы и регуляторы воздушного потока, тепловые завесы);
- холодоснабжения (холодильный центр, станции холодоснабжения);
- теплоснабжения (индивидуальный тепловой пункт (ИТП) или котельные установки);
- водоснабжения, водоподготовки, канализации, дренажа (станции управления насосами);
- пожарная и охранная сигнализации;

- противопожарная автоматика (вентиляторы подпора воздухом и вентиляторы дымоудаления, огнезащитные клапаны и клапаны дымоудаления, система пожаротушения, системы водяного и газового пожаротушения);
- электроснабжения и электроосвещения (трансформаторная подстанция, дизель-генераторная установка, распределительные устройства, мощные источники бесперебойного питания, электрообогрев трубопроводов, воронок и лотков водостока);
- лифтовое и эскалаторное оборудование;

Возможны и другие подсистемы [1].

Для организации взаимодействия между отдельными подсистемами инженерного оборудования, а также автоматизированного оперативного контроля и управления организуется система диспетчеризации.

Итак, система диспетчеризации – это система, которая позволяет с одного компьютера осуществлять наблюдение и управление инженерными системами здания.

Исходя из определения, мы понимаем, что результатом диспетчеризации является компьютер, на экране которого визуальным образом отображается вся информация о работе инженерных систем, а оператор с помощью компьютерной мыши и клавиатуры может управлять ими. Кроме того, в компьютере сохраняется информация обо всей истории работы инженерных систем здания.

Основные задачи системы диспетчеризации это – централизованный оперативный контроль за режимами работы процессов, происходящих на обслуживаемом объекте (телеметрия), и управление этими процессами (телемеханика и автоматизация).

Прикладные задачи системы диспетчеризации:

- передача на центральный диспетчерский пункт технических и диагностических параметров применяемого технологического оборудования (мониторинг состояния оборудования);

- оптимизация режимов работы технологического оборудования, увеличение его ресурса;
- передача сообщений аварийной (охранной и пожарной) сигнализации, обеспечение безопасности;
- передача значений расхода энергоресурсов (учет);
- дистанционное управление технологическим оборудованием (удаленная перенастройка параметров регулирования оборудования, перепрограммирование контроллеров);
- опрос и диагностика контроллеров, управляющих системами (узлами) объекта диспетчеризации;
- протоколирование всех событий (аварий, действий диспетчера, включения и выключения исполнительных механизмов, поступления тревожных сигналов и сообщений и т.п.);

Систематизация и классификация технологического оборудования – в первую очередь, систем тепло- и энергоснабжения, систем жизнеобеспечения, а также небольших котельных – позволили сформулировать основные требования к оптимальному построению комплекса средств автоматизации и диспетчеризации [1, 2].

Основными требованиями к оптимальному построению системы диспетчеризации являются:

- построение системы должно учитывать функциональную направленность решаемых задач: проведение оперативного контроля и управления, ресурсосбережение и сокращение эксплуатационных затрат, поддержание безопасности и т.д.;
- надежность и помехоустойчивость: система по сбору и обмену информацией должна быть построена на не связанных между собой средствах;
- унифицируемость и универсальность применяемого оборудования: средства по сбору и обмену информацией должны быть однотипными и предназначены для решения задач в составе с любым оборудованием;

- возможность поэтапного внедрения и дальнейшего расширения до комплексной интегрированной системы диспетчеризации и безопасности (гибкая структура) – от простых локальных задач к комплексным проектам с развитой диспетчеризацией.

За счет этого внедрение системы диспетчеризации можно разбить на несколько этапов с учетом последовательности их реализации:

- учет – диспетчеризация – энергоаудит/безопасность – энергосбережение/дальнейшее сокращение энергозатрат за счет удаленного регулирования;
- возможность параллельного сбора данных со всех средств обмена информацией. Это существенно сокращает время опроса и передачи информации, расширяет возможности системы в подключении практически неограниченного количества средств сбора данных. Существенно (в разы) уменьшает стоимость трафика передачи информации;
- получение информации различным категориям пользователей с возможностью ограничения уровня доступа;
- дистанционная диагностика оборудования: количество выездов бригад сервисного и технического обслуживания может быть минимальным;
- доступность в обучении, монтаже, наладке и эксплуатации;
- соотношение «цена–качество» – возможность выбора оптимального технико-экономического решения (для частных владений, типовых многоквартирных домов, коммерческих и государственных предприятий).

Решение должно учитывать развитие системы, т.е. при увеличении количества контролируемых параметров всегда можно нарастить систему без замены оборудования и программного обеспечения [3, 4].

Продуктивность работы диспетчера зависит от организации рабочего места, организации механизма оперативного контроля и управления, для решения задач диспетчеризации, выполняя при этом основную целевую функцию производственного процесса или выполнения услуг. Так, например, диспетчеризация объектов ЖКХ заключается в решении вопросов учета, мониторинга

качества поставки и эффективного использования энергоресурсов, контроля работы и состояния систем жизнеобеспечения и их безопасности, сокращения эксплуатационных затрат.

Для выполнения задач диспетчеризации разрабатывается программный интерфейс пользователя или рабочее место для диспетчера. Задачи данного программного продукта (комплекса):

- постоянно диагностировать состояние оборудования системы диспетчеризации, наличие связи с контроллерами;
- с заданной периодичностью и по определённому алгоритму, автономно контролировать состояние объектов охваченных системой диспетчеризации на предмет их нормальной работы, результаты контроля отражать для просмотра;
- в случае возникновения нештатной или аварийной ситуации, подавать световые и звуковые сигналы, характеризовать ситуацию, предоставлять перечень мероприятий, действий диспетчера по локализации и ликвидации аварий;
- производить автоматическую регистрацию всех событий, в том числе, действий диспетчера.

Необходимость создания такой системы диспетчеризации тем оправданнее, чем больше объем инженерного оборудования. Общее количество параметров контроля и управления современного здания (комплекса зданий) может достигать нескольких тысяч.

Стремление вывести органы управления инженерными системами из далеких подсобных помещений в комнату службы эксплуатации было всегда. Если по всему здания разбросаны насосы, вентиляторы и т.п., то понятно желание управлять ими из одного или нескольких мест, т.е. осуществлять дистанционное управление, но раньше это осуществлялось не с помощью компьютера, а вручную. На стенах располагались многочисленные щиты с лампочками, которые подавали сигнал о неисправности того или иного рода, кнопками управления и т.п. [5, 6, 7] .

Система диспетчеризации – это просто новое поколение удаленного управления инженерными системами. Все осуществляется с одного компьютера, который к тому же сообщает об авариях, выдает рекомендации, сохраняет все в памяти и т.п.

Существует путаница в понятиях автоматизация и диспетчеризация зданий. Зачастую приходится слышать, что «использование автоматизации и диспетчеризации зданий позволяет сэкономить до 40% эксплуатационных расходов».

В действительности, это не так, потому что в данном случае идет речь не об экономии с помощью диспетчеризации, а экономии между зданием, оснащенным автоматизацией и зданием, не оснащенном никакой автоматизацией вообще. Иначе говоря, сравнивается современное здание и здание 50-х годов, фактически не имеющее никакой автоматизации по контролю температуры воздуха, расхода воды и т.п.

Конечно, если говорить о здании, которое не имеет автоматизации, то конечно в нем происходят колоссальный перерасход энергии.

Если отопление не регулируется, если вентиляция не снижает расходы тепла ночью и т.п., то затраты на содержание такого здания будут высокие.

И все-таки, какую экономию дает система диспетчеризации по сравнению со зданием, которое полностью автоматизировано, но не диспетчеризировано? Диспетчеризация дает экономию 15-20% в год на обслуживании и эксплуатации.

Ключевой вопрос такой: какую экономию дает или не дает система диспетчеризации?

Сейчас все здания оснащаются довольно мощной автоматизацией инженерных систем. Каждая вентиляционная установка имеет собственный шкаф автоматики, каждый кондиционер самостоятельно контролирует температуру, автоматика теплового пункта поддерживает заданную температуру воды и т.п.

Т.е. все инженерные системы любого современного здания автоматизированы в полном объеме. А вот относительно диспетчеризации вопрос открыт.

Диспетчеризация, по сути, это всего лишь расширение традиционной автоматизации инженерных систем до уровня, когда все управление и мониторинг систем осуществляется с одного рабочего компьютера (или нескольких). Т.е. диспетчеризация не добавляет существенных функций в работу самой автоматизации инженерных систем. Не важно, есть диспетчеризация или нет, но, к примеру, вентиляционная установка в любом случае поддерживает заданную температуру приточного воздуха. Функция диспетчеризации позволяет только сделать наблюдение и управление этой вентиляционной установкой более удобной, наглядной и т.п. Компьютер напомнит о необходимости заменить фильтр, сообщит об аварии или предаварийной ситуации и т.п. Именно расширенные возможности компьютера и позволяют говорить о существенной пользе системы диспетчеризации.

Компьютеризация позволяет получить следующие преимущества, а также сэкономить: снижение количества обслуживающего персонала на 15-20%.

Нет необходимости выполнять постоянные обходы оборудования с целью контроля его работы, сравнение параметров ее работы с заданными и т.п. Все можно сделать за считанные секунды на диспетчерском компьютере в различных окнах программы.

Представьте торговый центр площадью десятки тысяч квадратных метров, в котором как минимум 50 вентиляционных установок. Чтобы осмотреть их все необходимо потратить несколько часов, тогда как диспетчер может это сделать мгновенно.

Мгновенное оповещение о неисправности и аварийных ситуациях, а также быстрая диагностика неисправности систем. Если инженерные системы диспетчеризированы, то большинство типовых аварийных ситуаций диагностируются автоматически. К примеру, выход из строя насоса теплового пункта,

поломка вентилятора приточной установки, падение давление в спринклерной системе и т.п.

Своевременная подача информации о необходимости выполнения сервисного обслуживания оборудования. К примеру, если сервисное обслуживание чиллера должно осуществляться раз в 500 часов, то компьютер заблаговременно сообщит об этом, что позволит не превысить необходимый меж сервисный ресурс, а также позволит вовремя приобрести необходимые материалы. Компьютер может выдать список необходимых материалов для обслуживания всего оборудования в текущем месяце и т.д. и т.п. Компьютеризация позволяет внести больше планирования в работу инженерных служб.

Сбор и хранение всех параметров работы систем в течение всего периода эксплуатации. Сохранение «истории» жизни систем дает важнейшие данные для анализа их работы, прогнозирования возможных поломок и т.п. Эти данные могут быть использованы бесчисленным количеством способов: определение проблемных помещений (к примеру, в которых система не может поддерживать заданную температуру), решение споров с арендаторами (к примеру, если обсуждается вопрос скачков напряжения и т.п.), прогноз затрат на электроэнергию в следующем сезоне и т.п. и т.д.

Еще одно преимущество – это возможность контроля со стороны владельца здания качества работы самой службы эксплуатации. Согласитесь, для владельца было бы неприятной новостью, что из-за работы персонала спустя рукава, часть арендаторов не получают того уровня комфорта и безопасности, за который они заплатили.

Возможность удаленного управления и контроля системами из любой точки мира.

Итак, все преимущества системы диспетчеризации здания следуют из компьютеризации [8, 9].

Средства автоматизации состоят из исполнительных механизмов, т.е. электромеханических устройств, которые изменяют параметры работы той или системы.

К ним относятся:

- частотные преобразователи на двигателях вентиляторов, насосов, компрессоров и т.п., что позволяет менять расход воздуха, расход воды и т.д. и т.п.;
- привода заслонок, задвижек и т.п., которые позволяет открыть/закрыть/изменить количество поступающей воды в калорифер, изменить количество воздуха, поступающего в конкретное помещение и т.п.;
- датчики, т.е. своего рода измерительные приборы. Они позволяют определять температуру воздуха в помещениях, температуру воды, расход воды, количество углекислого газа, засоренность фильтров и т.п. Система автоматизации работает на основе данных, которые собирают десятки и сотни датчиков во всем здании;
- силовое оборудование – электрические шкафы.

Поскольку сигналы, которые подает система автоматики слаботочные, требуются устройства, которые отреагируют на слабый импульс от автоматики и запустят тяжелое оборудование. Например, каждый компрессор большой холодильной машины может потреблять 50 кВт электричества, поэтому требуется силовая автоматика (пускатели, реле и т.п.), которая запустит агрегат от слаботочного сигнала.

Контроллеры фактически – это процессоры компьютера. Все, что делает контроллер, это получает данные от датчиков, сравнивает их с требуемыми параметрами, которые задал человек (скажем, требуемую температуру воздуха в помещении), и вырабатывает сигналы на открытие/закрытие/изменение положение исполнительных механизмов. После этого, скажем, температура воздуха достигла заданной температуры, датчик «сообщил» контроллеру, что все в порядке, контроллер дал команду исполнительному механизму «застыть» в заданном положении. Большинство контроллеров могут работать по определен-

ному расписанию, календарю и т.п. Они могут получать данные от датчиков движения, датчиков углекислого газа, учитывать температуру на улице, день недели и т.п. Обычно один контроллер управляет одним или несколькими агрегатом. Например, каждая вентиляционная установка имеет свой контроллер, каждый наружный блок системы кондиционирования.

Таким стандартным набором оборудования обладает любая современная автоматика.

Как видно, речь пока не идет о диспетчеризации, но очевидно, что даже обычная, стандартная автоматизация, может выполнить всю необходимую работу – поддержать заданные параметры, экономить электроэнергию и т.п.

Теперь рассмотрим, что добавляется к этому набору оборудования, если задача стоит получить здание, оснащенное системой диспетчеризации.

По сути, диспетчеризация, это модернизация традиционной автоматики до уровня, когда все управление может осуществляться не с десятков контроллеров, а с одного компьютера (рис.1).



Рис. 1. Функции системы диспетчеризации

Для этого, все, что нужно сделать, это данные от всех контроллеров передать на компьютер, в котором эти данные будут сохранены и обработаны, и с которого оператор может внести изменения в работу каждого контроллера. Контроллеры и компьютеру соединены с помощью шин. Для того, чтобы компьютер и контроллер «поняли» друг друга требуется определенный протокол [2, 10].

Раньше производители стремились использовать «закрытые» протоколы, т.е. язык, который был написан под конкретное оборудование. Это заставляло навсегда привязываться к конкретному производителю оборудования.

Сейчас производители договорились максимально унифицировать оборудование, чтобы в одном здании могли ужиться контроллеры различных компаний. Самые популярные протоколы: Lon, BacNet и др.

Автоматизация зданий может быть превращена в диспетчеризованную автоматику, если будут установлены:

- шины
- сетевое оборудование
- компьютер с программой.

Система диспетчеризации позволяет наблюдать за работой представленных подсистем в реальном времени. Диспетчеризация позволяет контролировать различные процессы, происходящие на удаленных объектах, изменять параметры устройств, которые обслуживают данные объекты, а также просматривать протоколы их работы. Диспетчеризация охватывает информационные системы, включающие базы данных предприятия, а также оборудование.

Для сбора и последующей обработки данных используются программируемые контроллеры, поддерживающие разнообразные стандарты передачи данных. Такие контроллеры работают в двух режимах: независимом, без внешнего управления и зависимом, совместно с центральным пультом управления.

Система диспетчеризации инженерных объектов бывает двух типов:

- локальная, позволяющая передавать технологические данные как от одной,

так и от нескольких инженерных систем на компьютер оператора (пункт диспетчеризации). В данном случае мы имеем замкнутую систему, т.е. оборудование и пульт управления размещены на одном объекте или в одном здании. Зачастую локальную диспетчеризацию называют автоматизацией.

- удаленная, позволяющая осуществлять передачу параметров от одной или нескольких автоматизированных систем с территориально удаленных объектов на центральную станцию диспетчеризации, с помощью различных каналов передачи данных. Удаленная диспетчеризация может применяться для объединения нескольких зданий, имеющих локальную диспетчеризацию [7].

Существует всего два принципиальных подхода к автоматизации и диспетчеризации зданий:

- снизу вверх, которая подразумевает объединение отдельных элементов локальной автоматики в систему;
- сверху вниз, которая предусматривает применение единой, заранее выбранной, аппаратно-программной платформы для автоматизации и последующей диспетчеризации здания.

Оба подхода имеют специфические преимущества, недостатки и свою область применения. Кроме того, реализовать каждый из них в чистом виде на конкретном объекте удастся редко.

Первый подход состоит в максимальном использовании готовых элементов автоматики. Изготовители инженерного оборудования, такого как повысительные насосные станции, приточные вентиляционные системы, предлагают поставку своего оборудования вместе с комплектными системами управления. Комплектные системы дополняются нестандартными элементами и объединяются вместе с ними (интегрируются) в единую систему.

Этот подход закреплен в российских нормах (СНиП на диспетчеризацию) и до определенной насыщенности техническими системами является оптимальным. Диспетчеризация состоит в приеме и передаче дискретных сигналов, щи-

ты диспетчеризации выполняются на релейной базе, структура такой системы приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структура системы диспетчеризации

Преимущества подобного решения:

- низкая цена проекта;
- простота и наглядность схем,
- монтаж и наладку такой системы способен выполнить грамотный электрик.

Недостатки:

- большой объем прокладки контрольных кабелей;
- отсутствие предупредительной сигнализации, сигнал о неисправности говорит о том, что работа какой-либо системы уже прекратилась;
- крайне затрудненное расширение;
- низкая надежность;
- полное отсутствие самодиагностики системы;
- как следствие двух последних факторов – для поддержания системы в работоспособном состоянии требуется квалифицированное обслуживание с постоянным проведением большого объема диагностических и наладочных работ.

Максимальная конфигурация инженерного оборудования типичного здания, которое целесообразно диспетчеризовать подобным образом, как правило выглядит так:

- приточные или приточно-вытяжные вентиляционные системы (до 5 ед.);
- вытяжные вентиляционные системы (до 8 ед.);
- системы дымоудаления (до 3 ед.);
- системы подпора воздуха в противопожарные тамбуры и лифты (как правило одна);
- огнезадерживающие клапаны (может быть значительное количество, до 70 ед.);
- противодымные клапаны (до 3 ед.);
- противопожарная повысительная насосная станция или обводная задвижка водомерного узла;
- повысительная насосная станция хозяйственно-питьевого водоснабжения.

При большем количестве инженерного оборудования, подобные решения становятся технически бессмысленны, поскольку надежность системы диспетчеризации падает настолько, что выдаваемая ей информация теряет достоверность, иногда частота отказов системы диспетчеризации может превысить частоту отказов в самих инженерных системах.

Экономически это также нецелесообразно, поскольку даже без учета эксплуатационных затрат, стоимость не стандартизированных щитов и огромного количества кабеля перевешивает затраты на создание систем диспетчеризации по принципу «сверху вниз».

Второй подход состоит в отказе от автоматики, поставляемой изготовителями инженерного оборудования, в пользу создания системы автоматики здания, построенной на комплектующих одного из известных производителей систем автоматики. На рынке имеется достаточное количество решений, предлагающих комплексные системы автоматизации и диспетчеризации зданий. Все они состоят из:

- специализированной SCADA -системы;
- сети передачи данных;
- контроллеров нижнего уровня;

– датчиков и исполнительных механизмов.

Данная система, установленная в здании, охватывает все инженерные системы. Структура такой системы автоматизации и диспетчеризации здания приведена на рис. 3 и состоит из щитов с мощными диспетчеризуемыми контроллерами, устанавливаемыми в технических помещениях – вентиляционных камерах, помещениях насосных, тепловых узлах, обслуживающих все находящееся в них инженерное оборудование. Контроллеры данных щитов получают информацию непосредственно от датчиков и управляют механизмами инженерных систем. Все контроллеры напрямую связаны с рабочей станцией диспетчера по единому интерфейсу. Структура такой системы диспетчеризации получается наиболее простой из возможных. Исключение составляют насосные станции, котлы, холодильные машины (чиллеры) и некоторые другие специализированные агрегаты, имеющие встроенную автоматику, обеспечивающую сложные алгоритмы управления или функции безопасности. Производители такого оборудования как правило разрабатывают свои уникальные интерфейсы, и поэтому каждый производитель автоматики имеет целую «коллекцию» специальных интерфейсных карт для подключения к своей системе диспетчеризации.



Рис. 3. Структура системы автоматизации и диспетчеризации здания

Преимущества подхода к автоматизации и диспетчеризации зданий решения сверху вниз:

- минимальное время создания системы диспетчеризации – создание сети, отображение информации на диспетчерском компьютере, ведение протоколов событий выполняется настройкой SCADA -системы;
- высокая достоверность доставляемой диспетчеру информации, вся информация, которой располагают локальные контроллеры автоматически видна для рабочей станции;
- автоматическое протоколирование, ведение трендов и архивов как работы инженерных систем, так и действий операторов;
- функции учета выработки ресурса и планирования технического обслуживания;
- минимальные затраты на сеть диспетчеризации – это просто один кабель, последовательно или по кольцу обходящий контроллеры;
- практически неограниченная наращиваемость количества контроллеров в сети и как правило высокая расширяемость самих контроллеров, достаточная для больших зданий дальность прокладки сети и высокая скорость передачи информации;
- встроенные функции самодиагностики, самоконфигурации сети, высокая защищенность от помех, сохранение работоспособности сети при отказах отдельных контроллеров, как правило возможность «горячего» подключения контроллеров в сеть;
- продолжение работы контроллеров при обрыве сети;
- возможный отход от создания систем автоматизации по отдельным инженерным системам к территориальному принципу, например, к поэтажной автоматизации на башенных зданиях, когда один контроллер управляет элементами всех инженерных систем расположенных на этаже;
- упрощение технического обслуживания и эксплуатации системы автоматизации и диспетчеризации, ведь система созданная на оборудовании

одного производителя имеет минимальную номенклатуру комплектующих;

- возможность передачи системы на обслуживание в сеть фирменных сервисных инженерных центров.

Недостатки данной системы:

- дополнительное время и затраты на разработку проекта автоматизации (зато система диспетчеризации оказывается практически бесплатным приложением);
- более продолжительный период от начала монтажа инженерной системы до запуска ее в работу, поскольку задействуются не одна а две компании;
- при производстве монтажных работ требуется более высокий уровень технического надзора и организация взаимодействия между подрядчиками.
- при диспетчеризации наиболее крупных зданий никакие другие решения не могут сравниться по простоте, надежности и, в результате, экономической эффективности диспетчеризации инженерных систем [11, 7, 12].

Основные функции системы диспетчеризации

- динамическое графическое, наглядное отображение информации;
- построение графиков происходящих процессов;
- контроль за процессами;
- звуковая сигнализация о неисправности;
- распределенная архитектура с неограниченным количеством рабочих мест;
- ведение базы данных о состоянии оборудования;
- снижение влияния человеческого фактора;
- снижение эксплуатационных расходов;
- быстрая и достоверная диагностика состояния объектов;
- контекстные подсказки оператору в аварийных ситуациях;
- авторизованный доступ к информации и управлению;
- ведение журнала событий в автоматическом режиме;
- документальное определение причин аварий, потерь;
- гибкая система построения отчетов (смена, месяц, год).

Библиографический список

1. Харке В. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве//Техносфера. - 2006.- ISBN 5-94836-093-8, 3-7880-7713-1;
2. Барановский В.А. Кондиционирование, вентиляция и отопление помещений//Современная школа.- 2009.- ISBN 978-985-513;
3. Бродач М.М., Шилкин Н.В. «Высотные здания»АВОК №1 2004;
4. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. АВОК-ПРЕСС, 2003.
5. Инженерно-аналитическая группа — эффективный инструмент энергосбережения // Автоматизация и ИТ в энергетике № 9 (2010 год).
6. Андреев Е.В. и др. SCADA-системы: взгляд изнутри//М.: Издательство «РТСофт».-2004-ISBN 5-9900271-1-7.
7. Пьявченко Т.А. Проектирование АСУТП в SCADA-системе: Учебное пособие// Южный федеральный университет, г. Таганрог. – 2007.
8. На пути к энергоэффективному региону // журнал Энергосбережение № 6 (2010 год).
9. Варфоломеев Ю.М., Кокорин О.Я. Системы оборудования для создания микроклимата помещений. //Инфа-М.-2008.-ISBN 978-5-16-003116-10. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха// АВОК Северо-Запад.- 2005.- ISBN 5-902146-05-09.
11. АВОК Стандарт – 1 – 2002. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. Москва 2002.
12. Бондарь Е.С., Гордиенко А.С., Михайлов В.А., Нимич Г.В. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха// ТОВ "Видавничий будинок "Аванпост-Прим".- 2005.- ISBN 966-8571-15-0.

III. ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДВУХ ТИПОВ

Акопьян В.А., Захаров Ю.Н, Паринов И.А., Раевский И.П., Рожков Е.В.

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Проблема создания пьезоэлектрических генераторов (ПГ) различного назначения пока не решена в полном объеме из-за низкой энергоэффективности ПГ и малой выходной мощности уже существующих опытных конструкций. Среди различных проблем, возникающих при создании ПГ можно выделить наиболее существенные, к которым относятся выбор энергоэффективных составов пьезокерамических материалов (ПКМ), разработка электрических схем накопления электрической энергии с минимальной утечкой заряда, поиск геометрических конфигураций и технологий сборки чувствительного элемента ПГ, обеспечивающих максимальную выходную мощность. Подходы, используемые при разрешении этих проблем существенно отличаются в зависимости от области применения и конкретного назначения ПГ. Ранее, проблемы пьезонакопительных систем энергии, включающих в себя ПГ были освещены в обзорах известных ученых в этой области Sadano H., Inman D.J., Anton S.R., Erturk A. et al. [1-4]. В дальнейшем исследования сконцентрировались в направлении изучения характеристик в основном маломощных ПГ, где уже достигнуты ощутимые практические результаты.

В частности, исследования, посвященные разработке различных моделей ПГ, конечно-элементному анализу их выходных характеристик на нескольких модах колебаний, а также свойств различных составов пьезокерамики, используемых в качестве материала чувствительного элемента ПГ позже были выполнены также и нами [5]. На основе результатов этих исследований нами на первом этапе работы был создан образец малогабаритного ПГ оригинальной конструкции. Ниже на рис.1 представлены фотографии экспериментального образца малогабаритного ПГ-001 кантилеверного типа (размеры корпуса 45 ×

30 мм), представленного на рис. 1,2,3 максимальное выходное напряжение которого оказалось равным 5,8 В, а электрическая мощность 0,55 мВт.

На следующем этапе исследований была разработана новая модель пьезогенератора кантилеверного типа с присоединенной массой на свободном конце основания кантилевера, изображенная ниже на фотографии (рис.2). Как известно, присоединенная масса изменяет частоту собственных колебаний кантилевера, что позволяет расширить диапазон чувствительности пьезопреобразователя [6].



Рис.1. Пьезогенератор кантилеверного типа, работающий на изгибных колебаниях: слева–модуль кантилевера в сборе, в центре–вид со снятой крышкой корпуса, справа – пьезоэлемент ПГ.

Пробные исследования этой модели показали перспективность такого направления для повышения выходных характеристик пьезогенератора исследованного типа.



Рис.2 . Пьезогенератор кантилеверного типа с присоединенной массой и электромагнитным возбуждением. Биморф выполнен из пьезокерамики ЦТС-19, размером 15x7x0.5 мм.

Блок усовершенствованной модели ПГ (рис.2) был смонтирован в пьезоэлектрический накопитель энергии оригинальной конструкции (рис.3), что по-

зволило получить обнадеживающие результаты. Во всяком случае, мощности, генерируемой этим ПГ оказалось достаточной для питания двух светодиодов в течение короткого промежутка времени. На фотографии (рис.3, поз.5) хорошо видны светящиеся светодиоды зеленого света пьезонакопителя, являющиеся в данной модели потребителями энергии.

Усовершенствованная модель ПГ была также встроена в пьезонакопитель энергии с импульсным возбудителем вынужденных колебаний. Измерения выходных характеристик ПГ при импульсном возбуждении колебаний показали, что в этом случае может быть получено большее значение выходной мощности.

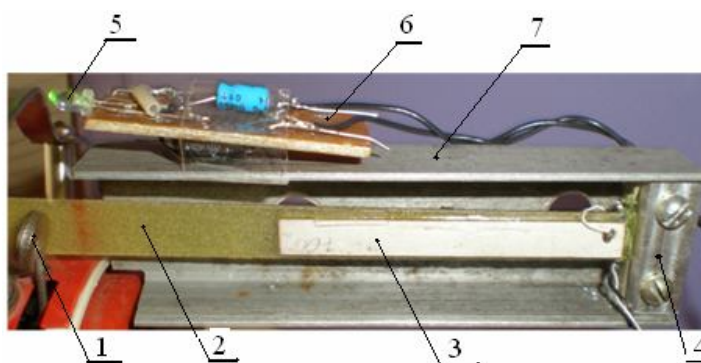


Рис.3. Пьезогенератор кантилеверного типа с механическим ударным возбуждением: 1-механический ударник; 2-основа биморфа; 3-биморфная пьезопластина генератора, выполненная из пьезокерамики ЦТС-19, размером $60 \times 10 \times 0.5$ мм, $d_{33} = 690 \times 10^{-12}$ пКл·м⁻¹ с²; 4-заделка биморфа; 5- светодиод; 6-накопитель стандартного типа; 7-корпус генератора

Кроме изображенного выше ПГ кантилеверного типа (Рис.1-3), были разработаны и исследованы несколько лабораторных образцов пьезогенераторов, использующих продольную моду возбуждающих механических колебаний (Рис.4,5). Один из таких ПГ, выполненный на основе высокочувствительного многослойного пьезоэлемента отличается высоким значением коэффициентов по заряду или напряжению. Увеличение мощности генератора может достигаться увеличением присоединенной массы (инерционного элемента), выбором ПКМ с высоким значением соответствующих пьезоконстант и увеличением числа параллельно включенных слоев пьезоэлементов. Пьезогенератор содержит 11-слойный пьезоэлемент, два металлизированных изолятора и инерционный элемент массой 200 г. Конструкция пьезогенератора приведена на фотографии (рис.4).

Для проведения исследований выходных характеристик ПГ различных типов был разработан испытательный стенд оригинальной конструкции, изображенный на рис.6. В качестве возбудителя механических колебаний был использован известный вибростенд фирмы Robotron. Текущие значения ускорений, осевых смещений (перемещений) регистрировались с помощью сенсоров и измерительного микроскопа, изображенных на фотографии. В измерительном тракте стенда была реализована стандартная электрическая схема пьезонакопителя энергии [4]. Подробно эта схема и алгоритм измерений выходных характеристик были ранее описаны в нашей работе [6]. Структура стенда и компоненты его измерительного тракта понятны на фотографии (см. рис.5).

В соответствии с программой исследований на стенде были проведены измерения выходного напряжения и соответствующие им значения сопротивления нагрузки экспериментального образца ПГ, изображенного на рис.4. Результаты измерений были обработаны и на их основе построены графики зависимостей выходного напряжения от электрического сопротивления нагрузки (рис.6), а также выходной мощности генератора (рис.7).

Анализ зависимости выходной мощности от электрической нагрузки показал, что и исследованный экспериментальный образец генератора позволяет получить энергию, соответствующую мощности 2, 25 мВт при сопротивлении нагрузки около 1 кОм. Уровень мощности описанного генератора не хуже, чем у известных [4]. Вполне возможно, что при переходе на другую электрическую схему пьезонакопителя, например такую, в которой реализуется методика синхронизированной коммутации по индуктивности (synchronous switch harvesting on inductor SSHI), можно значительно улучшить выходные характеристики многослойного ПГ.

В процессе работы нами также был разработан экспериментальный образец ПГс одним пьезоэлементом того же типа, что и на рис.5, но в отличие от него в его пьезопреобразователе пьезопластина была выполнена из ПКМ состава ПКР-7М, имеющего пьезомодуль d_{33} превышающий вдвое значение пьезомодуля у ПКМ ЦТС -19 [6].

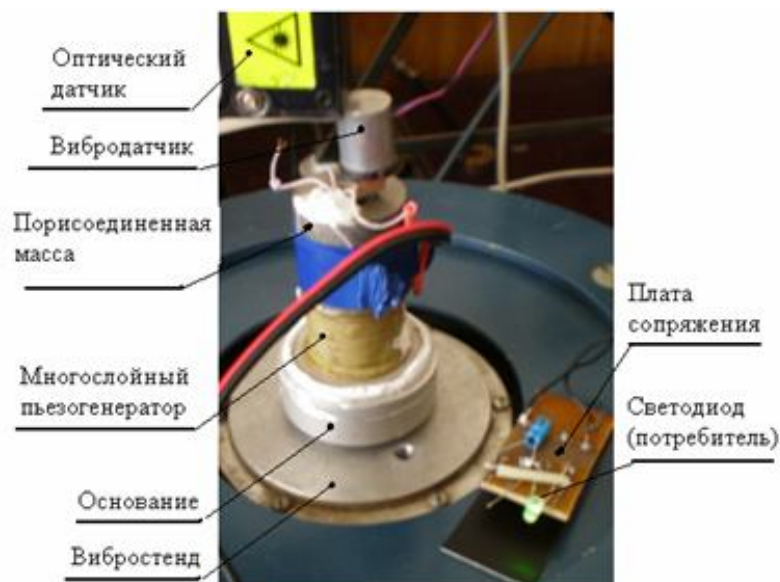


Рис.4. Пьезогенератор, работающий на продольных колебаниях (многослойный, 11 пьезоэлементов из ЦТС-19), выходная мощность 2.25 мВт.

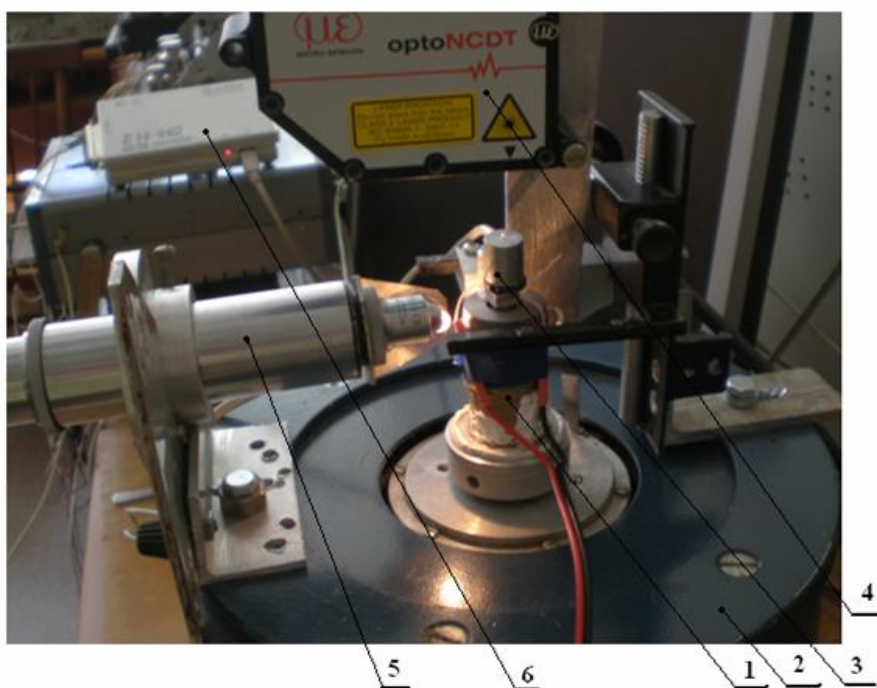


Рис.5. Фотография испытательного стенда: 1- многослойный чувствительный пьезоэлемент генератора продольных колебаний; 2-вибростенд типа Robotron 11077; 3-датчик ускорения ADXL-103; 4-оптический датчик перемещений optoNCDT 2200; 5-оптический микроскоп для измерения перемещения; 6- выносной модуль АЦП.

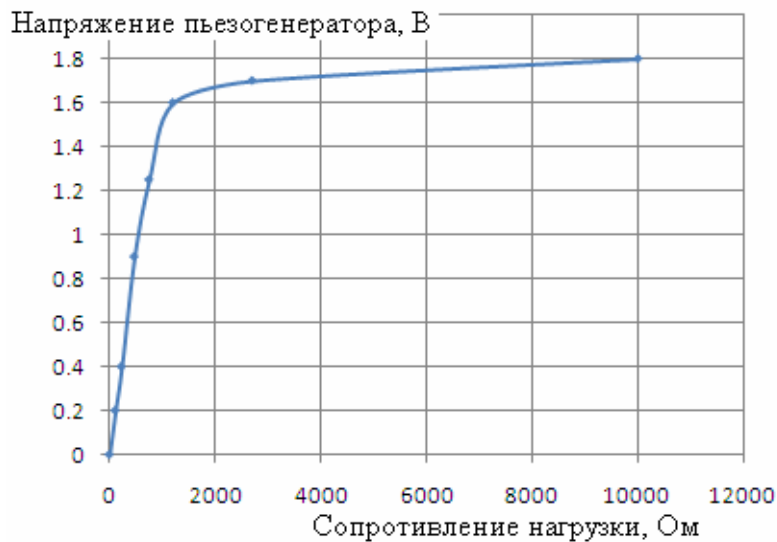


Рис.6. Зависимость выходного напряжения многослойного пьезогенератора продольных колебаний от величины активной нагрузки



Рис.7. Зависимость выходной мощности многослойного пьезогенератора от величины нагрузки

Анализ результатов измерений показал, что модель ПГ с одним пьезоэлементом позволяет получить выходную мощность, равную только 5,7 мкВт, что меньше мощности, полученной у предыдущей модели на три порядка. Это означает, что материал чувствительного элемента ПГ влияет на выходную мощность в незначительной степени. Существенно большую роль для получения большей выходной мощности ПГ имеет количество пьезоэлементов

многослойного преобразователя, а также электрическая схема накопления энергии, что и показали как сравнительные испытания созданных моделей, так и приведенные выше результаты, изложенные в [4].

Краткий анализ результатов исследований пьезогенераторных накопителей энергии из окружающей среды отнюдь не претендует на полное освещение этой проблематики, а всего лишь освещает характеристики нескольких разработанных нами, оригинальных моделей пьезогенераторов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № №10-08-00093-а, 10-08-13300 РТ_оми, 12-08-01137-а).

Библиографический список

1. Sodano H., Park G., and Inman D.J. A review of Power Harvesting from vibration using piezoelectric materials // *Shock and Vibrations Digest*, 2004, v.36, pp.197-205.

2. Anton S.R. and Sodano H. A review of Power Harvesting using piezoelectric materials // *Smart Mater. and Struct.* 2007, v.16. K 1-K21.

3. Priya S. Advances in Power Harvesting using low profile piezoelectric transducers // *J. of Electroceramics*. 2007, v.19, pp.167-184.

4. Cook-Cherault K. A., Thamb N. , and Sastry A.M. Powering MEMS portable devices – a review of non – regenerative and regenerative power supply systems with emphasis on Piezoelectric energy harvesting systems // *Smart Mater. and Struct.* 2008, v.17. 043001.

5. В.А.Акопьян, Ю.Н.Захаров, И.А.Паринов и др. Эффективность пьезоэлектрических генераторов кантилеверного типа. Теоретические оценки и экспериментальные результаты//*Нано – и микросистемная техника*. 2012.№3.С.42-47.

6. В.А.Акопьян, Ю.Н.Захаров, С.Ю.Матвеев и др. Анализ стабильности электрофизических характеристик пьезокерамик различных составов, используемых для пьезоэлектрических генераторов повышенной мощности//*Нано – и микросистемная техника*. 2012.№1.С.37-41.

ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ВЛИЯНИЯ

Бирюков А.А., Шлеенков М.А.

Самарский Государственный Университет, Самара

АННОТАЦИЯ

В рамках формализма функционального интегрирования и метода функционала влияния получено выражение для вероятности перехода квантовой системы под действием электромагнитного поля. Найден явный вид функционала влияния квантованного электромагнитного поля. Показано, что предложенное выражение не противоречит теории возмущений в описании данных переходов. Рассчитаны вероятности квантовых переходов двухатомной молекулы под действием электромагнитного поля.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время научный и практический интерес представляют теоретические и экспериментальные исследования процессов возбуждения квантовых систем вплоть до их разрушения (диссоциации) под действием лазерного излучения. В работах [1,2] наблюдалось явление изотопически-селективной диссоциации многоатомных молекул (BCl_3 , SiF_4 , SF_6) при различных характеристиках CO_2 -лазера. В работах [3,4] исследовалась инфракрасная многофотонная диссоциация молекул трихлорсилана (SiHCl_3) и метилтрифторсилана (SiF_3CH_3). Использование лазерного излучения для разделения изотопов обсуждалось в работе [5]. Эта идея была реализована в работах [6,7]. Особенности диссоциации молекул UF_6 в поле лазера и применение этого явления для разделения изотопов урана обсуждаются в работе [8]. В этих задачах принципиальным является использование мощного лазерного поля для воздействия на

исследуемую многоуровневую квантовую систему, поэтому описание данных явлений в рамках теории возмущений, в частности в низших ее порядках, является некорректным. В связи с этим возникает задача – поиск непertурбативных подходов для описания динамики многоуровневых квантовых, взаимодействующих с интенсивным электромагнитным полем.

В данной работе предлагается непertурбативный подход к квантовому описанию эволюции квантовой системы, взаимодействующей с электромагнитным излучением. Поведение квантовой системы определяется статистической матрицей плотности, явный вид которой определяется в формализме функционального интегрирования, используя метод функционала влияния.

2. ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ «ВЕЩЕСТВО+ИЗЛУЧЕНИЕ» В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Рассмотрим многоуровневую квантовую систему, взаимодействующую с электромагнитным полем. Полный гамильтониан системы имеет вид [13]:

$$\hat{H}_{full} = \hat{H}_{syst} + \hat{H}_{field} + \hat{H}_{int},$$

где \hat{H}_{syst} - оператор Гамильтона квантовой наносистемы (атомов, молекул);

$$\hat{H}_{field} = \hbar\Omega_k(\hat{a}_k^+ \hat{a}_k + 1/2)$$

- гамильтониан электромагнитного поля, \hat{a}_k^+ и \hat{a}_k - операторы рождения и уничтожения, моды k электромагнитного поля;

$$\hat{H}_{int} = \hbar g_k \hat{x}(\hat{a}_k^+ + \hat{a}_k)$$

- гамильтониан взаимодействия исследуемой квантовой подсистемы и электромагнитного поля в дипольном приближении, где электромагнитное поле поляризовано вдоль оси x , \hat{x} - оператор координаты частицы квантовой системы, константа взаимодействия g_k :

$$g_k = \frac{q}{\hbar} \sqrt{\frac{\hbar \Omega_k}{2 \varepsilon_0 V}},$$

где q – заряд частицы квантовой системы, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, V - объем квантования электромагнитного поля.

Будем описывать динамику системы «вещество+излучение» с помощью статистического оператора $\hat{\rho}_{full}(t)$, эволюция которого во времени определяется уравнением:

$$\hat{\rho}_{full}(t) = \hat{U}(t) \hat{\rho}_{full}(0) \hat{U}^\dagger(t), \quad (1)$$

где $\hat{\rho}_{full}(0)$ - статистический оператор системы «вещество+излучение» в начальный момент времени, а оператор эволюции $\hat{U}(t)$ имеет вид:

$$\hat{U}(t) = \hat{T} \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \hat{H}_{full}(\tau) d\tau\right]. \quad (2)$$

Уравнение для статистической матрицы плотности представим в формализме функционального интегрирования. Ядро оператора эволюции (2) в представлении функционального интегрирования принимает вид [9]:

$$\begin{aligned} U(x_f, \alpha_f, t | x_{in}, \alpha_{in}) = & \int \Delta(\alpha(t')) \Delta(\alpha^*(t')) Dp(t') Dx(t') \times \\ & \times \exp\left[\frac{1}{2}(\alpha^*(t)\alpha(t) + \alpha^*(0)\alpha(0))\right] \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \left\{ p(t') \dot{x}(t') - \frac{\hbar}{2i} (\alpha^*(t') \dot{\alpha}(t') - \dot{\alpha}^*(t') \alpha(t')) - \right. \right. \\ & \left. \left. - H_{syst}(p(t'), x(t')) - H_{field}(\alpha^*(t'), \alpha(t')) - H_{int}(x(t'), \alpha^*(t'), \alpha(t')) \right\} dt'\right]. \quad (3) \end{aligned}$$

Используя (3), уравнение для матрицы плотности системы «поле+излучение» представляется в виде:

$$\begin{aligned} \rho_{full}(x_f, \alpha_f, x'_f, \alpha'_f; t) = & \int \Delta(\alpha(t')) \Delta(\alpha^*(t')) Dp(t') Dx(t') \frac{d\alpha_{in} d\alpha_{in}^*}{\pi} dx_{in} \times \\ & \times \Delta(\alpha'(t')) \Delta(\alpha'^*(t')) Dp'(t') Dx'(t') \frac{d\alpha'_{in} d\alpha'^*_{in}}{\pi} dx'_{in} \times \\ & \times \exp\left[\frac{1}{2}(\alpha^*(t)\alpha(t) + \alpha^*(0)\alpha(0))\right] \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \left\{ p(t') \dot{x}(t') - \frac{\hbar}{2i} (\alpha^*(t') \dot{\alpha}(t') - \dot{\alpha}^*(t') \alpha(t')) - \right. \right. \\ & \left. \left. - H_{syst}(p(t'), x(t')) - H_{field}(\alpha^*(t'), \alpha(t')) - H_{int}(x(t'), \alpha^*(t'), \alpha(t')) \right\} dt'\right] \rho(x_{in}, \alpha_{in}, x'_{in}, \alpha'_{in}, t=0) \times \end{aligned}$$

$$\times \exp\left[\frac{1}{2}(\alpha'^*(t)\alpha'(t) + \alpha'^*(0)\alpha'(0))\right] \exp\left[-\frac{i}{\hbar} \int_0^t \{p'(t')\dot{x}'(t') + \frac{\hbar}{2i}(\alpha'^*(t')\dot{\alpha}'(t') - \dot{\alpha}'^*(t')\alpha'(t')) - H_{syst}(p'(t'), x'(t')) - H_{field}(\alpha'^*(t'), \alpha'(t')) - H_{int}(x'(t'), \alpha'^*(t'), \alpha'(t'))\} dt'\right]. \quad (4)$$

Выражение, описывающее эволюции системы «вещество+излучение», представляет собой функциональный интеграл, вычисление которого требует специальных математических средств.

3. ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ВЛИЯНИЯ

В ряде задач нас интересует лишь динамика исследуемой квантовой системы (атома, молекулы или другой наносистемы) в электромагнитном поле. Рассмотрим модель, когда электромагнитное поле имеет столь большую интенсивность, что обратным влиянием исследуемой квантовой системы на него можно пренебречь, то есть изменение состояния электромагнитного поля в процессе эволюции системы «вещество+излучение» можно не учитывать. В этом случае можно провести редукцию статистической матрицы плотности полной системы (4) к статистической матрице плотности квантовой системы:

$$\rho_{syst}(x_f, x'_f; t) = \int_{\alpha_f = \alpha'_f} \rho_{full}(x_f, \alpha_f, x'_f, \alpha'_f; t) \frac{d\alpha_f d\alpha_f^*}{\pi}. \quad (5)$$

Рассмотрим модель, в которой в начальный момент времени подсистемы «вещество» и «излучение» не взаимодействовали между собой, то есть возможна факторизация начальной матрицы плотности:

$$\rho_{full}(x_{in}, \alpha_{in}, x'_{in}, \alpha'_{in}, t = 0) = \rho_{syst}(x_{in}, x'_{in}, t = 0) \rho_{field}(\alpha_{in}, \alpha'_{in}, t = 0). \quad (6)$$

Подставляя (4) в (5), а также используя условие (6), представим статистическую матрицу плотности исследуемой квантовой подсистемы $\rho_{syst}(x_f, x'_f; t)$ в некий момент t в виде:

$$\rho_{syst}(x_f, x'_f; t) = \int \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \{p(t')\dot{x}(t') - H_{syst}(p(t'), x(t')) - p'(t')\dot{x}'(t') + H_{syst}(p'(t'), x'(t'))\} dt'\right] \times \\ \times F[x(t'), x'(t')] \rho_{syst}(x_{in}, x'_{in}; t=0) Dp(t') Dx(t') Dp'(t') Dx'(t') dx_{in} dx'_{in}, \quad (6)$$

где

$$F[x, x'] = \int_{\alpha_f = \alpha'_f} \int \Delta(\alpha(t')) \Delta(\alpha^*(t')) \Delta(\alpha'(t')) \Delta(\alpha'^*(t')) \frac{d\alpha_{in} d\alpha_{in}^*}{\pi} \frac{d\alpha'_{in} d\alpha'_{in}^*}{\pi} \frac{d\alpha_f d\alpha_f^*}{\pi} \times \\ \times \rho_{field}(\alpha_{in}, \alpha'_{in}; t=0) \exp\left[\frac{1}{2}(\alpha^*(t)\alpha(t) + \alpha^*(0)\alpha(0) + \alpha'^*(t)\alpha'(t) + \alpha'^*(0)\alpha'(0))\right] \times \\ \times \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \left\{ \frac{\hbar}{2i} (\alpha^*(t')\dot{\alpha}(t') - \dot{\alpha}^*(t')\alpha(t') - \alpha'^*(t')\dot{\alpha}'(t') + \dot{\alpha}'^*(t')\alpha'(t')) - H_{field}(\alpha^*(t'), \alpha(t')) - \right. \right. \\ \left. \left. - H_{int}(x(t'), \alpha^*(t'), \alpha(t')) + H_{field}(\alpha'^*(t'), \alpha'(t')) + H_{int}(x'(t'), \alpha'^*(t'), \alpha'(t')) \right\} dt'\right] \quad (7)$$

- функционал влияния электромагнитного поля на исследуемую квантовую систему.

Выражение (7) с учетом (8) описывает эволюцию статистической матрицы плотности исследуемой квантовой системы в координатном представлении.

В ряде задач удобно описывать динамику квантовой системы в энергетическом представлении. Статистическая матрица плотности квантовой системы в энергетическом представлении в момент времени t определяется формулой

$$\rho_{syst}(m, m', t) = \int \phi_m^*(x_f) \rho_{syst}(x_f, x'_f, t) \phi_{m'}(x'_f) dx_f dx'_f. \quad (8)$$

В начальный момент времени $t=0$ статистическая матрица представляется выражением:

$$\rho_{syst}(n, n', t=0) = \int \phi_n^*(x_{in}) \rho_{syst}(x_{in}, x'_{in}, t=0) \phi_{n'}(x'_{in}) dx_{in} dx'_{in}, \quad (9)$$

где $\phi_{m'}(x'_f)$ - волновая функция квантовых состояний системы.

Учитывая (7), (9) и (10), получаем уравнение эволюции для статистической матрицы плотности в энергетическом представлении:

$$\rho_{syst}(m, m', t) = \int \Delta(p(t')) \Delta(x(t')) \Delta(p'(t')) \Delta(x'(t')) dx_f dx'_f \phi_m(x_f) \phi_{m'}(x'_f) F[x(t'), x'(t')] \times \\ \times \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \{p(t')\dot{x}(t') - H_{syst}(p(t'), x(t')) - p'(t')\dot{x}'(t') + H_{syst}(p'(t'), x'(t'))\} dt'\right] \times \\ \times \sum_{n, n'} \phi_n(x_{in}) \rho(n, n', t=0) \phi_{n'}^*(x'_{in}) dx_{in} dx'_{in}. \quad (11)$$

Диагональные элементы матрицы плотности (11) определяют вероятности квантовых переходов системы $P(m, t | n, 0)$ из чистых состояний $\phi_n(x_{in})$ в начальный момент времени $t=0$ в состояния $\phi_m(x_f)$ в момент времени t :

$$P(m, t | n, 0) = \int \Delta(p(t')) \Delta(x(t')) \Delta(p'(t')) \Delta(x'(t')) \phi_m(x_f) \phi_m(x'_f) F[x(t'), x'(t')] \times \\ \times \exp\left[\frac{i}{\hbar} \int_0^t \{p(t') \dot{x}(t') - H_{sys}(p(t'), x(t')) - p'(t') \dot{x}'(t') + H_{sys}(p'(t'), x'(t'))\} dt'\right] \times \\ \phi_n^*(x_{in}) \phi_n(x'_{in}) dx_f dx'_f dx_{in} dx'_{in}. \quad (12)$$

Уравнения (11), (12) описывают динамику квантовой системы под действием электромагнитного поля. Примечательно, что они получены вне рамок пертурбативных методов. Для вычисления статистической матрицы в определенный момент времени t и вероятностей переходов необходимо знать волновые функции $\phi_n(x)$ квантовых состояний системы и явный вид функционала влияния электромагнитного поля на исследуемую квантовую систему.

Заметим, что формулы (7), (11) указывают, что процесс эволюции статистической матрицы плотности системы является процессом с памятью, то есть его принципиально нельзя представить марковским процессом.

4. ЯВНЫЙ ВИД ФУНКЦИОНАЛА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Функционал влияния в формализме функционального интегрирования впервые ввел Фейнман и вычислил его явный вид для гармонического осциллятора в координатном и энергетическом представлении [10].

Авторами был проведен расчет функционала влияния электромагнитного поля частоты Ω_k , представленным выражением (8), при условии, что в начальный момент времени электромагнитное поле описывалось смешанным когерентным состоянием со средним числом фотонов $\langle n \rangle$:

$$\rho_{field}(\alpha_{in}, \alpha'_{in}, t=0) = e^{-|\alpha_{in}|^2 - |\alpha'_{in}|^2 + \langle n \rangle \alpha_{in}^* \alpha'_{in}}.$$

Вычисления привели к квадратичному функционалу влияния

$$F_{field, \Omega_k}[x, x'] = e^{-\int_0^T \int_0^t x(t)x(t')\gamma_{field, \Omega_k}(t, t')dt dt' - \int_0^T \int_0^t x'(t)x'(t')\gamma_{field, \Omega_k}^*(t, t')dt dt' + \int_0^T \int_0^t x(t)x'(t')\gamma_{field, \Omega_k}^*(t, t')dt dt'} \quad (10)$$

где функция $\gamma_{field, \Omega_k}(t, t') = \gamma_{vac, \Omega_k}(t, t') + \gamma_{rad, \Omega_k}(t, t')$:

$$\gamma_{vac, \Omega_k}(t, t') = \frac{q^2 \Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} e^{-i\Omega_k(t-t')},$$

$$\gamma_{rad, \Omega_k}(t, t') = \frac{q^2 \langle n \rangle \Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} (e^{-i\Omega_k(t-t')} + e^{+i\Omega_k(t-t')}).$$

Как видно из полученного выражения функционал влияния электромагнитного поля представляется произведением функционала влияния вакуумных мод (с коэффициентом $\gamma_{vac}(t, t')$) и функционала влияния поля излучения (с коэффициентом $\gamma_{rad}(t, t')$).

Функционал влияния многомодового электромагнитного поля имеет вид [10]:

$$F_{field}[x, x'] = \prod_k F_{field, \Omega_k}[x, x'] = e^{-\int_0^T \int_0^t x(t)x(t')\gamma_{field}(t, t')dt dt' - \int_0^T \int_0^t x'(t)x'(t')\gamma_{field}^*(t, t')dt dt' + \int_0^T \int_0^t x(t)x'(t')\gamma_{field}^*(t, t')dt dt'} \quad (11)$$

где функции $\gamma_{field}(t, t') = \gamma_{vac}(t, t') + \gamma_{rad}(t, t')$:

$$\gamma_{vac}(t, t') = \sum_k \frac{q^2 \Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} e^{-i\Omega_k(t-t')}, \quad \gamma_{rad}(t, t') = \sum_k \frac{q^2 \langle n \rangle \Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} (e^{-i\Omega_k(t-t')} + e^{+i\Omega_k(t-t')}). \quad (12)$$

5. ПРИЛОЖЕНИЯ К ОПИСАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Явный вид функционала влияния электромагнитного поля на исследуемую квантовую систему позволяет описать ряд важных электромагнитных про-

цессов, таких как спонтанное излучение, вынужденное излучение и поглощение, вероятности квантовых переходов и диссоциации квантовых систем вне рамок теории возмущений. Для этих целей требуется развитие компьютерных технологий вычисления функциональных интегралов на решетках применительно к выражениям (10), (11).

На основании формулы (12), найдем $P_{syst}(n, t) = P_{syst}(n, t | n, 0)$ - вероятность пребывания системы в квантовом состоянии $\phi_n(x)$ в зависимости от времени при условии, что в начальный момент времени квантовая система находилась в этом же состоянии $\phi_n(x)$ с вероятностью $P_{syst}(n, t = 0) = 1$. Функционал влияния вакуума на систему имеет вид (14) где $\gamma_{vac}(t, t')$ определяется формулой (15), а $\gamma_{rad}(t, t') = 0$. Проводя функциональное интегрирование, выражение для вероятности принимает вид

$$P_{syst}(n, t) = \exp\left[-\int_0^t \int_0^{t'} \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} |d_{nm}|^2 e^{i(\omega_{nm} - \Omega_k)(t' - t'')} + \sum_{k'=0}^{\infty} \frac{\Omega_{k'}}{2\varepsilon_0 V \hbar} |d_{nm}|^2 e^{-i(\omega_{nm} - \Omega_{k'})(t' - t'')}\right) dt' dt''\right], \quad (13)$$

где

$$d_{mn} = q \int \phi_m^*(x) x \phi_n(x) dx, \quad \omega_{nm} = \frac{E_n - E_m}{\hbar}$$

представляют дипольные моменты и частоты переходов, а $m = n-1$.

Используя приближение Вайскопфа-Вигнера [11] (при $w_{nm} = W > 0$), получим:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Omega_k}{2\varepsilon_0 V \hbar} |d_{nm}|^2 e^{i(\omega_{nm} - \Omega_k)(t' - t'')} = \frac{\Gamma}{2} \delta(t' - t''), \quad (14)$$

где

$$\Gamma = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{4\omega_{nm}^3 |d_{mn}|^2}{3\hbar c^3}. \quad (15)$$

Подставляя (17) в (16), получаем

$$P_{syst}(n, t) = \exp[-\Gamma t], \quad (16)$$

то есть вероятность экспоненциально затухает, что совпадает с известными результатами, полученными другими авторами [11].

Формула (12) для вероятности квантовых переходов можно записать в виде ряда теории возмущений, представляя экспоненту функционала влияния, как ряд

$$F[x, x'] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[-\int_0^T \int_0^t x(t)x'(t')\gamma(t, t') dt dt' - \int_0^T \int_0^t x'(t)x(t)\gamma^*(t, t') dt dt' + \int_0^T \int_0^T x(t)x'(t')\gamma^*(t, t') dt dt' \right]^n.$$

В этом случае формула (12) принимает вид:

$$P(m, t | n, 0) = P^0(m, t | n, 0) + P^I(m, t | n, 0) + P^{II}(m, t | n, 0) + P^{III}(m, t | n, 0) + \dots, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} P^N(m, t | n, 0) = & \int \phi_m^*(x_f) \phi_m(x'_f) \phi_n(x_{in}) \phi_n^*(x'_{in}) \times \\ & \times \exp\left\{ \int_0^t \left(\frac{i}{\hbar} (p(t')\dot{x}(t') - H_{\text{sys}}(p(t'), x(t')) - p'(t')\dot{x}'(t') + H_{\text{sys}}(p'(t'), x'(t'))) dt' \right) \right\} \times \\ & \times \frac{1}{N!} \left[-\int_0^t \int_0^{t'} (x(t') - x'(t')) (\gamma(t', t'') x(t'') + \gamma^*(t', t'') x'(t'')) dt' dt'' \right]^N \times \\ & \times \Delta(p(t')) \Delta(x(t')) \Delta(p'(t')) \Delta(x'(t')) dx_f dx'_f dx_{in} dx'_{in}. \end{aligned}$$

Оставляя первые два слагаемых в (20), получим вероятность перехода в первом порядке теории возмущений [12]:

$$\begin{aligned} P^0(m, t | n, 0) = & \delta_{mn} \delta_{nm}, \\ P^I(m, t | n, 0) = & -\delta_{mn} \left[\sum_p \frac{E_{0k}^2 |d_{mp}|^2}{4\hbar^2} \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\Omega - \omega_{mp}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega - \omega_{mp}}{2}\right)^2} + \frac{\sin^2\left(\frac{\Omega + \omega_{mp}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega + \omega_{mp}}{2}\right)^2} \right) \right] + \\ & + \frac{E_{0k}^2 |d_{mn}|^2}{4\hbar^2} \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\Omega - \omega_{mn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega - \omega_{mn}}{2}\right)^2} + \frac{\sin^2\left(\frac{\Omega + \omega_{mn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega + \omega_{mn}}{2}\right)^2} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Анализ полного ряда теории возмущений (20) показывает, что вероятность квантовых переходов, когда частота поля Ω совпадает с резонансной частотой перехода ω_{mn} , при $m \neq n$ имеет вид:

$$P(m, t | n, 0) = \sin^2\left(\frac{\Omega^{Rabi}}{2} t\right) + p(\Omega_R, \omega_{mn}, t). \quad (19)$$

Вероятность наблюдать систему в любой момент времени $t > 0$ в начальном состоянии $\varphi_n(x)$ получаем в виде выражения

$$\begin{aligned}
P(n, t | n, 0) = & \cos^2\left(\frac{\Omega_r^{Rabi}}{2} T\right) - \frac{1}{2} \sin\left(2\frac{\Omega_r^{Rabi}}{2} T\right) \sin\left(2 \sum_{p, p \neq r} \frac{\Omega_p^{Rabi}}{2} \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\Omega + \omega_{pn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega + \omega_{pn}}{2}\right)^2} + \frac{\sin^2\left(\frac{\Omega - \omega_{pn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega - \omega_{pn}}{2}\right)^2} \right]\right) - \\
& - \cos\left(2\frac{\Omega_r^{Rabi}}{2} T\right) \sin^2\left(\sum_{p, p \neq r} \frac{\Omega_p^{Rabi}}{2} \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\Omega + \omega_{pn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega + \omega_{pn}}{2}\right)^2} + \frac{\sin^2\left(\frac{\Omega - \omega_{pn}}{2} T\right)}{\left(\frac{\Omega - \omega_{pn}}{2}\right)^2} \right]\right),
\end{aligned} \tag{20}$$

где частота Раби:

$$\Omega_k^{Rabi} = \frac{d_{kn} E_0}{\hbar}.$$

Первое слагаемое в формуле (23) описывает известные осцилляции Раби [12], последующие представляются хаотично осциллирующей функциями, которые возникают как следствие многоуровневости системы и представляют флуктуации квантовых переходов.

Для оценки вероятности диссоциации молекулы рассмотрим модель двухатомной молекулы как многоуровневую квантовую систему в потенциале Морзе [13]:

$$U(r) = A(e^{-2B(r-2)} + 2e^{-B(r-2)}),$$

где константы А и В – феноменологические константы, а r – расстояние между атомами.

Волновые функции данной квантовой системы имеют вид:

$$\phi_n(x) = N e^{-\frac{x}{2}} x^{\frac{\sqrt{2mA}}{Bh} - n - \frac{1}{2}} {}_1F_1\left(-n, \frac{\sqrt{2mA}}{Bh} - n - \frac{1}{2}, x\right),$$

где N – нормировочный коэффициент, ${}_1F_1$ - вырожденная гипергеометрическая функция, а параметр x определяется выражением:

$$x = \frac{2\sqrt{2mA}}{Bh} e^{-B(r-2)}.$$

Для конкретных вычислений рассмотрим квантовую систему с пятью энергетическими уровнями. Верхний уровень в данной модели может рассмат-

риваться как диссоциационный. Используя явный вид волновых функций квантовой системы, найдем значения дипольных моментов перехода между состояниями системы:

$$d_{mn} = q \int_0^{\infty} \phi_m(r) r \phi_n(r) dr.$$

Для проведения конкретных вычислений предположим, что квантовая система в начальный момент времени находилась в основном состоянии, а электромагнитное поле является резонансным по отношению к нижнему переходу с основного состояния на первый возбужденный уровень, то есть $\omega = \omega_{10}$. Вероятность найти систему в начальном состоянии в момент времени T по формуле (23) представлена графиком на рис.1.

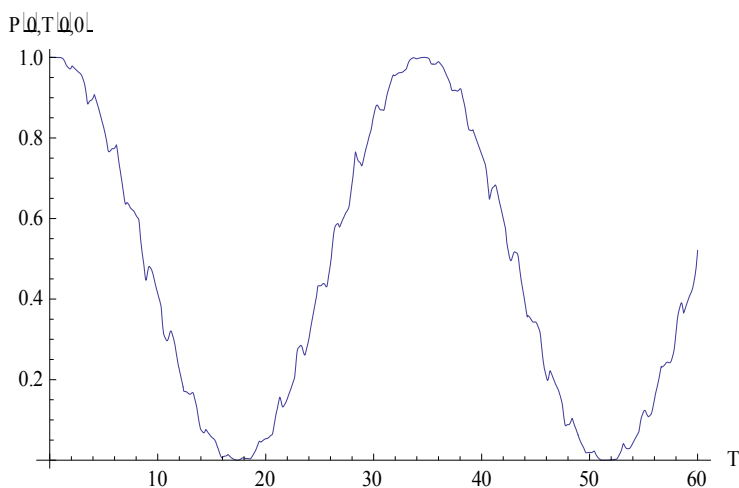


Рис. 1

На рис.1 видны осцилляции Раби, которые описывают резонансные переходы, а также их флуктуации, возникающие как следствие многоуровневости исследуемой квантовой системы.

Рассмотрим вероятность диссоциации молекулы исследуемой модели. В данной модели диссоциация происходит на верхнем энергетическом уровне, так как энергия связи на нем является малой величиной и система становится нестабильной. Найдем вероятность того, что исследуемая квантовая система

перейдет из основного состояния в начальный момент времени ($t=0$) в диссоциационное (нестабильное) состояние в момент времени T под действием нерезонансного для данного перехода электромагнитного поля. Полученная зависимость вероятности диссоциации от времени представлена на рис.2.

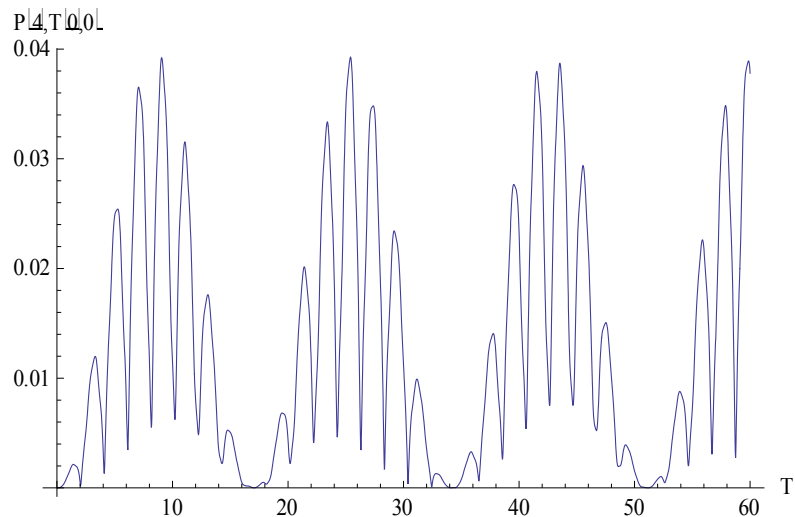


Рис. 2

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В формализме функционального интегрирования, получены уравнения, описывающие эволюцию статистической матрицы плотности, а также вероятности переходов исследуемой квантовой системы, взаимодействующей с электромагнитным полем. Найден явный вид функционала влияния электромагнитного поля на квантовую систему.

В случае, когда электромагнитное поле представлялось вакуумным состоянием, получены вероятности спонтанных переходов квантовой системы, которые согласуются с результатами исследований других авторов в этой области.

Доказан принцип эквивалентности метода функционала влияния и метода теории возмущений.

Рассмотрена модель двухатомной молекулы, атомы которой совершают колебательные движения в потенциале Морзе. Полученные вероятности квантовых переходов данной модели при взаимодействии с резонансным (для нижнего перехода) электромагнитным полем представлены рисунками 1 и 2. Анализ полученных данных указывает на флуктуацию классических осцилляций Раби (как следствие многоуровневости квантовой системы), а также на возможность диссоциации молекулы нерезонансным для прямого диссоциационного перехода электромагнитным полем.

Данные результаты представляют определенный интерес, как для теоретического, так и для практического описания поведения систем в лазерных полях.

Работа выполнена в рамках задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 2.2459.2012 и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Библиографический список

1. Isenor N.R., Merchant V., Hallsworth R.S., Richardson M. C. CO₂ Laser-Induced Dissociation of SiF₄ Molecules into Electronically Excited Fragments // Can. J. Phys., 1973, 51, 1281.
2. Амбарцумян Р.В., Горохов Ю.А., Летохов В.С., Макаров Г.Н., Пурецкий А.А. Исследование механизма изотопически-селективной диссоциации молекул SF₆ излучением CO₂ лазера // ЖЭТФ, 1976, 71, 440.
3. Апатин В.М., Лаптев В.Б., Рябов Е.А., ИК многофотонная диссоциация трихлорсилана под действием импульсного излучения CO₂- и NH₃-лазеров // Квант. электроника, 2003, 33 (10), 894–896.

4. Кошляков П.В., Чесноков Е.Н., Горелик С.Р., Киселев В.Г., Петров А.К. Инфракрасная многофотонная диссоциация метилтрифторсилана // Химическая физика, 2006, 25, 5, 12-22.
5. Letokhov V.S. Use of Lasers to Control Selective Chemical Reactions // Science, 1973, 180, 451; Природа, 1974, 8, 13.
6. Lyman J. L., Jensen R. J., Rink J., Robinson C.P., Rockwood S. D. Isotopic enrichment of SF₆ in S₃₄ by multiple absorption of CO₂ laser radiation // Appl. Phys. Lett., 1975, 27, 87.
7. Карлов Н В, Крынецкий Б Б, Мишин В А, Прохоров А М Селективная фотоионизация атомов и ее применение для разделения изотопов и спектроскопии // УФН, 1979 127 593–620.
8. Баранов В.Ю., Дядькин А.П., Колесников Ю.А., Котов А.А., Новиков В.П., Пигульский С.В., Разумов А.С., Стародубцев А.И., Особенности диссоциации молекул UF_6 в поле излучения импульсно-периодического CF_4 -лазера // Квантовая Электроника, 1997, 24, 7, 613-616.
9. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей, Наука, М., 1978, 272 с.
10. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям, Мир, М., 1968, 382 с.
11. Скали М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика, Физматлит, М., 2003, 512 с.
12. Бирюков А.А., Шлеенков М.А., Квантовые переходы многоуровневой системы, взаимодействующей с электромагнитным полем, в представлении функционального интегрирования // Сб. т. VII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара, 2010.
13. Morse P. M., Diatomic molecules according to the wave mechanics. II. Vibrational levels // Phys. Rev. 1929, 34, 57-64.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ТЕОРИИ ВРЕМЕНИ Н.А.КОЗЫРЕВА

Бовин А.А.

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение
средняя общеобразовательная школа № 63, г.Краснодар

Время является важнейшим и самым загадочным явлением природы. Осмыслению сущности времени посвящено множество работ, начиная с философов античности до учёных-физиков современности. Однако до сих пор ясного понимания сущности времени не существует.

Одним из активных исследователей проблемы времени является доктор физико-математических наук астроном-астрофизик Николай Александрович Козырев. Он является автором «теории времени», согласно которой время, помимо пассивного, геометрического свойства, измеряемого часами, обладает еще и активными, физическими свойствами, благодаря которым время может взаимодействовать с материальными системами и препятствовать переходу их в равновесное состояние [1]. Свою теорию времени Н.А. Козырев подтверждает разнообразными экспериментами [2].

Кроме постоянного хода у времени существует ещё и переменное свойство, которое можно назвать *плотностью* или интенсивностью времени. При малой плотности время слабо воздействует на материальные системы. Н.А. Козырев утверждает, что препятствуя переходу материальных систем в равновесное состояние время излучается, и плотность его возрастает.

При изменении плотности времени должна изменяться скорость света. Наиболее чувствительным методом для измерения изменения скорости света является интерференционный метод. Реализовать этот метод можно с помощью интерферометра Майкельсона.

Поэтому целью данной работы является экспериментальная проверка теории времени Н.А. Козырева с помощью интерферометра Майкельсона.

1. Основные положения теории времени Н.А. Козырева.

Будучи астрофизиком Н.А. Козырев занимался изучением внутреннего строения звёзд и источниками энергии их излучения. По его расчётам термоядерные реакции, происходящие внутри звёзд, не могут обеспечить ту энергию излучения и длительность этого излучения, которая наблюдается в реальности. Далее Н.А. Козырев рассуждает так: „Звезды во Вселенной существуют всюду. Поэтому причина их жизнеспособности должна иметь такую общность, которую имеют только пространство и время. Но в свойствах пространства нельзя усмотреть этой возможности потому, что пространство - это пассивная арена, где разыгрываются события Мира. Остается заключить, что время помимо пассивного, геометрического свойства, измеряемого часами, обладает еще и активными, физическими свойствами, благодаря которым время может взаимодействовать с материальными системами и препятствовать переходу их в равновесное состояние.”[1].

С философской точки зрения Козырев базируется на трёх постулатах [2]:

I. Время обладает особым свойством, создающим различие причин от следствий, которое может быть названо направленностью или ходом. Этим свойством определяется отличие прошедшего от будущего.

Исходя из тех обстоятельств, что: 1) причина всегда находится вне того тела, в котором осуществляется следствие, и 2) следствие наступает после причины, можно сформулировать еще две следующие аксиомы:

II. Причины и следствия всегда разделяются пространством. Поэтому между ними существует сколь угодно малое, но не равное нулю, пространственное различие δx .

III. Причины и следствия различаются временем. Поэтому между их проявлением существует сколь угодно малое, но не равное нулю, временное различие δt определенного знака.

Любая физическая система, и в частности вещество, с течением времени теряет свою первоначальную организованность, разрушается и стареет. В соот-

ветствии со вторым началом термодинамики происходит переход в более вероятное состояние. Это обстоятельство обусловлено свойствами причинности, согласно которым причина порождает многочисленные следствия. Рост числа разнообразных следствий приводит к реализации все большего числа возможных состояний системы. Происходит потеря организованности, внесенной в систему некоторой причиной. Течение же этого процесса должно совпадать с направленностью времени, поскольку следствия находятся в будущем по отношению к причине. Если время дополняет трехмерное пространство до четырехмерного многообразия, то течение времени настоящим моментом лишь обнаруживает события уже существующие в будущем, при сохранении всего, что отодвигается в прошлое. В таком четырехмерном мире все события должны уже существовать в соответствии со вторым началом термодинамики и выглядеть веером, расходящимся в сторону будущего. То есть положительного направления времени. Однако такая картина фатального детерминизма противоречит свободе выбора и всему опыту нашей жизни. Скорее всего, это означает, что чисто геометрическое представление о времени является недопустимо упрощенным. Пространство же может обладать не только геометрическими свойствами, то есть быть пустым, но у него могут быть и физические свойства, которые называют силовыми полями. Поэтому естественно полагать, что и ось собственного времени не всегда является пустой и что у времени могут быть и физические свойства. Благодаря этим свойствам время может воздействовать на физические системы, на вещество и становиться активным участником Мироздания. Активный контакт времени со всем, что происходит в Мире, должен приводить к взаимодействию, к возможности воздействий на свойства времени со стороны происходящих процессов.

Степень активности времени может быть названа его плотностью. Уже из самых общих соображений можно заключить, что существование плотности времени должно вносить в систему организованность, то есть вопреки обычному ходу развития, уменьшать ее энтропию. Действительно, когда весь Мир пе-

ремещается по оси времени от настоящего к будущему, само это будущее, если оно физически реально, будет идти ему навстречу и будет, стягивая многие следствия к одной причине, создавать в системе тенденцию к уменьшению энтропии. Таким образом, время, благодаря своим физическим свойствам, может вносить в Мир жизненное начало, препятствовать наступлению его тепловой смерти. Итак, изменение состояния и свойств вещества может происходить не только со временем, но и под действием времени на него. Первое обстоятельство соответствует законам, действующим в пассивном геометрическом времени, а второе - обусловлено активными, физическими его свойствами. Из-за взаимодействий с происходящими в Природе процессами должны меняться активные свойства времени, а это, в свою очередь, будет влиять на ход процессов и на свойства вещества. Таким образом, вещество может быть детектором, обнаруживающим изменения плотности времени. В пространстве плотность времени не равномерна, а зависит от места, где происходят процессы. Следует ожидать, что некоторые процессы ослабляют плотность времени и его поглощают, другие же наоборот - увеличивают его плотность и, следовательно, излучают время. Так, действие повышенной плотности времени ослабляется по закону обратных квадратов расстояния, экранируется твердым веществом при толщине порядка сантиметров, и отражается зеркалом согласно обычному закону оптики. Уменьшение же плотности времени около соответствующего процесса вызывает втягиванием туда времени из окружающего мира. Действие этого явления на детектор экранируется, но не отражается зеркалом. Специальный опыт показал, что процессы, вызывающие рост энтропии, излучают время. При этом у находящегося вблизи вещества упорядочивается его структура. Действие плотности времени уменьшает энтропию и противодействует обычному ходу событий. Под действием времени могут изменяться самые разнообразные свойства вещества. Воздействие времени принципиально отличается от воздействия силовых полей. Время во Вселенной не распространяется, а всюду появляется сразу. На ось времени вся Вселенная проектируется одной точкой. Поэтому из-

менение свойства некоторой секунды всюду появляется сразу, убывая по закону обратной пропорциональности первой степени расстояния [2].

Описания других экспериментов Н.А. Козырева можно найти в работах [3,4,5]. Проверке теории Козырева посвящены эксперименты, выполненные и другими авторами [6-9]. Приведённые в указанной литературе опыты подтверждают теорию Н.А. Козырева, что заинтересовало автора и послужило причиной для выполнения данной работы.

2. Эксперименты по проверки теории времени А.Н.Козырева.

2.1. Методика эксперимента.

В основе эксперимента, рассматриваемого в данной работе, лежат следующие факторы:

1) при протекании неравновесных процессов, согласно теории Н.А. Козырева возрастает плотность времени, которую можно трактовать как темп времени;

2) изменение плотности времени происходит локально и убывает обратно пропорционально первой степени расстояния;

3) при изменении плотности времени должны изменяться скорости протекания физических процессов, в частности, должна изменяться скорость света;

4) наиболее чувствительным прибором для измерения изменения скорости света является интерферометр, в частности, интерферометр Майкельсона.

Изменение скорости света в данном случае не противоречит теории относительности, так как оно связано не с движением источников или приёмников света, а с изменением свойств пространства-времени, а именно, плотности времени.

При достаточной длине плеч интерферометра Майкельсона в одно из плеч, рядом со световым лучом можно поместить объект, в котором в определённый момент начнёт протекать неравновесный процесс. Например, растворение в воде кристаллического вещества или испарение жидкости. При этом, со-

гласно проверяемой теории, должна измениться плотность времени и, следовательно, измениться скорость света в этом плече интерферометра. Это изменение скорости света должно привести к сдвигу наблюдаемых на выходе интерферометра интерференционных полос.

Обычно интерференционные полосы наблюдают через зрительную трубу, установленную на выходе интерферометра. В данном случае необходимо было предусмотреть одновременное наблюдение неравновесного процесса и интерференционных полос, чтобы в случае их сдвига, с помощью видеокамеры документально зафиксировать влияние неравновесного процесса на их сдвиг. Для этого на выходе интерферометра было предложено установить сферическое зеркало, отражающее интерференционные полосы в увеличенном масштабе на экран.

Оценим чувствительность данного метода к изменению скорости света. Пусть неравновесный процесс осуществляется на длине l рядом с лучом в одном из плечей интерферометра. Будем полагать, что изменение скорости света c при этом составит Δc . Время прохождения света вдоль пути, где происходит неравновесный процесс, будет равно

$$t = \frac{l}{c \pm \Delta c}, \quad (2.1)$$

где „плюс” соответствует уменьшению плотности времени, а „минус” – её увеличению. Следует отметить, что это время t рассматривается в системе отсчёта внешнего наблюдателя, в которой плотность времени не изменяется. Тогда оптическая разность хода лучей в плечах изменится на

$$\Delta l = 2t\Delta c = \frac{2l\Delta c}{c \pm \Delta c}. \quad (2.2)$$

при длине световой волны λ это приведет к относительному сдвигу интерференционных полос на

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{2l\Delta c}{\lambda(c \pm \Delta c)}, \quad (2.3)$$

где x – расстояние между двумя ближайшими интерференционными полосами.

Неравновесный процесс растворения кристаллического вещества в воде предполагалось осуществлять в кювете длиной $l = 0,24$ м, а в качестве источника света использовать гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Известно из практических наблюдений, что визуально можно заметить сдвиг интерференционных полос, если они смещаются не менее, чем на одну десятую долю от расстояния x , между ближайшими интерференционными полосами, т.е. $\Delta x/x \geq 0,1$. Из формулы (2.3) найдём примерную чувствительность интерференционного метода, равную относительной величине изменения скорости света, которую ещё можно будет зарегистрировать интерферометром:

$$\frac{c \pm \Delta c}{\Delta c} = \frac{2l}{\lambda \frac{\Delta x}{x}}; \quad \frac{c}{\Delta c} = \frac{2l}{\lambda \frac{\Delta x}{x}} \mp 1 \approx \frac{2l}{\lambda \frac{\Delta x}{x}} \Rightarrow \epsilon = \frac{\Delta c}{c} = \frac{\lambda \Delta x}{2l x}. \quad (2.4)$$

Численно в процентах получается:

$$\epsilon = \frac{\Delta c}{c} = \frac{633 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 0,24 \text{ м}} \cdot 0,1 \cdot 100\% \approx 1,3 \cdot 10^{-5}\%. \quad (2.5)$$

Это очень высокая чувствительность, так как при скорости света $c = 300\,000\,000$ м/с интерферометр способен зарегистрировать отклонения от этой скорости на 40 м/с.

Сравним относительное изменение параметров свойств вещества в опытах Н.А. Козырева при изменения плотности времени. В работе [3] Козырев пишет об „измерении проводимости электрического тока резистора, введенного в мост Уинстона и находящегося вблизи некоторого выбранного процесса. У резистора, находящегося рядом с лабораторным процессом, таким, как испарение ацетона на вате, растворение сахара в воде и т.п., наблюдалось относительное изменение сопротивления в шестом или пятом знаке или даже в четвертом, в случае резистора с особо высоким температурным коэффициентом”.

Таким образом, и в опытах Козырева относительное изменение параметров вещества было незначительным, но составляло в среднем не менее $\epsilon = 10^{-4}$ %. Сопоставляя эти данные с расчётным значением чувствительности интерференционного метода (2.5), можно с уверенностью считать, что с помощью ин-

терферометра Майкельсона все предсказанные Н.А. Козыревым явления могут быть зарегистрированы.

2.2. Описание установки.

Для проведения эксперимента был собран интерферометр Майкельсона по классической схеме [10]. Для компактного расположения элементов интерферометра в оптическую схему были введены два поворотных зеркала. Для проецирования на экран интерференционных полос применено сферическое зеркало. При этом на экране интерференционные полосы отображаются в увеличенном виде. Световые лучи от сферического зеркала идут над зеркалами основной схемы. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 1.

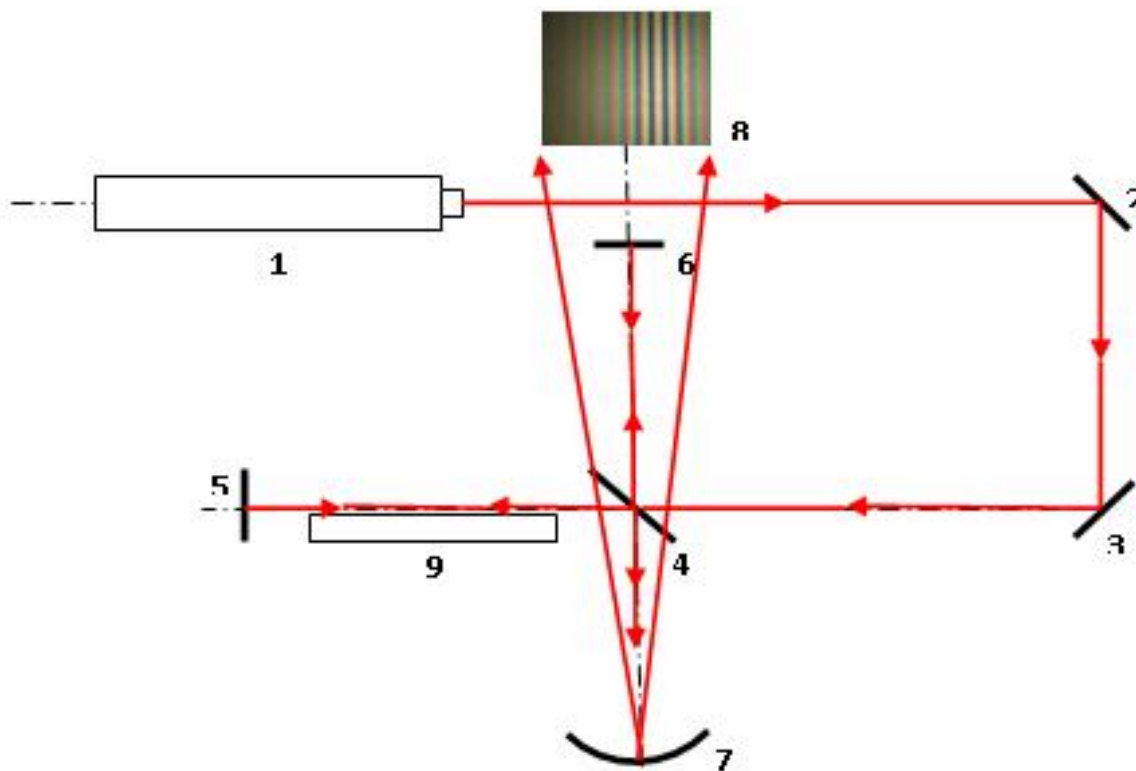


Рис.1. Оптическая схема интерферометра.

На рисунке 1: 1 - лазерный источник света; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – полупрозрачное зеркало; 5, 6 – зеркала; 7 – сферическое зеркало; 8 – экран; 9 – ювета с неравновесным процессом.

В качестве источника света использовался He – Ne лазер ЛГН-111 с длиной волны 633 нм. Внешний вид установки показан на рис.2. Для визуального контроля смещения интерференционных полос на экране были укреплены миллиметровая линейка и бумага с параллельными чёрными полосками.



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки.

2.3. Результаты экспериментов

После тщательной юстировки оптической системы на экране наблюдались интерференционные полосы. Расстояние между полосами и их наклон можно было регулировать при помощи винтов юстировочных столиков с основными зеркалами интерферометра. Из всех возможных вариантов был выбран вариант с расстоянием между интерференционными полосами $x \approx 1,5$ см, так при меньшем расстоянии трудно было проследить малые смещения полос, а при большем – мешали наблюдению резкие колебания полос при внешних посторонних воздействиях (звук, касание стола с установкой и др.). Было замечено, что при внешних воздействиях интерференционная картина колеблется, но

далее, достаточно быстро устанавливается в фиксированном положении. То есть, положения максимумов интерференционных полос на экране после прекращения колебаний не менялось. При выбранном расстоянии между полосами они располагались наклонно, что, в принципе, не имело значения для проведения опытов.

Опыты по растворению кристаллических тел в воде проводились с тремя веществами – сахаром, пищевой содой (гидрокарбонат натрия NaHCO_3) и поваренной солью (NaCl). При этом масса кристаллических веществ составляла 10 – 12 г, а объём воды – примерно 400 мл. Кристаллические вещества засыпались в прозрачную кювету с водой с помощью столовой ложки. Кювета располагалась параллельно лучу света на расстоянии 3 - 4 см от него.

Для проведения опытов было выбрано позднее вечернее время, когда посторонние звуки, вибрации, шум практически отсутствуют. Опыты проводились с участием ассистента, который по команде, синхронизированной с запуском видеозаписи, начинал сыпать мелкокристаллическое вещество в воду. Видеозапись продолжалась примерно минуту. За это время стадия интенсивного растворения кристаллов завершалась.

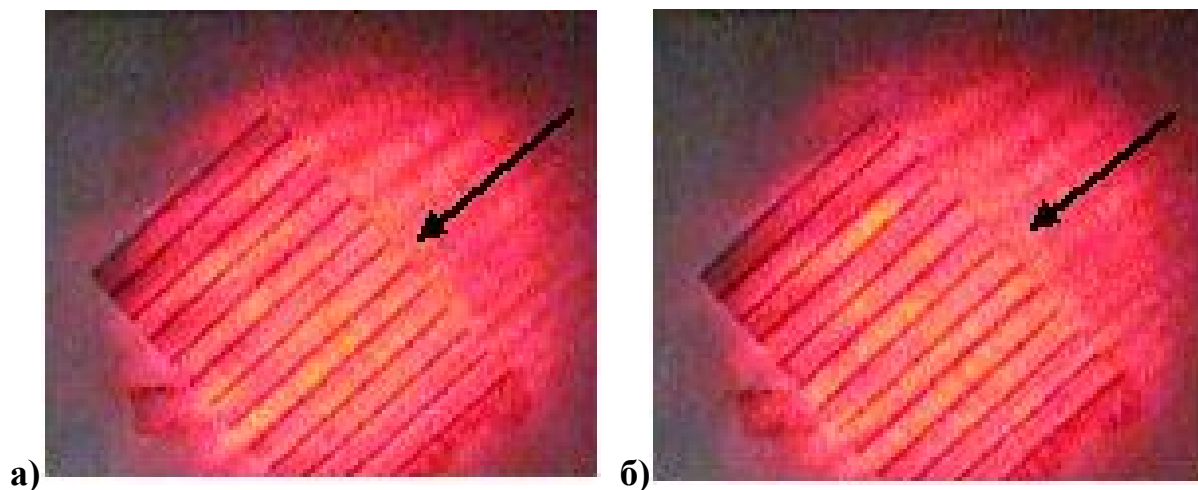


Рис. 3. Кадры видеосъёмки эксперимента.

На рис.3 представлена интерференционная картина перед растворением (а) и во время растворения (б). Стрелкой отмечен максимум интерференционной полосы. При растворении сахара на экране отчётливо было отмечено сме-

щение интерференционных полос влево на расстояние примерно 5 – 6 мм. Затем, когда интенсивное растворение завершилось, интерференционные полосы возвратились на исходное место. Опыт с растворением сахара проводился неоднократно и каждый раз смещение интерференционных полос одинаково повторялось. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое явление было не случайным, а закономерным. Данное явление документально зафиксировано с помощью видеозаписи.

Опыты по растворению соды и поваренной соли также показывали, что происходит смещение интерференционных полос, но значительно в меньшей степени. Эти опыты также запечатлены на видеозаписи. При малых смещениях полос сложнее определять параметры смещения.

Из химии известно, что при 20°C сахар в воде растворяется не только быстрее, а главное, в гораздо большем количестве – более 200 г сахара в 100 г воды, в то время как соль – только около 35,9 г в 100 г воды, а питьевая сода – 9,6 г в 100 г воды. С этим связана активность растворения указанных веществ, что и объясняет наблюдаемые в данных опытах результаты.

Рассмотрим опыты по растворению сахара. Смещение интерференционных полос в этом случае составило примерно $\Delta x \approx 5 - 6$ мм. Учитывая, что расстояние между интерференционными полосами при этом было равно $x \approx 1,5$ см, приходим к выводу, что параметры неравновесной системы (кристаллическое вещество – раствор) изменились согласно формуле (2.4) на

$$\epsilon = \frac{\Delta c}{c} = \frac{632,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 0,24 \text{ м}} \cdot \frac{6}{15} \cdot 100\% \approx 5 \cdot 10^{-5}\% \sim 10^{-4}\%. \quad (2.6)$$

Такого же порядка значение изменения параметров вещества отмечено и у Козырева (см. п.2.1). Таким образом, данные опыты подтверждают теорию времени Н.А. Козырева.

Выводы

Эксперименты по проверке теории времени Н.А. Козырева, *впервые* проведённые с помощью интерферометра Майкельсона позволяют сделать следующие выводы:

1. При растворении кристаллических веществ в воде вблизи светового луча в одном из плеч интерферометра на выходе наблюдается сдвиг интерференционных полос на 20 -30 % от расстояния между ними.

2. Результаты опытов *подтвердили* предсказания теории Н.А. Козырева о том, что при протекании неравновесных процессов изменяется плотность времени, и что время активно воздействует на вещество.

3. В данных опытах изменение параметров вещества (системы) при этом составило $\sim 10^{-4}$ %, что хорошо согласуется с экспериментами Н.А. Козырева.

Заключение

Теория времени Николая Александровича Козырева столь необычна и столь далека от наших повседневных представлений о пространстве и времени, что чаще всего её отвергают, не задумываясь о её сущности. Было бы просто отмахнуться от неё, если бы это была просто гипотеза. Но многочисленные эксперименты, выполненные и Козыревым и другими исследователями, приводят к неожиданным подтверждениям этой теории.

При выполнении данной работы было больше расчёта на опровержение этой теории, нежели на её подтверждение. Вполне возможно, что найдутся и другие объяснения исследованного явления. Например, изменение показателя преломления воздуха под действием понижения температуры при растворении сахара могло бы быть причиной изменения скорости света в воздухе и сдвига интерференционных полос. Произведённая оценка этого эффекта показала, что его влияние на сдвиг интерференционных полос на два порядка меньше, чем реально наблюдаемое изменение параметров системы. В принципе, сдвиг ин-

терференционной картины всегда связан с изменением фазы световой волны в одном из плечей интерферометра. Изменение фазы, как правило, обусловлено внесением в одно из плечей интерферометра вещества с оптическими характеристиками, отличными от оптических характеристик среды, окружающей остальную часть интерферометра. К примеру, стеклянная пластинка определённой толщины, в которой скорость света меньше, нежели в воздухе, помещённая в одно из плечей интерферометра, приведёт к такому сдвигу фазы световой волны и, соответственно, к сдвигу всей интерференционной картины.

Согласно теории Козырева при растворении кристаллических веществ в окружающем пространстве плотность времени возрастает, скорость света при этом уменьшается и, значит, показатель преломления окружающей среды возрастает. Не следует ли из этого и обратный вывод о том, что чем больше показатель преломления оптической среды, тем больше плотность времени в данной среде?

Однако, подводя итог выполненных исследований, следует отметить, что результаты выполненных экспериментов послужили ещё одним доказательством справедливости теории Козырева. Причём проверка теории времени Н.А. Козырева интерферометрическим методом выполнена впервые.

Обнаружение связи между протеканием неравновесного процесса и изменением свойств окружающего пространства-времени, проявляющегося в сдвиге интерференционных полос, предполагает дальнейшие исследования, связанные с определением влияния расстояния от источника неравновесного процесса (причины) до интерферометра, зависимости проявления эффекта от массы и интенсивности растворения вещества и т.п. Возможно применение фотоэлектрических методов регистрации сдвига интерференционных полос.

В данной работе исследовано фундаментальное физическое явление – время. Исследование феномена времени является не только актуальной задачей, но и глобальной для познания человеком окружающего Мира.

Библиографический список

1. Человек и Природа. Козырев Н.А. Избранные труды. - Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1991.
2. О возможности экспериментального исследования свойств времени. Kozurev N. A. On the possibility of experimental investigation of the properties of time//Time in Science and Philosophy. Prague, 1971. P. III-132.
3. Время как физическое явление. Козырев Н.А. «Моделирование и прогнозирование в биоэкологии». Латвийский госуниверситет им. П. Стучки, Рига, 1982.
4. Козырев Н.А. О воздействии времени на вещество // Физические аспекты современной астрономии. Л., 1985. С. 82-91 (Пробл. иссл. Вселенной; Вып. 11).
5. Козырев Н. А. О возможности уменьшения массы и веса тел под воздействием активных свойств времени // Еганова И. А. Аналитический обзор идей и экспериментов современной хронометрии. Новосибирск, 1984. С. 92-98 Деп. в ВИНТИ 27.09.84, ь 6423-84 Деп.
6. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. О дистанционном воздействии звезд на резистор // ДАН СССР. 1990. Т.314, № 2. С.352-355.
7. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. О регистрации истинного положения Солнца // ДАН СССР. 1990. Т.315, № 2. С.368-370.
8. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. О регистрации реакции вещества на внешний необратимый процесс // ДАН СССР. 1991. Т.317, № 3. С.635-639.
9. С.М. Коротаяев Эксперимент по проверке существования козыревского взаимодействия естественных процессов. Тезисы доклада на Семинаре "Изучение феномена времени". МГУ. 9 сентября 1998 г.
10. Бутиков Е.И. Оптика: Учебное пособие для вузов/ Под ред. Н.И. Калитеевского. – М.: Высш. шк.. 1986.

МОДЕЛЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫМ ПЕРЕХОДОМ

Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

Широкое применение в радиоэлектронике получили колебательные системы релаксационного типа с использованием элементов, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками S-типа. При использовании полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом условия генерации тока и напряжения могут быть реализованы в едином полупроводниковом кристалле. При воздействии на поверхностно-барьерный переход сильных электрических полей ($\sim 10^6$ В/см), создаваемых источником электрического напряжения, обнаружено возбуждение релаксационных колебаний тока и напряжения в цепи колебательной системы [1-5]. Для объяснения наблюдаемого процесса предложена теоретическая модель [3] управления внешним электрическим полем высотой потенциального барьера на границе контакта металл-полупроводник. Показано, что при воздействии электрического поля из-за процессов обмена носителями заряда (электронами) между поверхностными энергетическими уровнями и зонами проводимости металла, валентной зоной и зоной проводимости полупроводника изменяется высота поверхностного энергетического барьера.

Применение полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом в качестве активного функционального устройства для практических целей сдерживается отсутствием теоретической модели, позволяющей описать процессы протекания тока в цепи образца и форму возникающих релаксационных колебаний тока и напряжения.

Цель работы – создание теоретической модели колебательной релаксаци-

онной системы, содержащей в своей цепи полупроводниковую структуру с поверхностно-барьерным переходом, и объяснение с её помощью экспериментальных закономерностей, характеризующих колебательные процессы в таких системах.

Полупроводниковая структура рассматривается как система, разделенная на поверхностно-барьерный переход и базовую область. Эквивалентная схема поверхностно-барьерного перехода состоит из нелинейного сопротивления R_s , характеризуемого S-образной вольтамперной характеристикой, и нелинейной емкости C . Включение в схему нелинейного сопротивления основывается на экспериментальных данных и технологических приемах использованных для изготовления полупроводниковых структур [6]. Базовой области на схеме соответствует линейное сопротивление R_B .

Общий вид эквивалентной схемы колебательной релаксационной системы приведен на рисунке 1. Она состоит из полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом (блок VD), блока электрического питания (блок PS) и нагрузочного сопротивления R_o .

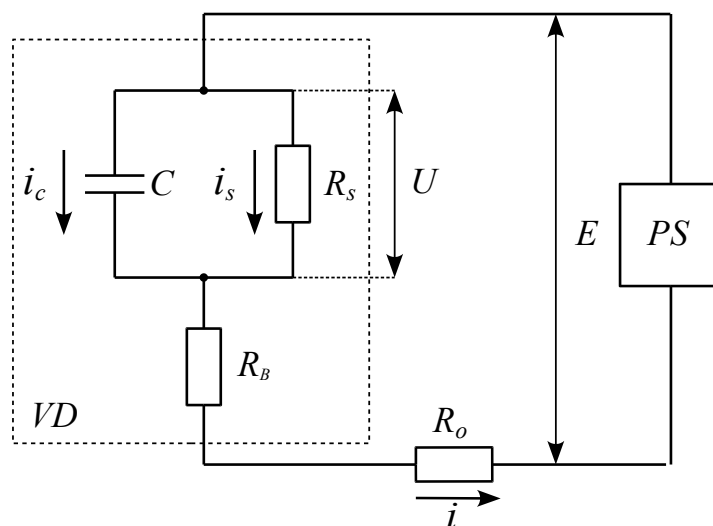


Рисунок 1. Эквивалентная схема генератора на основе полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом

1. Модель колебательной релаксационной системы на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом

Уравнение токов для эквивалентной схемы колебательной релаксационной системы имеет следующий вид:

$$i = i_C + i_S, \quad (1)$$

где i – полный ток, протекающий через полупроводниковую структуру; i_S – ток, протекающий через нелинейный элемент; i_C – ток, протекающий через емкость.

Ток через полупроводниковую структуру так же может быть определен выражением:

$$i = \frac{E - U}{R}, \quad (2)$$

где E – напряжение электрического питания, создаваемое блоком VD; U – электрическое напряжение на нелинейном сопротивлении и на нелинейной емкости, $R = R_O + R_B$.

Зависимость тока от напряжения через нелинейную емкость может быть описана формулой:

$$i_C = \frac{C(U)dU}{dt}, \quad (3)$$

где t – время.

С учетом соотношений (1)-(3), уравнение состояния для эквивалентной схемы будет:

$$\frac{C(U)dU}{dt} = \frac{E - U}{R} - \varphi(U), \quad (4)$$

где $\varphi(U)$ – функция, описывающая S-образную вольтамперную характеристику поверхностно-барьерного перехода, зависимость $\varphi(U)$ определена экспериментально в [6].

Если выполняется условие:

$$[1 + R\varphi'(U)] < 0, \quad (5)$$

то из (4) следует, что функция $i_C(U)$ возрастает [7], [8].

Анализ уравнения состояния (4), описывающего режим автоколебаний в колебательной релаксационной системе на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом, выполнен с привлечением математического аппарата теории цепей [9].

На рисунке 2 приведен фазовый портрет, характеризующий множество состояний системы описываемой уравнением (4).

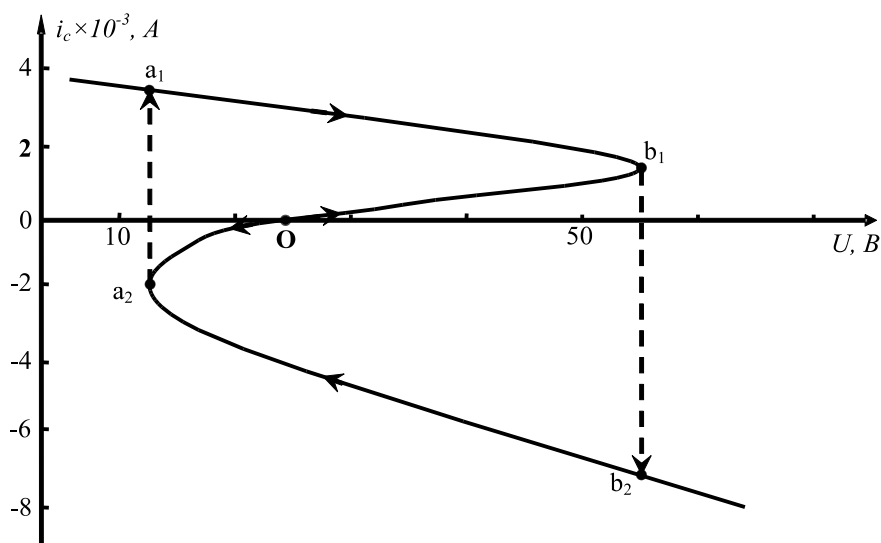


Рисунок 2. Фазовый портрет колебательной системы

Точка O – пересечение нагрузочной прямой, описываемой уравнением (2), с вольтамперной характеристикой $\varphi(U)$ нелинейного сопротивления R_S на участке отрицательного дифференциального сопротивления. Точка O является точкой неустойчивого равновесия. Из состояния, описываемой точкой O , система может перейти в точки a_2 и b_1 , которые являются особыми точками. Выход системы из точки O может быть произведен благодаря действию случайной малой флуктуацией какого-либо электрического параметра. В полупроводниках такими флуктуациями могут быть шумовые процессы. В точках a_2 и b_1 производная тока по напряжению испытывает разрыв, система скачком переходит из a_2 и a_1 , а из b_1 в b_2 . Возможность таких скачков тока в радиотехнических цепях теоретически обоснована в [7], [8]. Дальнейшее изменение тока и напряжения

на нелинейном сопротивлении будут происходить траектории $a_2 - a_1 - b_1 - b_2 - a_2$.

Длительности отдельных фаз изменения напряжения на полупроводниковой структуре в соответствии уравнением (4) определяется:

$$t = \int_U \frac{RC(U)dU}{E - U - R\phi(U)}, \quad (6)$$

где пределами интегрирования являются величины напряжений в точках a_1 и b_1 либо a_2 и b_2 .

Участок фазовой кривой $a_1 - b_1$ описывает систему в непроводящем состоянии. В этом случае напряжение на нелинейном сопротивлении и емкости возрастает. Емкость поверхностно-барьерного перехода на данном участке фазовой кривой определяется соотношением [10], [11]:

$$C = C_1 = \frac{C_0 \sqrt[z]{U_0}}{\sqrt[z]{U_0 - U}} = S_C \sqrt[z]{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e n}{2(U_0 - U)}}, \quad (7)$$

где C_0 – емкость контакта в равновесном состоянии, при отсутствии внешнего электрического напряжения, U_0 – высота потенциального барьера в контакте в равновесном состоянии, z – показатель степени, принимающий значения для различных типов переходов (резкий, плавный и др.) от 2 до 3, ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, n – концентрация носителей заряда (электронов), e – элементарный заряд электрона, S_C – площадь контакта металл-полупроводник.

Участок фазовой кривой $a_2 - b_2$ описывает состояние системы в ситуации с высокой проводимостью. В этом случае напряжение на поверхностно-барьерном переходе убывает. Емкость поверхностно-барьерного перехода на рассматриваемом участке фазовой кривой определяется током, протекающим через полупроводниковую структуру, и может быть рассчитана по формуле [10], [11]:

$$C = C_2 = \frac{e}{kT} i \tau, \quad (8)$$

где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, τ – время

жизни носителей заряда (электронов).

Величина тока через полупроводниковую структуру с поверхностно-барьерным переходом, определяется материальными параметрами полупроводника – концентрацией электронов n и их подвижностью μ_n . Эти два параметра входят в выражения для базового сопротивления R_B :

$$R_B = \frac{w}{e\mu_n n S_B} = \rho \frac{w}{S_B}, \quad (9)$$

где w – длина базы, ρ – удельное сопротивление полупроводника.

Период колебаний процесса определяется соотношением:

$$T_o = \tau_1 + \tau_2, \quad (10)$$

где τ_1 – длительность возрастания напряжения на поверхностно-барьерном переходе (a_1-b_1), τ_2 – длительность убывания напряжения на поверхностно-барьерном переходе (a_2-b_2). Длительность характерных временных интервалов τ_1 и τ_2 в соответствии с (6) зависит от типа емкости контакта металл-полупроводник – барьерной (7) или диффузионной (8), соответственно.

2. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

На рисунке 3а приведены результаты моделирования колебаний тока и напряжения при $E \geq 60$ В с использованием выражений (4)-(9). Для сравнения на рисунке 3б представлены экспериментальные осциллограммы зависимости напряжения и тока через нагрузочное сопротивление от времени, полученные на германиевых точечных диодах. Период колебаний рассчитанных и экспериментальных зависимостей $U(t)$, $i(t)$ совпадает.

Длительности возрастания τ_1 и спада τ_2 напряжения на нелинейном сопротивлении рассчитывались для разных значений E с помощью выражения (6) с подстановкой соотношений (7, 8).

Экспериментальная и расчетная зависимости τ_1 и τ_2 от E для кремниевых

транзисторных структур приведены на рисунке 4 и 5, соответственно.

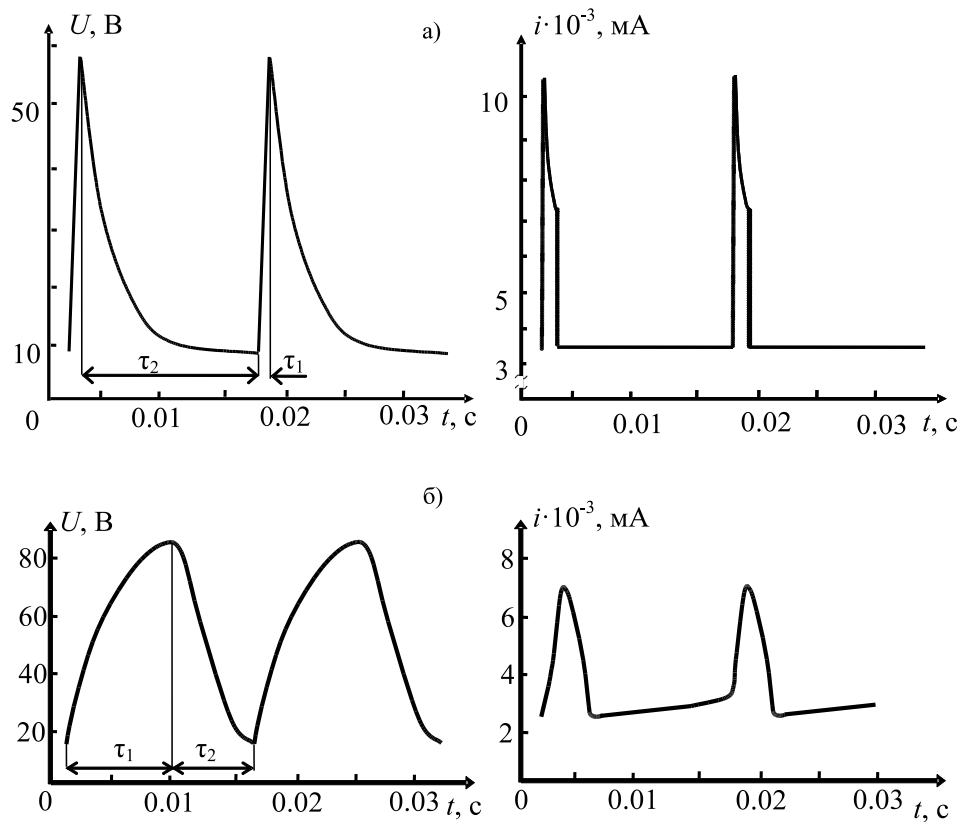


Рисунок 3. Теоретические (а) и экспериментальные (б) временные зависимости напряжения и тока

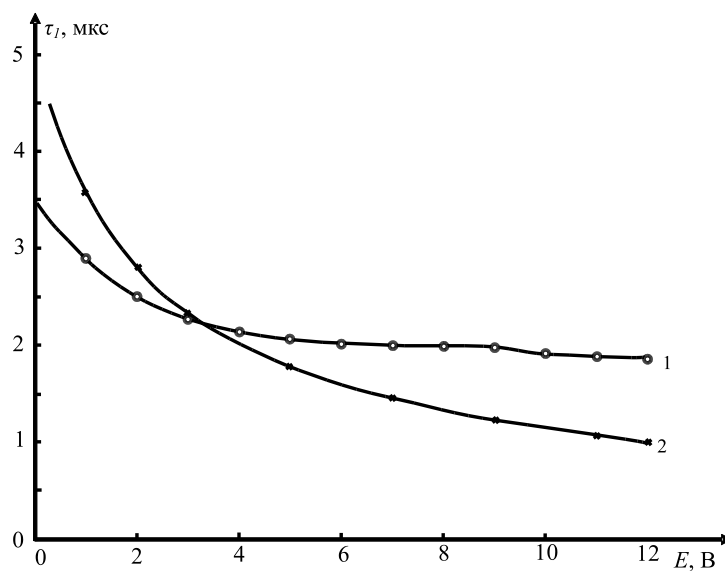


Рисунок 4. Зависимость длительности τ_1 возрастания напряжения U от напряжения смещения E : 1 – эксперимент, 2 – расчет

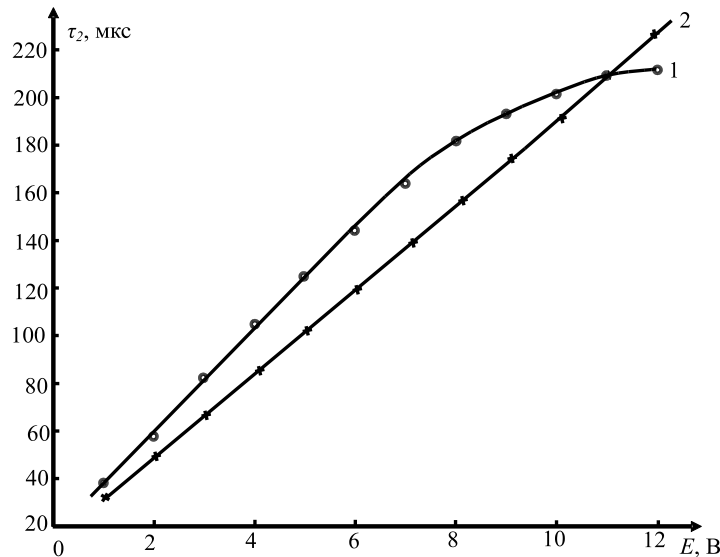


Рисунок 5. Зависимость длительности τ_2 спада напряжения U от напряжения смещения E : 1 – эксперимент, 2 – расчет

Расчетная зависимость $\tau_1(E)$ качественно совпадает с экспериментальной. Несоответствие теории эксперименту при больших значениях E ($E \geq 8$ В) связывается нами с тем, что соотношение (6) было получено для емкости идеального контакта металл-полупроводник. На практике получаются контакты, содержащие пространственные дефекты, наличие которых зависит от технологии изготовления полупроводниковых структур.

Расхождение расчетной зависимости $\tau_2(E)$ от экспериментальной может быть объяснено изменением величины отрицательного дифференциального сопротивления в сторону его уменьшения в связи с разогревом полупроводниковой структуры. При увеличении внешнего электрического напряжения на полупроводниковой структуре происходит уменьшение напряжения в точке b_2 и, как следствие, уменьшается емкость поверхностно-барьерного контакта.

Для проверки применимости модели колебательной релаксационной системы на основе полупроводниковых структур с поверхностно-барьерным переходом проведена оценка удельного сопротивления базового слоя полупроводниковой структуры. Расчеты выполнены с помощью уравнения (4), формул (7) и (9) с использованием экспериментально измеренных значений амплитуды,

частоты колебаний напряжения и геометрических размеров поверхностно-барьерного перехода и базовой области.

Для упрощения процедуры численного расчета в уравнении (4) сделана замена:

$$K = \frac{dU}{dt} \rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta t}, \quad (11)$$

где ΔU – амплитуда колебаний напряжения, Δt – длительность импульса напряжения, определяемая по частоте ν возникающих колебаний напряжения, $\Delta t = 1/\nu$.

С учетом (7, 11) уравнение (4) примет следующий вид:

$$\left(\frac{S_C K}{\sqrt[3]{U_0 - U}} \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2\mu_n \rho}} + \varphi(U) \right) \left(\rho \frac{w}{S_B} + R_O \right) = E - U. \quad (12)$$

Исходные данные [6] и решение уравнения (12) ρ_r приведены в таблице. Удельное сопротивление базового слоя полупроводниковых структур оценивалось для напряжений $E \geq 80$ В и амплитуды колебаний 60 В, результаты приведены в таблице.

Таблица

Сравнительная характеристика полупроводниковых структур

	ρ_e , Ом·м	S_C , м ²	w , мкм	ν , Гц	ρ_r , Ом·м
Ge	0.25	10^{-6}	880	$5 \cdot 10^5$	0.225
Si	0.075	10^{-6}	800	$5 \cdot 10^4$	0.072

Видно, что удельные сопротивления, как для германия, так и для кремния, полученные в результате расчетов ρ_r и экспериментально измеренные ρ_e близки по значениям.

Выводы

Предложена эквивалентная схема генератора на основе полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом. Построена математическая модель колебательной релаксационной системы для этой структуры, описывающая форму экспериментально наблюдаемых колебаний тока и напряже-

ния. Получено аналитическое выражение для периода колебаний тока и напряжения. Дано удовлетворительное качественное и количественное объяснение экспериментально наблюдаемых временных зависимостей длительности отдельных фаз изменений напряжения U и тока i в полупроводниковой структуре от напряжения электрического питания E . На примере структур, изготовленных из Si и Ge, выявлена взаимосвязь между материалом полупроводника и частотой колебаний тока и напряжения. По экспериментальным данным - амплитуде и частоте колебаний напряжения, получено значение удельного сопротивления базового слоя полупроводниковой структуры с поверхностно-барьерным переходом, близкое к реальному.

Библиографический список

1. Косман М.С., Муравский Б.С. // ФТТ. 1961. Т. 3. № 11. С. 2504-2506.
2. Муравский Б.С. // ФТТ. 1962. Т.9. № 4. С.2485-2489
3. Муравский Б.С. Кузнецов В.И., Фризен Г.И., Черный В.Н. // ФТП. 1972. Т. 6. С. 2114-2122.
4. Муравский Б.С., Куликов О.Н. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 4. С. 393-397.
5. Муравский Б.С., Рубцов Г.П., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н. // Журнал радиоэлектроники 2000 №10. <http://jre.cplire.ru/win/oct00/2/text.html>.
6. Муравский Б.С. Неравновесные процессы и токовая неустойчивость в контактах металл-полупроводник: Дисс. доктора физ.-мат. наук, 1983. Л. 413 с.
7. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М. Наука. 1981. 915 с.
8. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука. 1978. 392 с.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа. 1984. 528 с.
10. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. 2 т. М.: Мир. 1984. 912 с.
11. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Советское радио. 1980. 296 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н., Сахно М.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

Практически вся современная электроника основана на полупроводниковых элементах, для описания которых вводится понятие двухполюсника [1]. Важнейшей характеристикой двухполюсников является зависимость постоянного тока от постоянного напряжения на его зажимах $i=F(u)$ при согласованном выборе полярности напряжения и тока, называемая вольтамперной характеристикой (ВАХ). Вольтамперная характеристика представляет собой функциональную зависимость тока через двухполюсник от напряжения на этом двухполюснике и чаще всего описывает поведение двухполюсника при постоянном токе [2].

Наибольший интерес представляет исследование ВАХ полупроводниковых элементов имеющих высокую степень нелинейности, характеризующейся коэффициентом нелинейности $\beta = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU}$. Величина, обратная $\frac{dI}{dU}$, называется дифференциальным сопротивлением $R_d = \frac{dU}{dI}$ и определяется как отношение приращения напряжения dU к приращению тока dI при небольшом смещении рабочей точки на ВАХ под воздействием переменного напряжения малой амплитуды. Дифференциальное сопротивление R_d может быть как положительным, так и отрицательным, причём отрицательное дифференциальное сопротивление – свойство полупроводниковых элементов, проявляющееся в возникновении на вольтамперной характеристике участка, где напряжение U уменьшается при увеличении протекающего тока I . Такие полупроводниковые элементы позволяют трансформировать энергию источника питания в незатухаю-

щие колебания. Зависимость I от U в нелинейном элементе с отрицательным дифференциальным сопротивлением может быть N-типа и S-типа, и определяется наличием в полупроводниковом элементе доменной неустойчивости для характеристики N-типа или шнурования тока по сечению образца для характеристики S-типа [3].

Измерение ВАХ, имеющих участок отрицательного дифференциального сопротивления, представляет собой сложную радиотехническую задачу, для решения которой применяются как специализированные радиоизмерительные устройства, так и различные методики, призванные упростить процесс измерения.

Цель работы – анализ методик измерения вольтамперных характеристик сложных полупроводниковых структур с отрицательным коэффициентом нелинейности.

1. Аналоговые измерители вольтамперных характеристик

Аналоговые устройства измерения вольтамперных характеристик представляют собой характериограф, предназначенный для наблюдения и исследования характеристик радиоэлектронных устройств и компонентов. Измерительная информация в этих приборах отображается, как правило, на экране электронно-лучевой трубки в виде кривой или семейства кривых. Аналоговые характериографы построены по классической схеме измерения, в которой задание тестового воздействия и отображение результата измерения происходит в аналоговом виде, что позволяет производить измерения не только в статическом режиме, но и в динамическом. В качестве примера можно привести характериографы TR-4802 и Л2-56, которые использовались для исследования S- и N-характеристик полупроводниковых структур с распределенным эмиттерным переходом (СРЭП) [4]. Детально исследовались статические ВАХ структур СРЭП по 24 возможным схемам измерения, в то же время проведенные исследования показали, что неустойчивость тока возникает только в 10 случаях.

На рис. 1 представлена типичная вольтамперная характеристика полупроводниковой структуры с СРЭП, содержащая участок N-характеристики, сдвинутая вдоль оси токов. Начиная с некоторого значения параметрического тока на ВАХ, возникают участки неустойчивости тока. Управление неустойчивостью тока (крутизной N – характеристики) может осуществляться как величиной параметрического тока, так и напряжением, что позволяет добиться устойчивого наблюдения отрицательно сопротивления на экране характериографа.

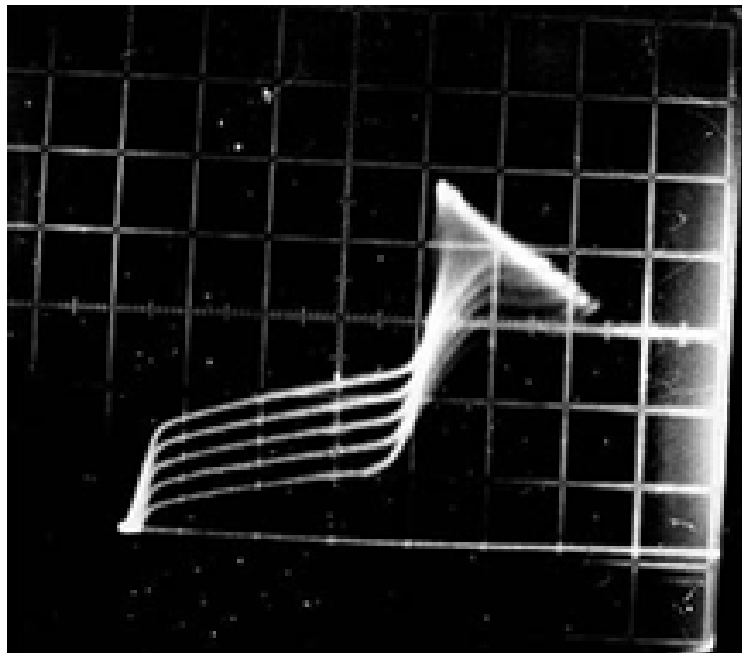


Рисунок 1. Вольтамперная характеристика СРЭП снятая на характериографе TR-4802, содержащая N-участок характеристики

На рис. 2 представлена типичная вольтамперная характеристика, содержащая участок S-характеристики с неустойчивостью тока. Регулировка порога возникновения неустойчивости тока в СРЭП осуществлялась изменением параметрического тока. В то же время, добиться четкой картины S – характеристики на экране характериографа оказалось затруднительно.

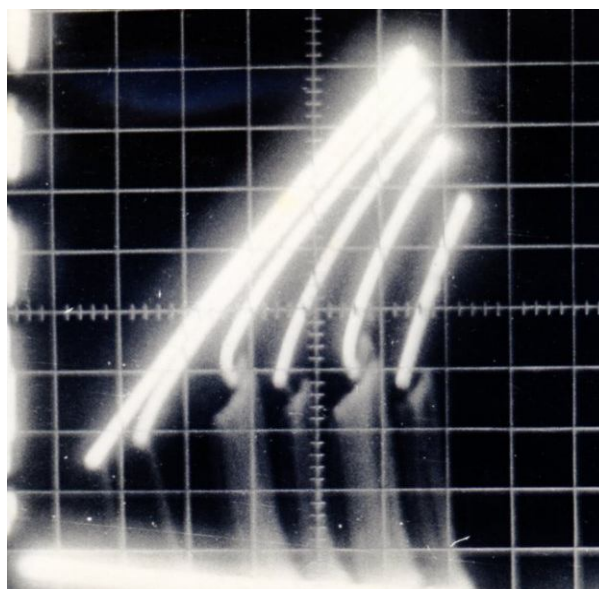


Рисунок 2. Вольтамперная характеристика СРЭП снятая на характериографе Л2-56, содержащая S-участок характеристики

Полученные характеристики однозначно свидетельствуют о наблюдении N- и S-участка на ВАХ полупроводникового элемента, в тоже время произвести расчетные исследования R_d , β с приемлемой точностью не представляется возможным, что существенно ограничивает возможности применения аналоговых характериографов для исследования неустойчивости тока.

2. Цифровые измерители вольтамперных характеристик

Цифровые устройства измерения ВАХ представляют собой современный класс устройств – цифровых характериографов. Цифровой характериограф – это электронный прибор, предназначенный для автоматического получения электрических характеристик испытуемых образцов. Прибор имеет собственное цифровое ядро и связан стандартным цифровым интерфейсом с ЭВМ, на которой установлена специальная управляющая программа. Характериограф задаёт испытательные воздействия на образец в соответствии с алгоритмами испытаний, заложенными в управляющей программе, и измеряет требуемые параметры образца. Для этого в состав характериографа включены необходимые источники воздействий. Благодаря управлению от ЭВМ такой характерио-

граф обеспечивает получение широкого спектра характеристик испытуемого объекта с гибко настраиваемыми параметрами.

В качестве примера можно привести такие устройства как: унифицированные программно-аппаратные комплексы типа LabView, включающие прецизионные приборы, например, производства Keithley, цифровые характериографы «Эрбий», измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-01 [5].
Области применения цифровых характериографов: научные исследования органических светоизлучающих диодов, полупроводниковых лазерных диодов и лазерных модулей, плёночных наноструктур, фоторезисторов, фотодиодов, терморезисторов, термисторов, биполярных и полевых транзисторов; испытания (тестирование) указанных приборов и структур в промышленном производстве; технический мониторинг физических и электрических параметров компонентов технических систем.

Нами проводились исследования полупроводниковых структур с СРЭП на цифровом характериографе ИППП-01 [6]. Для проведения измерений ВАХ полупроводниковых структур с СРЭП была использована стандартная программа измерений для транзистора p-n-p-типа. В данной программе была выставлена схема измерений, согласно которой полупроводниковая структура с СРЭП подключалась к измерительным зажимам характериографа ИППП-01 по схеме с общей базой. На рис. 3 представлена типичная вольтамперная характеристика с неустойчивостью тока, содержащая участок отрицательного дифференциального сопротивления в области $I \in (-0.03 \text{ A} \div -0.02 \text{ A})$.

Необходимо отметить, что использование цифровых характериографов ограничивается прямым измерением статических ВАХ, в то же время для исследования динамических ВАХ необходимо использование различных косвенных методов, позволяющих в целом провести соответствующие исследования.

Так один из методов заключается в измерении обратной ВАХ $u = F(i)$, при этом исключается неоднозначность S-характеристики. В то же время данный метод не применим к N-образным характеристикам. Другой метод основан на

включении сопротивления параллельно полупроводниковой структуре с N-образной характеристикой и последовательно с S-характеристикой [7]. Суммарная ВАХ при этом не имеет падающего участка, и оказывается однозначной как по напряжению, так и по току. Данный метод применим на постоянном токе, при этом на переменном токе неоднозначность сохраняется.

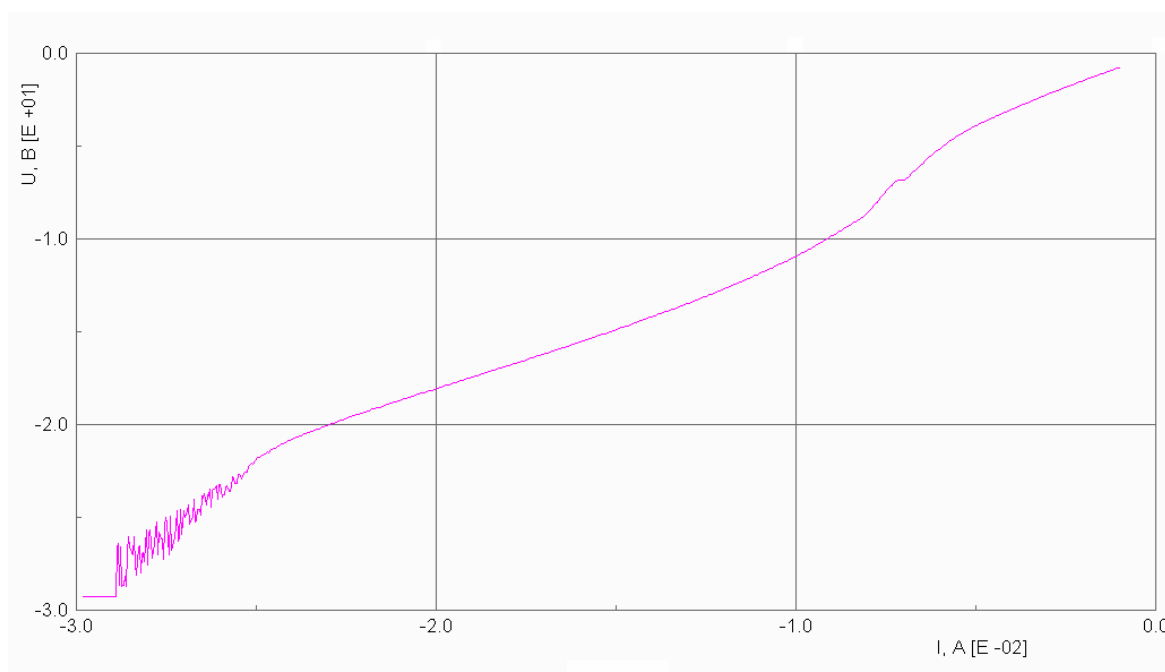


Рисунок 3. Вольтамперная характеристика СВЭП с неустойчивостью тока, снятая на цифровом характериографе ИППП-01

Заключение

Рассмотрены приборы и методы, позволяющие эффективно производить исследования вольтамперных характеристик сложных полупроводниковых структур с отрицательным коэффициентом нелинейности, причем применение как аналоговых характериографов, так и цифровых с соответствующими методиками позволяет производить измерения как статических параметров на постоянном токе, так и динамических. Следует отметить, что оба класса аппаратуры эффективно дополняют друг друга, как по точности измерения, так и по характеру измерений, позволяя не только проводить наблюдения возникнове-

ния отрицательного сопротивления, но и производить измерения его характеристик.

Библиографический список

1. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники. М: Горячая линия-Телеком., 2011. 394 с.
2. Новиков Ю.Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях. Учебники для вузов. М: Лань, 2011. 368 с.
3. Григорьян Л.Р., Муравский Б.С., Яманов И.Л. Электронные и оптоэлектронные приборы на основе транзисторных структур с распределенным эмиттерным р⁺-п-переходом. Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. Москва. 1997. Вып. 2. С. 48-50.
4. Муравский Б.С., Рубцов Г.П., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н. Электрофизические и фотоэлектрические свойства транзисторных структур с распределенным эмиттером и функциональные приборы на их основе. Журнал Радиоэлектроника. №10. 2000. <http://jre.cplire.ru/win/oct00/2/text.html>.
5. Толкун А., Лисенков Б., Дворников О., Шульгевич Ю. Новые возможности анализа воль-амперных характеристик полупроводниковых приборов. // Компоненты и технологии. 2007. №9. С. 211-214.
6. Богатов Н.М., Григорьян Л.Р., Куликов О.Н. Полупроводниковая структура с поверхностно-барьерным переходом как основа колебательной системы. Материалы XVII Всероссийской конференции "Оптика и спектроскопия конденсированных сред", Краснодар 18-24 сентября 2011. Краснодар: КубГУ, 2011. С. 184-193.
7. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике. М.: ДМК Пресс, 2011. 688 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ПАР ФРЕНКЕЛЯ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В КРЕМНИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПОТОКОМ ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Богатов Н.М., Коваленко М.С.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

Кремниевые электронные приборы используются в условиях повышенного воздействия ионизирующих излучений. Образование радиационных дефектов влияет на физику и параметры данных приборов и является одной из причин деградации параметров кремния в этих условиях [1].

Радиационные дефекты в кремнии обладают электрической и рекомбинационной активностью. Увеличение их концентрации изменяет концентрацию и время жизни электронов и дырок, поэтому изменяются электрические характеристики *n-p*-переходов в процессе работы устройства. Изучение процесса формирования радиационных дефектов является актуальной проблемой физики и техники полупроводников.

Цель работы – построение модели и анализ процесса разделения пар Френкеля, образовавшихся в кремнии в результате облучения потоком ионизирующих частиц.

Модель образования пар Френкеля

Радиационный дефект – дефект, образовавшийся в материале в результате воздействия на него ионизирующими частицами. В зависимости от механизма образования выделяют простые, первичные и вторичные радиационные дефекты [2, 3]. Пары Френкеля образуются как простой дефект при взаимодействии ионизирующего излучения с кристаллической решёткой кремния. При этом формируются связанные или разделённые пары Френкеля, состоящие из вакансии V и междоузельного кремния Si_i .

Сформулируем модель, описывающую процесс радиационного образования и разделения пар Френкеля в кремнии.

Налетающая частица передаёт атому кремния кинетическую энергию. Чтобы выйти из узельного положения, атом кремния должен преодолеть потенциальный барьер T_d (рис. 1).

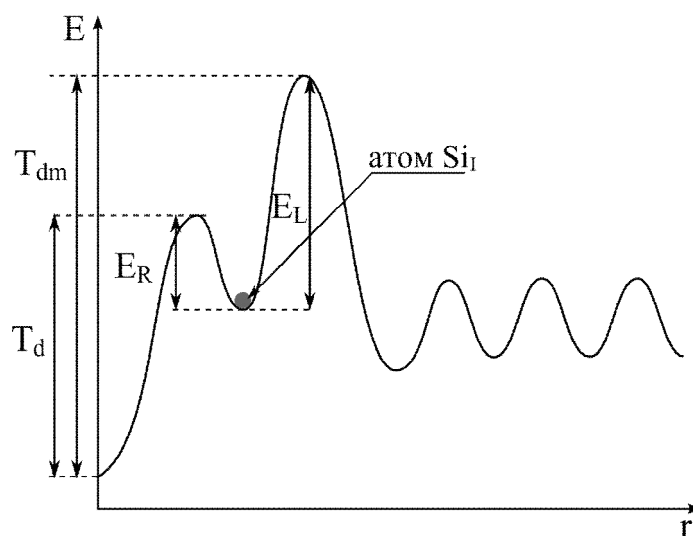


Рис.1. Форма потенциального барьера нейтральной связанной пары Френкеля

В зависимости от энергии, переданной частицей атому кремния, может образоваться связанная либо разделённая пара Френкеля. Пороговая энергия формирования связанной пары Френкеля составляет $T_d = 12,9$ эВ, а разделённой $T_{dm} = 21$ эВ [2, 3].

Связанная пара Френкеля образуется, если при столкновении с налетающей частицей атому Si, находящемуся в узле кристаллической решетки, передана энергия $T_d < T_k < T_{dm}$.

Объемная скорость генерации пар Френкеля [3]

$$G_{\Phi} = N_0 \Phi \int_{T_d}^{T_{dm}} \frac{d\sigma_d}{dT_k} dT_k \quad (1)$$

где N_0 – концентрация атомов кремния в решетке кристалла, $\Phi(E)$ – поток частиц с энергией E , проникающих в твёрдое тело, $d\sigma_d(E, T_k)$ – дифференциальное

сечение рассеяния, характеризующее вероятность передачи узловому атому энергии T_k от налетающей частицы с энергией E .

Связанные пары Френкеля могут существовать только при гелиевых температурах [4]. При повышении температуры смещённый атом кремния Si_I либо возвращается в узельное положение, преодолев энергетический барьер E_R , и пара аннигилирует, либо преодолевает энергетический барьер E_L , и образуется разделённая пара Френкеля.

Разделение связанной пары Френкеля описывается различными моделями метастабильных пар [3 – 5]. Различают нейтральные и заряженные связанные пары Френкеля. Вероятность заряженного состояния связанной пары Френкеля описывается формулой

$$\omega_1 = \left[1 + g_1 \exp \left\{ \frac{F - E_f}{kT} \right\} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где F – уровень Ферми, $g_1 = 0,5$, E_f – положение энергетического уровня пары Френкеля в запрещённой зоне кремния, $E_f = E_c - 0,07$ эВ [4], k – постоянная Больцмана, T – температура. Форма потенциального барьера заряженной пары Френкеля изменяется так, что она разделяется с вероятностью 1.

Вероятность разделения нейтральной пары описывается формулой

$$\omega_2 = \left[1 + \exp \left\{ - \frac{E_R - E_L}{kT} \right\} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Вероятность разделения связанной пары Френкеля с учётом зарядового состояния дефекта определяется величиной ω_f :

$$\omega_f = \omega_1 \omega_c + (1 - \omega_1 \omega_c) \omega_2, \quad (4)$$

где ω_c – дополнительный параметр, характеризующий вероятность смещения атома кремния в пространственное положение, допускающее заряженное состояние, $\omega_c = 0.00887$ [6], $\omega_{fc} = \omega_1 \omega_c$ – вероятность того, что атом кремния, смещённый в междоузельное положение, заряжен (заряженная пара Френкеля разделяется), а $\omega_{fn} = (1 - \omega_1 \omega_c) \omega_2$ – вероятность разделения связанной пары Френкеля, находящейся в нейтральном зарядовом состоянии.

На рисунке 2 приводятся зависимости вероятностей разделения нейтральной ω_{fn} и заряженной ω_{fc} пар Френкеля от температуры в температурном диапазоне [250 К; 607 К]. Кривые 1, 2 и 3 характеризуют вероятность разделения заряженной пары Френкеля для различных положений уровня Ферми в запрещенной зоне. Зависимость 4 отражает вероятность разделения нейтральных пар Френкеля ω_{fn} . Отметим, что ω_{fn} практически не зависит от положения уровня Ферми. Основной вклад в вероятность разделения связанных пар Френкеля вносят заряженные пары, а вклад нейтральных пар пренебрежимо мал.

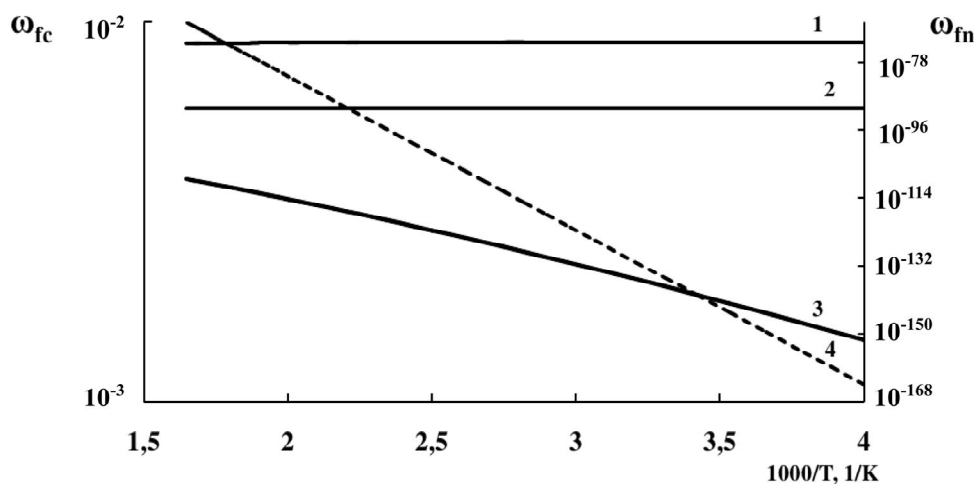


Рис. 2. Температурная зависимость вероятностей разделения связанных пар Френкеля:

$$1 - \omega_{fc}, F = E_c - 0,28 \text{ эВ}, 2 - \omega_{fc}, F = E_c - 0,07 \text{ эВ},$$

$$3 - \omega_{fc}, F = E_c - 0,02 \text{ эВ}, 4 - \omega_{fn}.$$

Разделённая пара Френкеля формируется, если атом кремния, находящийся в узле кристаллической решётки, получает энергию $T_k \geq T_{dm}$. Форма потенциального барьера после образования разделённой пары Френкеля изменяется. В результате формирования разделённой пары Френкеля высота энергетического барьера обратного перехода уменьшается (рис. 3), а атом междоузельного кремния находится в пределах сферы реакции радиусом r_{iv} . Атом Si_I либо мигрирует от генетически связанной с ним вакансии за счёт активационного механизма миграции, либо аннигилирует с данной вакансией.

Для аннигиляции разделённой пары Френкеля междоузельному атому кремния требуется преодолеть барьер обратного перехода E^{iv} , высота которого зависит от состояния аннигилирующей пары. Согласно теории примесных реакций, реакции, для которых энергия активации диффузии E_m^i меньше барьера обратного перехода (E_1^{iv} на рис. 3), называются барьерно-контролируемыми. Реакции, для которых E_m^i больше энергии обратного перехода (E_2^{iv} на рис. 3), называются диффузионно-контролируемыми [3, 5].

С учётом формы потенциального барьера (рис. 3), вероятность избежать аннигиляции для нейтральной разделённой пары Френкеля описывается следующим равенством [5, 7]:

$$\omega_3 = \left[1 + \exp \left\{ - \frac{E_2^{iv} - E_m^i}{kT} \right\} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где E_2^{iv} – энергия барьера обратного перехода, E_m^i – энергия активации миграции междоузельного кремния ($E_2^{iv} = 0$, $E_m^i = 0,13$ эВ согласно [8]).

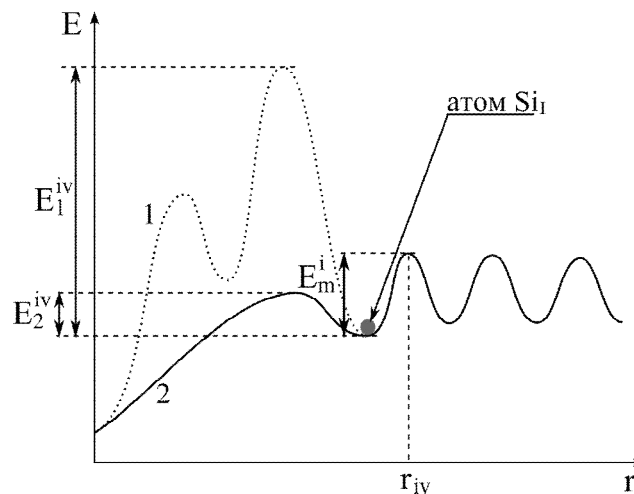


Рис. 3. Форма потенциального барьера разделённой пары Френкеля
 1 – потенциальная энергия для барьерно-контролируемых реакций,
 2 – потенциальная энергия для диффузионно-контролируемых реакций.

Величина ω_d , характеризующая вероятность избежать аннигиляции Si_I с генетически связанной V , определяется следующим образом. Считаем, что за-

ряженное состояние метастабильной пары V и Si_I образуется в одном из шести симметричных направлений относительно вакансии. Тогда

$$\omega_d = 6\omega_1\omega_c + (1 - 6\omega_1\omega_c)\omega_3, \quad (6)$$

где $\omega_{dc} = 6\omega_1\omega_c$ – вероятность избежать аннигиляции паре Si_I, V , находящейся в заряженном состоянии, $\omega_{dn} = (1 - 6\omega_1\omega_c)\omega_3$ – вероятность избежать аннигиляции паре Si_I, V , находящейся в нейтральном зарядовом состоянии.

На рисунках 4 и 5 приведены температурные зависимости вероятности избежать аннигиляции разделённых пар Френкеля ω_d с учётом нейтрального и зарядового состояния в диапазоне температур [250 К; 607 К] при различных положениях уровня Ферми.

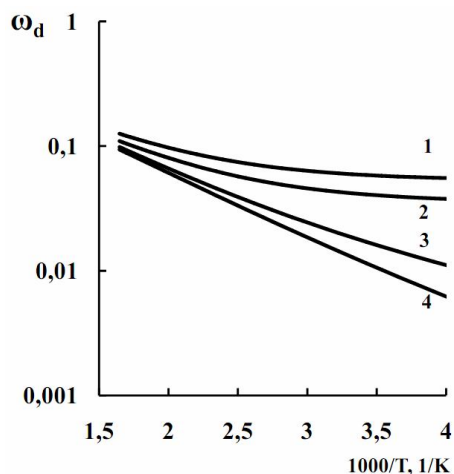


Рис. 4. Температурная зависимость вероятности ω_d :

- 1 – $F = E_c - 0,28$ эВ,
- 2 – $F = E_c - 0,07$ эВ,
- 3 – $F = E_c - 0,02$ эВ,
- 4 – $F = E_c$

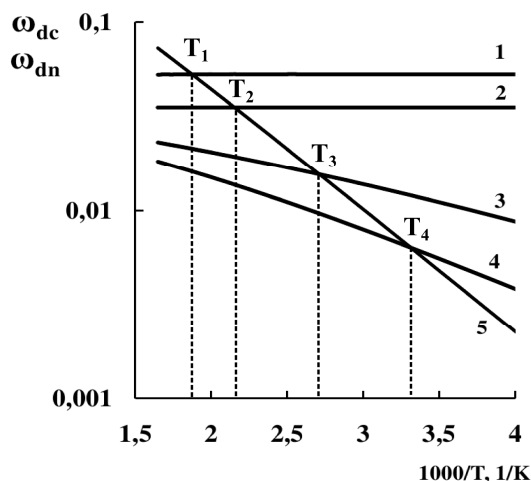


Рис. 5. Температурная зависимость вероятностей ω_{dc} и ω_{dn} :

- 1 – ω_{dc} , $F = E_c - 0,28$ эВ,
- 2 – ω_{dc} , $F = E_c - 0,07$ эВ,
- 3 – ω_{dc} , $F = E_c - 0,02$ эВ,
- 4 – ω_{dc} , $F = E_c$, 5 – ω_{dn}

При снижении положения уровня Ферми или увеличении температуры наблюдается рост вероятности ω_d (рис. 4). Вклад в вероятность разделения рассматриваемых нейтральных и заряженных пар Френкеля изображён на рисунке 5. Для нейтральной пары Френкеля вероятность ω_{dn} практически не зависит от положения уровня Ферми (зависимость 5 на рис. 5). Отметим на рисунке 5 наличие точек $T_1 = 533,7$ К, $T_2 = 462$ К, $T_3 = 364,1$ К, $T_4 = 296,1$ К, соответствующие

щих пересечению зависимостей 1, 2, 3, 4 с зависимостью 5, соответственно. Если температура $T > T_i$ ($i=1, 2, 3, 4$), преобладает распад нейтральных пар Френкеля для соответствующего положения уровня Ферми, а при $T < T_i$ – заряженных.

Из рисунка 5 следует, что расположение точек T_i зависит от положения уровня Ферми. Данная зависимость, изображена на рисунке 6 и показывает, что чем ниже положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости, тем выше температура T_c , при которой вероятности распада нейтральных и заряженных разделенных пар Френкеля равны.

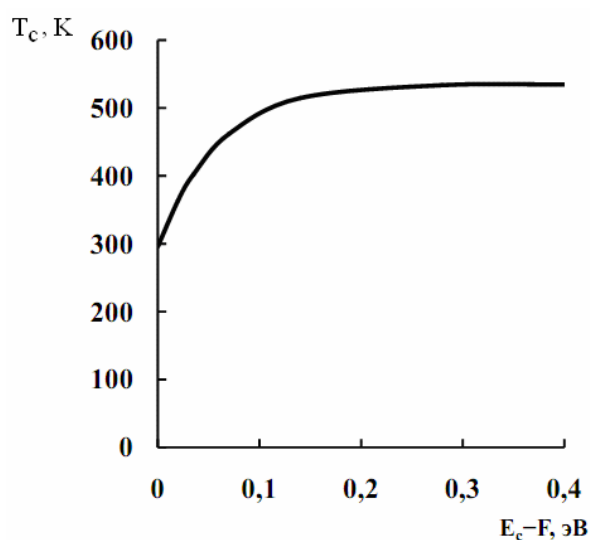


Рис. 6. Зависимость температуры T_c от положения уровня Ферми в запрещённой зоне

Заключение

Предложены формулы вероятности разделения пар Френкеля с учетом нейтрального и заряженного состояния пары. Нейтральные пары дают пренебрежимо малый вклад в вероятность разделения связанных пар Френкеля, в сравнении с заряженными парами. Рассчитана зависимость вероятности разделения от температуры и положения уровня Ферми в запрещенной зоне. Показано, что вероятность разделения пар Френкеля возрастает при снижении положения уровня Ферми, а также увеличении температуры.

Вероятность разделения нейтральной пары Френкеля не зависит от положения уровня Ферми. Температура T_c , при которой вероятности избежать аннигиляции для нейтрального и заряженного состояния разделенной пары Френкеля равны, зависит от положения уровня Ферми F в запрещенной зоне. При $T > T_c$ преобладает вероятность избежать аннигиляции для разделенной пары Френкеля в нейтральном состоянии, а при $T < T_c$ – в заряженном. Функция $T_c(E_c - F)$ возрастает от $T_c = 296,1$ К при $F = 0$ и выходит на постоянное значение $T_c = 533,7$ К при $F > 0,15$ эВ.

Библиографический список

1. Iles P.A. Evolution of space solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2001. V.68, I.1. P.1-13.
2. Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М: Наука, 1990. 216 с.
3. Кузнецов Н.В., Соловьев Г.Г. Радиационная стойкость кремния. М: Энергоатомиздат, 1989. 96 с.
4. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь. 1981. 248 с.
5. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М.: Мир, 1985. 304 с.
6. Богатов Н.М. Радиационные дефекты в кремнии, выращенном методом Чохральского // Поверхность. 1999. №3. С. 72 - 78.
7. Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория. М.: Мир, 1984. 264 с.
8. Ершов С.Н., Пантелеев В.А., Нагорных С.Н., Черняховский В.В. Энергия миграции собственных точечных дефектов в различном зарядовом состоянии в кремнии и германии // Физика твёрдого тела. 1977. Т. 19. В. 1. С. 322-323.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КВАЗИПОТЕНЦИАЛ И КВАНТОВОЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ

Бойкова Н.А., Бойкова О.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”, г. Саратов

Исследование спектров экзотических атомов является одной из областей, где фундаментальные и прикладные вопросы переплетаются чрезвычайно тесно [1, с. 9]. Применение лазерной физики холодных атомов [2, с. 10] к исследованию тонких эффектов взаимодействий в связанных состояниях частиц является экспериментальным стимулом повышения точности теоретических результатов [3, с. 15]. Теоретическое исследование спектров одиночных атомов с требуемой точностью может быть выполнено только на основе квантовой теории.

Одним из методов, применяемых для релятивистского описания связанных состояний в квантовой электродинамике, является квазипотенциальный подход А.А. Логунова и А.Н. Тавхелидзе [4, с. 19]. Квазипотенциальное уравнение для случая двух фермионов имеет вид [5, с. 14]

$$[(\widehat{G}_0^+)^{-1} - V] \varphi = 0, \quad (1)$$

где G_0 – функция Грина невзаимодействующих частиц, символы \widehat{G} и G^+ означают интегрирование по временным компонентам и проектирование на состояния с положительной энергией соответственно, V – квазипотенциал. В результате выполнения указанных операций для $(\widehat{G}_0^+)^{-1}$ получаем

$$(\widehat{G}_0^+)^{-1} = (2p)^3 F^{-1}(\vec{p}, \vec{q}), \quad F(\vec{p}, \vec{q}) = \delta(\vec{p}, \vec{q}) (E - e_{1p} - e_{2p})^{-1}, \quad \varepsilon_{ip} = \sqrt{\vec{p}^2 + m_i^2}, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Релятивистский квазипотенциал V определяется следующим выражением [6, с.7]

$$V(\vec{p}, \vec{q}, E) = F^{-1} - (\widehat{G}^+)^{-1}. \quad (3)$$

Выражение (3) является наиболее общим для квазипотенциала взаимодействия двух частиц.

Выделим кулоновское ядро (K_c) как основную часть квантовоэлектродинамического взаимодействия в двухчастичной системе.

$$K_c(\vec{p}, \vec{q}) = -\frac{e_1 e_2 \gamma_{10} \gamma_{20}}{(\vec{p} - \vec{q})^2}, \quad (4)$$

где γ_{i0} – матрицы Дирака. Тогда ядро однофотонного взаимодействия $K(\vec{p}, \vec{q})$ удобнее рассматривать в кулоновской калибровке и представить в виде

$$K = K_c + K_T, \quad K_T(k_0, \vec{k}) = -\frac{4\pi\alpha}{(k_0^2 + i\varepsilon - \vec{k}^2)} (\vec{\gamma}_1 \vec{\gamma}_2 - \frac{(\vec{z}_1 \vec{k})(\vec{z}_2 \vec{k})}{\vec{k}^2}). \quad (5)$$

Выполним разложение квазипотенциала в ряд, опираясь на уравнение Бете–Солпитера

$$V(\vec{p}, \vec{q}, E) = F^{-1} - \tau_0 + \tau_0 F \tau_0 + \dots, \quad (6)$$

где

$$\tau_0 = F^{-1} \overline{GTG}^+ F^{-1}, \quad T = K + KGK. \quad (7)$$

Ограничиваясь рассмотрением однофотонных и двухфотонных взаимодействий, для оператора τ_0 получаем

$$\tau_0 = (K_T)_{0F}^+ + (K_c G_0 K_T)_{0F}^+ + (K_T G_0 K_c)_{0F}^+ + (K_{cT})_{0F}^+ + (K_{Tc})_{0F}^+ + (K_T G_0 K_T)_{0F}^+ + (K_{TT})_{0F}^+, \quad (8)$$

где $(K_T)_{0F}^+ = F^{-1} \overline{G_0 K_T G_0}^+ F^{-1}$. Для квазипотенциала (6) с учетом итерации имеем

$$V^{(2)} = (K_T)_{0F}^+, \quad (9)$$

$$V^{(4)} = (K_c G_0 K_T)_{0F}^+ + (K_T G_0 K_c)_{0F}^+ - K_c^+ F (K_T)_{0F}^+ - (K_T)_{0F}^+ F K_c^+ + \\ + (K_{cT} + K_{Tc})_{0F}^+ + (K_{TT})_{0F}^+ + (K_T G_0 K_T)_{0F}^+ - (K_T)_{0F}^+ F (K_T)_{0F}^+$$

Соответствие каждой приводимой диаграмме итерационного члена улучшает ее поведение в инфракрасной области и является важной чертой квазипотенциала. Разности вкладов от приводимой диаграммы и ее итерации обеспечивают от квазипотенциала $V^{(4)}$ поправки к кулоновскому уровню энергии более высокого порядка по α . С увеличением числа обменов фотонами в высших порядках теории возмущений тенденция возрастания порядка по α от разности приводимых диаграмм и соответствующих итераций сохраняется.

Определение квазипотенциала (6) упрощается в результате выполнения интегрирования по нулевым компонентам импульсов. С помощью интегрального представления δ -функций Дирака оператор $\overline{G_0 T G_0}$ из выражения для τ_0 (7) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \overline{G_0 T G_0} = & -\frac{1}{(2p)^4} \int_{-\infty}^{\infty} dt \int_{-\infty}^{\infty} d\tau_0 \int_{-\infty}^{\infty} S_1(p_1) S_2(p_2) e^{ip_0 t} dp_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-k_0 t} dk_0 \otimes \\ & \otimes \int_{-\infty}^{\infty} e^{k_0 \tau} T(k_0, k_0', \vec{p}, \vec{q}, E) dk_0' \int_{-\infty}^{\infty} S_1(q_1) S_2(q_2) e^{iq_0 \tau} dq_0 \end{aligned} \quad (10)$$

Учтем выражения фермионных пропагаторов через проекционные операторы

$$S_1(E + p_0, \vec{p}) = \left(\frac{J_1^+(\vec{p})}{(E + p_0 - e_{1p} + ie)} + \frac{J_1^-(\vec{p})}{(E + p_0 - e_{1p} - ie)} \right) \gamma_{10}, \quad (11)$$

$$S_2(E - p_0, -\vec{p}) = \left(\frac{J_2^+(-\vec{p})}{(E - p_0 - e_{2p} + ie)} + \frac{J_2^-(-\vec{p})}{(E - p_0 - e_{2p} - ie)} \right) \gamma_{20}.$$

с помощью теории вычетов для оператора τ_0 можно получить

$$\begin{aligned} \tau_0 = & T_+(\vec{p}, \vec{q}, E) + \sum_{i,k=1}^2 (e_{ip} - E_i) \mathcal{D}T_{ik+}'''(\vec{p}, \vec{q}, E) (e_{kq} - E_k) + \\ & + \sum_{i=1}^2 (e_{ip} - E_i) \mathcal{D}T_{i+}'(\vec{p}, \vec{q}, E) + \sum_{i=1}^2 (e_{iq} - E) \mathcal{D}T_{i+}''(\vec{p}, \vec{q}, E_i) \end{aligned} \quad (12)$$

где $T_+(\vec{p}, \vec{q}, E) = u_1^*(\vec{p}) u_2^*(-\vec{p}) \gamma_{10} \gamma_{20} T(p_0 = 0, q_0 = 0, \vec{p}, \vec{q}, E) u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q})$.

Анализ показывает, что при исследовании уровней энергии двухчастичных изолированных атомов с точностью α^5 достаточно ограничиться первым членом суммы в выражении (12), то есть положить

$$\tau_0 \approx T_+(\vec{p}, \vec{q}, E). \quad (13)$$

В слабо связанных системах частицы находятся вблизи массовой поверхности. Поэтому при рассмотрении двухфотонных взаимодействий с точностью α^5 можно использовать приближение рассеяния и выполнить переход

$$T_+(\vec{p}, \vec{q}, E) \rightarrow T_+(0, 0, E). \quad (14)$$

В области больших виртуальных импульсов элементы амплитуды рассеяния могут быть приближенно отнесены к массовой поверхности, то есть вычислены при значениях $|\vec{p}| \approx |\vec{q}| \cong 0$, $E \cong m_1 + m_2$. Возникающие при этом инфракрасные особенности устраняются введением некоторого минимального виртуального импульса $k_{\min} \cong \varepsilon$. Конкретная величина ε несущественна, так как в сумме диаграмм инфракрасные расходимости компенсируются. При этом выполняется замена

$$T_+(0,0,E) \rightarrow T_0^+(0,0,m_1 + m_2). \quad (15)$$

В работах [7, с.12; 8, с.7] показано, что полное определение логарифмических поправок порядка $\alpha^6 \ln \alpha^{-1}$ в сверхтонкий сдвиг требует использования выражения для квазипотенциала (6) через амплитуду τ_0 .

Таким образом, для решения конкретных задач на связанные состояния применяются различные способы построения квазипотенциала. Их взаимосвязь выражается в последовательном использовании приближения для амплитуды и схематично может быть представлена в виде

$$\tau_0 \rightarrow T_+ \rightarrow T_+(0,0,E) \rightarrow T_+^0(0,0,m_1 + m_2). \quad (16)$$

Обратимся теперь к обмену одним поперечным фотоном. Соответствующее аналитическое выражение, опираясь на амплитуду T_+ , можно записать

$$\Delta E_T = \langle \varphi_c(\vec{p}) | (K_T(\vec{p}, \vec{q}, E))_+ | \varphi_c(\vec{q}) \rangle, \quad (17)$$

$$\Delta E_T = \langle \varphi_c | 4\bar{b}p \nu_c(\vec{p} - \vec{q}) u_1^*(\vec{p}) u_2^*(-\vec{p}) \{ \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 - \frac{(\bar{\sigma}_1(\vec{p} - \vec{q}))(\bar{\sigma}_2(\vec{p} - \vec{q}))}{(\vec{p} - \vec{q})^2} \} u_2(\vec{q}) u_2(-\vec{q}) | \varphi_c \rangle.$$

Выясним, в чем причина различия в результатах $\alpha^6 \ln \alpha$ на основе амплитуд T_+ и τ_0 . Из амплитуды T_+ для однофотонного поперечного обмена следует, что учет взаимодействия фермионов обеспечивает фактор

$$(K(\vec{p}, \vec{q}, E))_+ = \frac{4p\bar{b}}{|\vec{p} - \vec{q}|^2} M(\vec{p}, \vec{q}), \quad (18)$$

где $M(\vec{p}, \vec{q})$ – матричная часть оператора. Применение амплитуды τ_0 при учете взаимодействия приводит к следующему оператору

$$\begin{aligned} \overline{G_0 K_T G_0}(\vec{p}, \vec{q}, E) &= -\frac{1}{(2p)^2} \int_{-\infty}^{\infty} d\tau dt \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik(\phi-t)} dk' \int_{-\infty}^{\infty} S_1(p_1) S_2(p_2) e^{ip_0 t} dp_0 \\ &\int_{-\infty}^{\infty} K_T(k_0, k'_0, \vec{p}, \vec{q}) e^{-it(k_0 - k'_0)} dk_0 \int_{-\infty}^{\infty} S_1(q_1) S_2(q_2) e^{-iq_0 t} dq_0 \end{aligned} \quad (19)$$

При вычислении операторных блоков

$$S_{12}^{\pm} = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(p_1) S_2(p_2) e^{\pm ip_0 t} dp_0, \quad (20)$$

используем выражения (11)

$$\begin{aligned} S_{12}^{\pm} &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{J_1^+(\vec{p})}{(E_1 + p_0 - e_{1p} + ie)} + \frac{J_1^-(\vec{p})}{(E_1 + p_0 + e_{1p} - ie)} \right) \\ &\left(\frac{J_2^+(-\vec{p})}{(E_2 - p_0 - e_{2p} + ie)} + \frac{J_2^-(-\vec{p})}{(E_2 - p_0 + e_{2p} - ie)} \right) e^{\pm ip_0 t} dp_0 \end{aligned} \quad (21)$$

Затем, применяя теорию вычетов и выполняя проектирование на положительно–частотные состояния, получаем

$$\begin{aligned} (\overline{G_0 K_T G_0})_+ &= u_1^*(\vec{p}) u_2^*(-\vec{p}) \overline{G_0 K_T G_0}(\vec{p}, \vec{q}; E) e_{10} e_{20} u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q}), \\ (\overline{G_0 K_T G_0})_+ &= \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p} - \vec{q}|} F(\vec{p}) F(\vec{q}) B(\vec{p}, \vec{q}) M(\vec{p}, \vec{q}), \end{aligned} \quad (22)$$

где $M(\vec{p}, \vec{q}) = u_1^*(\vec{p}) u_2^*(-\vec{p}) (\alpha_1 \alpha_2 - \frac{(\alpha_1(\vec{p} - \vec{q}))(\alpha_2(\vec{p} - \vec{q}))}{(\vec{p} - \vec{q})^2}) u_1(\vec{q}) u_2(-\vec{q})$,

$$B(\vec{p}, \vec{q}) = \left(\frac{1}{(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q} + |\vec{p} - \vec{q}|)} + \frac{1}{(e_{1q} - E_1 - E_2 + e_{2p} + |\vec{p} - \vec{q}|)} \right).$$

Теперь запишем аналитические выражения для сдвигов ΔE_T^1 и ΔE_T^2 на основе операторов T_+ и τ_0 соответственно и сравним их.

$$\Delta E_T^1 = \langle \varphi_c(\vec{p}) | \frac{4p\delta}{(\vec{p} - \vec{q})^2} M(\vec{p}, \vec{q}) | \varphi_c(\vec{q}) \rangle, \quad (23)$$

$$\Delta E_T^2 = \langle \varphi_c(\vec{p}) | \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p} - \vec{q}|} B(\vec{p}, \vec{q}) M(\vec{p}, \vec{q}) | \varphi_c(\vec{q}) \rangle. \quad (24)$$

Как видно, если пренебречь членами $(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q})$ и $(e_{2p} - E_2 - E_1 + e_{1q})$, то получаем идентичные выражения для сдвига. Однако, именно эти члены учитывают эффект запаздывания при взаимодействии фермионов. Этот эффект не является столь сильным, чтобы оказать влияние на основной вклад порядка α^4 , но весьма существенен при исследовании логарифмических вкладов поряд-

ка $\alpha^6 \ln \alpha$. Он “отсутствует” при рассмотрении “мгновенного” кулоновского взаимодействия.

Учитывая, что за сверхтонкое взаимодействие ответственны спиновые моменты фермионов, выделим в матричной структуре $M(\vec{p}, \vec{q})$ члены M^{hfs} , пропорциональные произведению матриц Паули. Тогда аналитическое выражение ΔE_T^1 для энергетического сдвига от сверхтонкого расщепления принимает вид

$$\Delta E_T^{1hfs} = \frac{4}{3\pi^4} \bar{\sigma}^6 \mu^5 \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \int \frac{N_p d^3 p}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \int \frac{N_q d^3 q}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \frac{1}{(\vec{p} - \vec{q})^2} A(\vec{p}, \vec{q}), \quad (25)$$

где $N_p = \sqrt{\frac{M_{1p} M_{2p}}{4\varepsilon_{1p} \varepsilon_{2p}}}$,

$$A(\vec{p}, \vec{q}) = [(\vec{p} - \vec{q})^2 \left(\frac{1}{M_{1p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1q} M_{2p}} \right) - \frac{(p^2 - q^2)^2}{(e_{1p} + e_{1q})(e_{2p} + e_{2q})} \left(\frac{1}{M_{2p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1p} M_{1q}} + \frac{[\vec{p}\vec{q}]^2}{(\vec{p} - \vec{q})^2 M_{1p} M_{1q} M_{2p} M_{2q}} \right)]$$

Отметим, что в выражении (25) интегрирование по относительным энергиям не производится. Его особенностью является наличие вклада порядка α^4 , который содержится в первых двух членах и выделяется при заменах

$$N_p N_q \rightarrow 1, \quad \frac{1}{M_{1p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1q} M_{2p}} \rightarrow \frac{1}{2m_1 m_2}, \quad (26)$$

$$\Delta E_T^{1hfs}(\bar{\sigma}^4) = \frac{2}{3\pi^4} \frac{1}{m_1 m_2} \bar{\sigma}^6 \mu^5 \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_p d^3 p}{(p^2 + \bar{\sigma}^2 m^2)^2} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}^4 \mu^3}{m_1 m_2} \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle = E_F. \quad (27)$$

В выражении (25) присутствует логарифмический вклад $\alpha^6 \ln \bar{\sigma}$

$$\begin{aligned} \Delta E_T^{1hfs}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) &= \frac{2}{3\pi^4} \frac{\bar{\sigma}^6 \mu^5}{m_1 m_2} \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \int \frac{d^3 p}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \int \frac{N_p}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \left(\frac{1}{M_{1p}^2} + \frac{1}{M_{2p}^2} \right) \frac{p^2 q^2}{(\vec{p} - \vec{q})^2} d^3 q = \\ &= -\frac{4}{3\pi^2} \frac{\bar{\sigma}^6 \mu^5}{m_1 m_2} \langle \vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2 \rangle \int_0^{\infty} \frac{p dp}{(p^2 + \alpha^2 \mu^2)} \int_0^{\infty} \frac{q}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)} \left(\frac{1}{\varepsilon_{1p}^2} + \frac{1}{\varepsilon_{2p}^2} \right) \ln \frac{|p - q|}{(p + q)} dq \end{aligned} \quad (28)$$

Вычисления приводят к результату

$$\Delta E_T^{1hfs}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) = \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \left(\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1} \right) \ln \alpha^{-1}, \quad (29)$$

В отличие от выражения (23) исследование однофотонного взаимодействия на основе амплитуды τ_0 является более громоздким, но и более детальным, по-

звояющим учесть эффект запаздывания при взаимодействии фермионов. В результате вместо кулоновского потенциала v_c , соответствующему мгновенному взаимодействию, получаем операторное выражение

$$(K_T)_{OF} = \frac{2\pi\alpha}{|\vec{p}-\vec{q}|} \left(\frac{1}{(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q} + |\vec{p}-\vec{q}|)} + \frac{1}{(e_{1q} - E_1 - E_2 + e_{2p} + |\vec{p}-\vec{q}|)} \right) M(\vec{p}, \vec{q}), \quad (30)$$

содержащее более точную зависимость от импульсов. Выясним, какое влияние окажет учет эффекта запаздывания на вклады порядка $\alpha^6 \ln \alpha$. Для поправки к сверхтонкому сдвигу основного уровня двухчастичной системы из выражения ΔE_T^2 получаем

$$\begin{aligned} \Delta E_T^{2hfs} &= \Delta E_T(\bar{\sigma}^4) + \Delta E_T(\bar{\sigma}^5 \ln \bar{\sigma}) + \Delta E_T(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) = \\ &= \frac{2\bar{\sigma}^6 \mu^5 \langle \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 \rangle}{3\pi^4} \int \frac{N_p d^3 p}{(p^2 + \bar{\sigma}^2 m^2)^2} \int \frac{N_q}{(q^2 + \bar{\sigma}^2 m^2)^2} \frac{1}{|\vec{p}-\vec{q}|} \left(\frac{1}{(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q} + |\vec{p}-\vec{q}|)} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{(e_{1q} - E_1 - E_2 + e_{2p} + |\vec{p}-\vec{q}|)} \right) \{ (\vec{p}-\vec{q})^2 \left(\frac{1}{M_{1p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1q} M_{2p}} \right) - \frac{(p^2 - q^2)^2}{(e_{1p} + e_{1q})(e_{2p} + e_{2q})} \cdot \\ &\left(\frac{1}{M_{2p} M_{2q}} + \frac{1}{M_{1p} M_{1q}} + \frac{[\vec{p}-\vec{q}]^2}{(\vec{p}-\vec{q})^2 M_{1p} M_{1q} M_{2p} M_{2q}} \right) \} d^3 q \end{aligned} \quad (31)$$

При расчете этой величины с точностью $\alpha^6 \ln \alpha$ можно воспользоваться следующим приближением

$$\frac{1}{(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q} + |\vec{p}-\vec{q}|)} \cong \frac{1}{|\vec{p}-\vec{q}|} \left(1 - \frac{e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q}}{|\vec{p}-\vec{q}|} + \frac{(e_{1p} - E_1 - E_2 + e_{2q})^2}{|\vec{p}-\vec{q}|^2} \right). \quad (32)$$

Выделяя члены, ответственные за логарифмические вклады, имеем

$$\begin{aligned} \Delta E_T^{2hfs}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) &= \frac{1}{12\pi^4} \frac{1}{m_1 m_2} \bar{\sigma}^6 \mu^5 \langle \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 \rangle \int \frac{d^3 p}{\varepsilon_{2p} \varepsilon_{1p} (p^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \int \frac{1}{(q^2 + \alpha^2 \mu^2)^2} \\ &[1 + \frac{2(\varepsilon_{1p} - m_1)(\varepsilon_{2q} - m_2)}{(\vec{p}-\vec{q})^2}] \{ \frac{p^2 q^2}{(\vec{p}-\vec{q})^2} \left(\frac{M_{1q} + M_{1p}}{(\varepsilon_{2p} + \varepsilon_{2q})} + \frac{M_{2p} + M_{2q}}{(\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{1q})} \right) + 2M_{1p} M_{2q} \} d^3 q \end{aligned} \quad (33)$$

Анализ показывает, что первое слагаемое в фигурных скобках вносит вклады в сверхтонкое расщепление, начиная с членов порядка $\alpha^6 \ln \alpha$, а второе – с членов порядка α^4 . Отличие фактора $(e_{1p} - E_1 + e_{2q} - E_2 + |\vec{p}-\vec{q}|)$ от $|\vec{p}-\vec{q}|$ оказывается существенным для получения логарифмических поправок при наличии в выражении членов, обеспечивающих вклады порядка α^4 . Вклады $\alpha^6 \ln \alpha$ вносят

попарные произведения первых и вторых членов в квадратных и фигурных скобках.

$$\Delta E_T^{2hfs}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) = \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \left(\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_2}{m_1} + 2 \right) \ln \alpha^{-1}. \quad (34)$$

Итак, дополнительная поправка порядка $\alpha^6 \ln \alpha$ от учета эффекта запаздывания оказывается следующей

$$\Delta E_{add}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) = 2 \frac{\mu^2 \alpha^2}{m_1 m_2} E_F \ln \alpha^{-1}. \quad (35)$$

Численное значение поправки (35) для мюонного водорода составляет

$$\Delta E_{add}(\bar{\sigma}^6 \ln \bar{\sigma}) = 0,0038 \text{ мэВ}, \quad (36)$$

Сравним значение данной поправки с вкладами порядка α^6 к сверхтонкому расщеплению S состояний мюонного водорода. Поправка (36) оказывается почти в два раза больше вклада слабого взаимодействия [9, с.198], а также однопетлевой мюонной поляризации вакуума от однофотонного взаимодействия порядка α^6 и совпадает с вкладом адронной поляризации вакуума порядка α^6 [10, с.14], что указывает на необходимость ее учета при получении результата точности α^6 .

Библиографический список

1. Фритцш Х., УФН. 2009. 179. 4.
2. Колачевский Н.Н., УФН. 2008. 178. 11.
3. Каршенбойм С.Г., Колачевский Н.Н., Иванов В.Г., ЖЭТФ. 2006. 129, 3.
4. Logunov A.A., Tavkhelidze A.N., Nuovo cimento 1963. 29, 2.
5. Фаустов Р.Н., ФЭЧАЯ 1972. 3, 1.
6. Бойкова Н.А., Бойкова О.А., Тюхтяев Ю.Н., Известия Саратовского университета. 2011. 11, 1.
7. Бойкова Н.А., Тюхтяев Ю.Н., Фаустов Р.Н., Проблемы физики высоких энергий и квантовой теории поля 1983. 1.
8. Бойкова Н.А., Тюхтяев Ю.Н., Фаустов Р.Н., Сообщения ОИЯИ Р2–81–582, 1981.
9. Eides M., Grotch H., Shelyuto V.A., Phys. Rep. 2001. 342.
10. Мартыненко А.П., Фаустов Р.Н., ЖЭТФ. 2004. 125, 1.

ГАЛОГЕНСЕРЕБРЯНАЯ КЛИДОНОГРАФИЯ ВЕЕРООБРАЗНЫХ СТРИМЕРОВ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Бойченко А.П.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Регистрация газоразрядных процессов на галогенсеребряных (AgHal) фотоматериалах – клидонография, давно нашла применение в технике высоких напряжений [1], а также смежных с ней областях [2–4]. Недавно проведенные исследования физических процессов взаимодействия барьерного газового разряда (БГР) с AgHal-фотоматериалами показали их сильно нелинейную реакцию на такое воздействие, существенно зависящее не только от напряженности внешнего электрического поля, но и от моментов возникновения световых импульсов разряда на том или ином участке его изменения, а также периода следования световых вспышек [5, 6]. Кроме того, выявлена зависимость формирования газоразрядных изображений от химического состава обрабатываемых фотографических растворов [7] и веществ, блокирующих ионную проводимость фотоэмульсионных микрокристаллов (МК) AgHal [8]. Совокупность обнаруженных закономерностей позволила нам расширить возможности клидонографии и привлечь ее для фотографических исследований деталей структуры стримеров БГР, скользящих по поверхности диэлектрика. Исследования такого рода представляют большой научный и практический интерес в связи с быстротечностью процессов стримерообразования ($\leq 10^{-8}$ с) и невозможностью визуализации их мелких деталей фотоэлектрическими и электронно-оптическими средствами, т.к. в отличие от AgHal-фотоматериалов они не допускают на себя прямого воздействия разряда. Стримерная форма горения БГР встречается в ТВН при разрядном перекрытии между металлическими или хорошо проводящими электрический ток частями конструкций, находящихся под высоковольтным напряжением и разделенных как газовым (чаще воздушным) барьером, так

и твердым диэлектриком (например, полимерная изоляция металлической жилы высоковольтного кабеля). Стримерообразование наиболее вероятно в неоднородных электрических полях при импульсном напряжении длительностью $\gg 10^{-6}$ с или переменном с длительностью полупериода указанной величины. Обычно в ТВН для испытания изоляции используют переменное напряжение частотой 50 Гц, коммутационные и грозовые импульсы [9]. Коммутационные импульсы имеют длительность от $2,5 \cdot 10^{-3}$ до $7,5 \cdot 10^{-3}$ с, а грозовые – порядка $(5 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ с [9]. Как правило, такие импульсы формируют из радиоимпульсов переменного напряжения, амплитуда которого затухает по экспоненциальному закону.

Поэтому в настоящей работе для фотографических исследований структуры стримеров БГР и его возбуждения использовались радиоимпульсы с частотами заполнения 833 Гц и ~ 77 кГц. Длительность первого радиоимпульса составляла $\sim 1,3 \cdot 10^{-2}$ с, а его полупериод при указанной частоте – $\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ с, соответственно полупериод напряжения второго импульса имел значение $\sim 1,3 \cdot 10^{-5}$ с, а весь импульс длительность $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ с. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Здесь 1 – высоковольтный электрод Роговского диаметром $1,1 \cdot 10^{-2}$ м, выполненный из стали; 2 – такой же заземленный электрод Роговского из латуни диаметром $2,2 \cdot 10^{-2}$ м и полированной поверхностью; 3 – газоразрядная камера; 4 – полимерная подложка AgHal-фотоплёнки с ее фоточувствительным эмульсионным слоем 5; 6 – газоразрядный промежуток толщиной $5 \cdot 10^{-5}$ м; 7 – генератор высоковольтных импульсов; 8 – виртуальный осциллограф PCS500 фирмы «Velleman» с емкостным делителем напряжения 9 (описаны в [5]) и образцовым безиндукционным сопротивлением $R=0,82 \pm 0,03$ Ом – 10 для регистрации интегрального тока БГР.

В силу выявленных закономерностей воздействия БГР на AgHal-фотоматериалы и различия интенсивностей излучения разряда при его возбуждении радиоимпульсами различного частотного заполнения, для фотографической регистрации разрядных стримеров при напряжении частотой 833 Гц ис-

пользовалась фототехническая пленка ФТ-41П (производство ОАО «Гасма», г. Казань), а для фоторегистрации стримеров, возбуждаемых радиоимпульсами частотой 77 кГц – фотопленка PAN100 (фирма «ILFORD»).

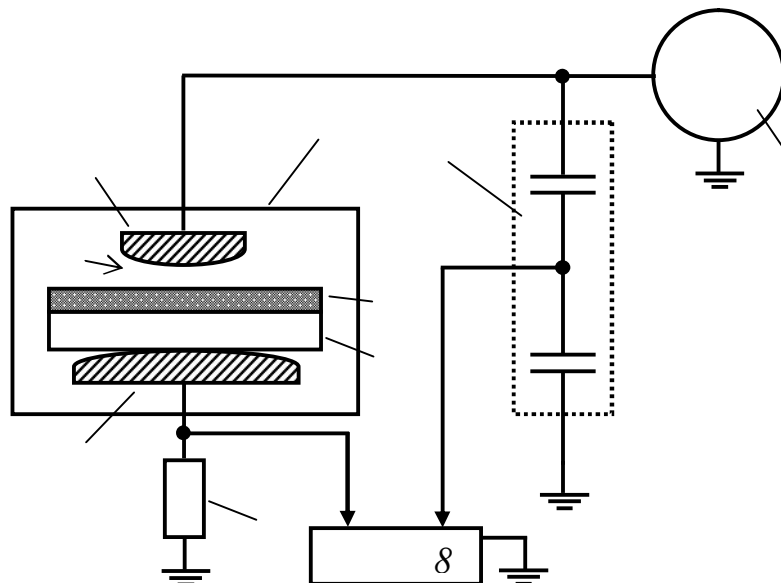


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для фотографирования и осциллографирования БГР (обозначения в тексте)

Газоразрядное экспонирование фотопленок в каждом варианте эксперимента проводилось в пятикратной повторности и осуществлялось при однократно прикладываемых радиоимпульсах. Разряд возбуждался в воздухе атмосферного давления с контролируруемыми термодинамическими параметрами и химическим составом. После газоразрядного экспонирования фотопленки обрабатывались в регламентируемых производителями фотографических растворах. Фотопленка PAN100 проявлялась в мелкозернистом проявителе D-76, а ФТ-41П – в контрастном проявителе ФТ-2. Полученные на них изображения исследовались визуально и под микроскопом с увеличением до 50 крат, а наиболее информативные снимки переводились в электронный вид с помощью стандартных оптико-цифровых средств. На рис. 2 и 3 представлены газоразрядные фотографии БГР с осциллограммами его напряжения и интегрального тока.

Рис. 2а отображает стримеры БГР (на периферии электрода) и его электронные лавины (центральная часть изображения), возбуждаемого радиоимпульсом напряжения $2,2 \cdot 10^4$ В и частотой заполнения 77 кГц, а на рис. 2б отражены осциллограммы напряжения зажигания (внизу) и интегрального тока (вверху) разряда. Изображению стримеров БГР на рис. 3а и 3б, возбуждаемого радиоимпульсом частотой заполнения 833 Гц, а также осциллограммам его напряжения и тока соответствует аналогичное описание.

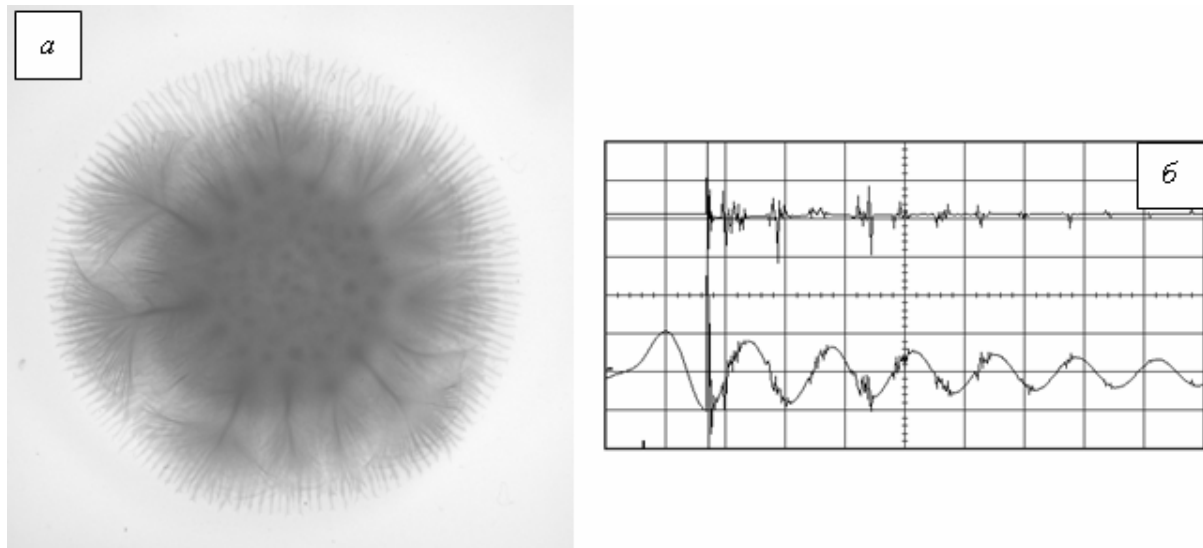


Рис. 2. Газоразрядная фотография стримеров БГР (негативное изображение), полученного при радиоимпульсе напряжения частотой заполнения 77 кГц (а) и соответствующая ему осциллограмма (б). Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения БГР (нижняя осциллограмма) – $1,1 \cdot 10^4$ В и для его интегрального тока (верхняя осциллограмма) – 1,83 А; одна клетка по оси абсцисс – 10^{-5} с (описание в тексте)

Сравнение изображений на рис. 2а и 3а позволяет сделать вывод о том, что по сравнению с переменным напряжением возбуждения разряда на частоте 833 Гц пробой газа (в нашем случае воздуха) в килогерцовой области облегчен и БГР формируется не только на периферии электрода Роговского, но и под ним, т.е. в узком промежутке микронной толщины, где форма поля близка к однородному. Этот факт подкрепляют осциллограммы напряжения и тока БГР.

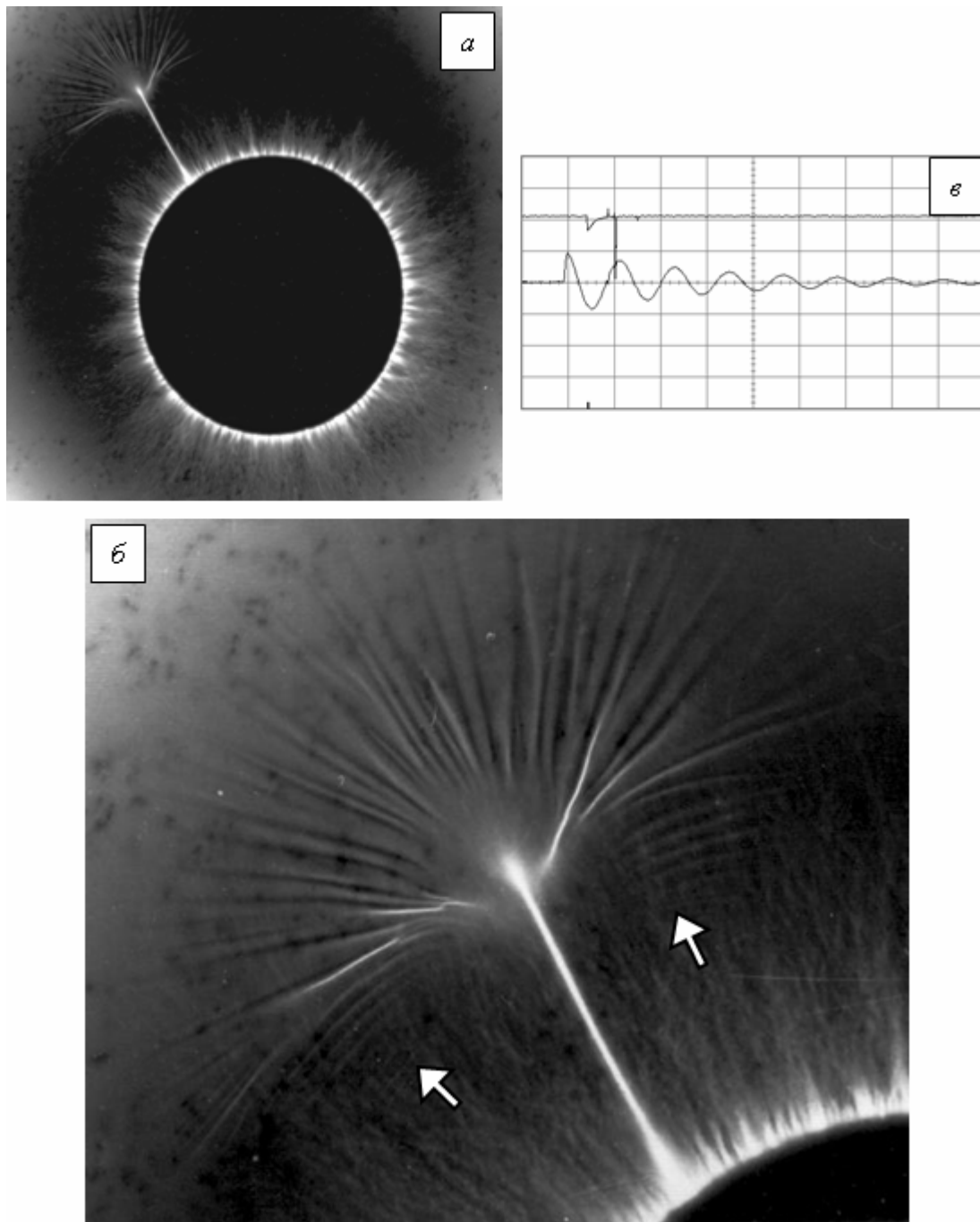


Рис. 3. Газоразрядная фотография стримеров БГР (а) и увеличенный ($\times 3,7$) фрагмент распадающегося (б) стримера (положительные изображения), полученного при радиоимпульсе напряжения частотой заполнения 833 Гц и соответствующая ему осциллограмма (в). Масштаб: одна клетка по оси ординат для напряжения БГР (нижняя осциллограмма) – $1,1 \cdot 10^4$ В и для его интегрального тока (верхняя осциллограмма) – 0,18 А; одна клетка по оси абсцисс – 10^{-3} с (описание в тексте)

В первом случае за один полупериод начала радиоимпульса создается в среднем 7–10 разрядных импульсов, количество которых по мере экспоненциального убывания амплитуды напряжения постепенно уменьшается (см. рис. 2б). При том же амплитудном значении напряжения во втором случае количество разрядных импульсов не превышает двух единиц. Описанные закономерности подтверждают экспериментальные результаты других исследователей [3, 10]. Однако, независимо от количества разрядов за полупериод напряжения, как в килогерцовой, так и герцовой области частот, веерообразные стримеры формируются в обоих случаях. При частоте 77 кГц их структура на изображениях не поддается детальному анализу из-за наложенных фигур Лихтенберга – стримеров разряда нитевидной формы, очевидно сформировавшихся на конце радиоимпульса напряжения. Поэтому исследование структуры веерообразных стримеров целесообразно вести при низкочастотном напряжении возбуждения БГР. Сказанное подтверждает увеличенный фрагмент такого стримера на рис. 3б.

На снимке четко зафиксирована его структура, по которой возможен анализ динамики формирования стримера. Начинаясь у высоковольтного электрода, стример имеет утолщенное основание, из которого выделяется яркосветящийся канал, по длине превышающий соседние стримеры, и заканчивающийся диффузно выраженной головкой той же яркости, окруженной радиально расположенными лучами. Важно отметить, что лучи начинаются на расстоянии, приблизительно равном диаметру головки, и не имеют точек пересечения между собой, что указывает на одноименный знак их электрического заряда. Зафиксированные AgHal-фотопленкой и представленные на заднем плане снимка «лепестки веера» (помечены стрелками на рис. 3б) свидетельствуют, что процесс распада стримера носит объемный характер. Этому процессу соответствует импульс тока разряда амплитудой 0,35 А, тогда как остальным стримерам нитевидной формы соответствует ток не превышающий $9 \cdot 10^{-2}$ А, что видно из верхней осциллограммы рис. 3в. Подчеркнем, что ток разряда указанной амплитуды

для веерообразного стримера возникал лишь на положительных полупериодах переменного напряжения. В противном случае стримеры не имели веерообразной структуры.

Обобщая результаты проведенных исследований можно сказать, что при определенной разработке и проведения масштабных фундаментальных исследований процессов взаимодействия БГР с различными AgHal-фотоматериалами, фотографический метод может существенно дополнить осциллографический и электронно-оптический не только в ТВН, но и различных технических и технологических приложениях физики плазмы, особенно в тех случаях, когда требуется непосредственное размещение регистрирующего устройства в зоне газоразрядных процессов. Как впервые показано в настоящей работе, фотографическим методом удастся визуализировать структурную неоднородность и детали стримеров, процесс формирования и распада которых подчинен определенным закономерностям, в частности, зависящим от полярности приложенного напряжения к газоразрядно-фотографической системе конденсатора.

Библиографический список

1. Бабиков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С. Техника высоких напряжений. М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 670 с.
2. Галактионов Б.В., Иванова Е.И., Сырников Ю.П. и др. Обнаружение металлических включений в картоне методом газоразрядной визуализации // Дефектоскопия. – 1987. – № 8. – С. 86–88.
3. Романий С.Ф., Черный З.Д. Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиана. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 144 с.
4. Бойченко А.П., Шустов М.А. Основы газоразрядной фотографии. Томск: Изд-во «СТТ», 2004. – 316 с.
5. Бойченко А.П., Хонякин С.В. Исследование влияния составляющих излучения барьерного разряда на формирование газоразрядных изображений // Науч-

ные итоги 2011 года: достижения, проекты, гипотезы: Матер. I Междунар. научно-практич. конфер. Ч. 2. (Новосибирск, 26 дек. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С. 39–43.

6. Бойченко А.П., Хонякин С.В. Формирование изображений скользящего искрового разряда на галогенсеребряных фотоматериалах различной светочувствительности // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: Матер. VII Студенческой Междунар. научно-практич. конф. (Новосибирск, 19 авг. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С. 156–160.

7. Бойченко А.П. Исследование влияния концентрации буры в проявителе D-76 на формирование газоразрядных изображений // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: Матер. VIII молодежной Междунар. научно-практич. конф. (Новосибирск, 6 дек. 2011 г.) – Новосибирск, 2011. – С.197–200.

8. Бойченко А.П. Воздействие барьерного разряда лавинной формы на галогенсеребряный фотоматериал при заблокированной ионной проводимости // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 4. – С. 525–529.

9. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь В.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах / Под общ. ред. В.П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

10. Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Горин Ю.В., Леонов П.В. К вопросу о числе разрядов за период в газовых включениях в диэлектрике // Acta technica ČSAV. – 1967, № 6. – С. 676–684.

**О НАБЛЮДЕНИЯХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-Р»
В АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
КУБАНСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

Иванов А.Л., Лысенко В.Е, Иванов В.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет»,
физико-технический факультет, кафедра оптоэлектроники, г. Краснодар

18 июля 2011 года, с космодрома Байконур стартовала ракета-носитель «Зенит-3М» и на целевую орбиту вышел спутник «Спектр-Р» – российская космическая обсерватория проекта «Радиоастрон».

В период с 2 февраля 2012 года по 31 мая 2012 года в астрофизической оптической обсерватории КубГУ были проведены позиционные наблюдения космического аппарата (КА) СПЕКТР-Р на оптико-электронном астрофизическом комплексе. Это была первая попытка для отработки методики наблюдения высокоэллиптических объектов (ВЭО) с удалением от наблюдателя на расстояние более 350 000 км. Традиционные методики наблюдения искусственных спутников Земли (ИСЗ) и геостационарных аппаратов (ГСС) оказались не применимы при выполнении высокоточных наблюдений ВЭО.

Методика наблюдения ГСС подразумевает точечное изображение объекта и штриховые, - вытянутые изображения звезд. Проведенный анализ данной методики показал большие невязки в определении координат КА (рис. 1).

Для решения задачи было решено применить модифицированный вариант наблюдения низких ИСЗ с той разницей, что выбиралась самая короткая экспозиция, при которой изображение КА оставалось еще точечным (рис. 2).

Экспериментальным путем были подобраны разные экспозиции в зависимости от удаления КА на орбите. ВЭО в разных точках орбиты имеют различную угловую скорость и блеск. Поэтому для каждого сета наблюдений были отработаны индивидуальные параметры съемки. Такая методика позволила выйти на невязки, которые определялись и зависели только от точности опор-

ного звездного каталога. В своей работе мы использовали астрометрические каталоги звезд - USNO-A2, USNO UCAC-2, USNO UCAC-3. Использование трех, а не одного каталога вызвано техническими сложностями при наблюдении КА.

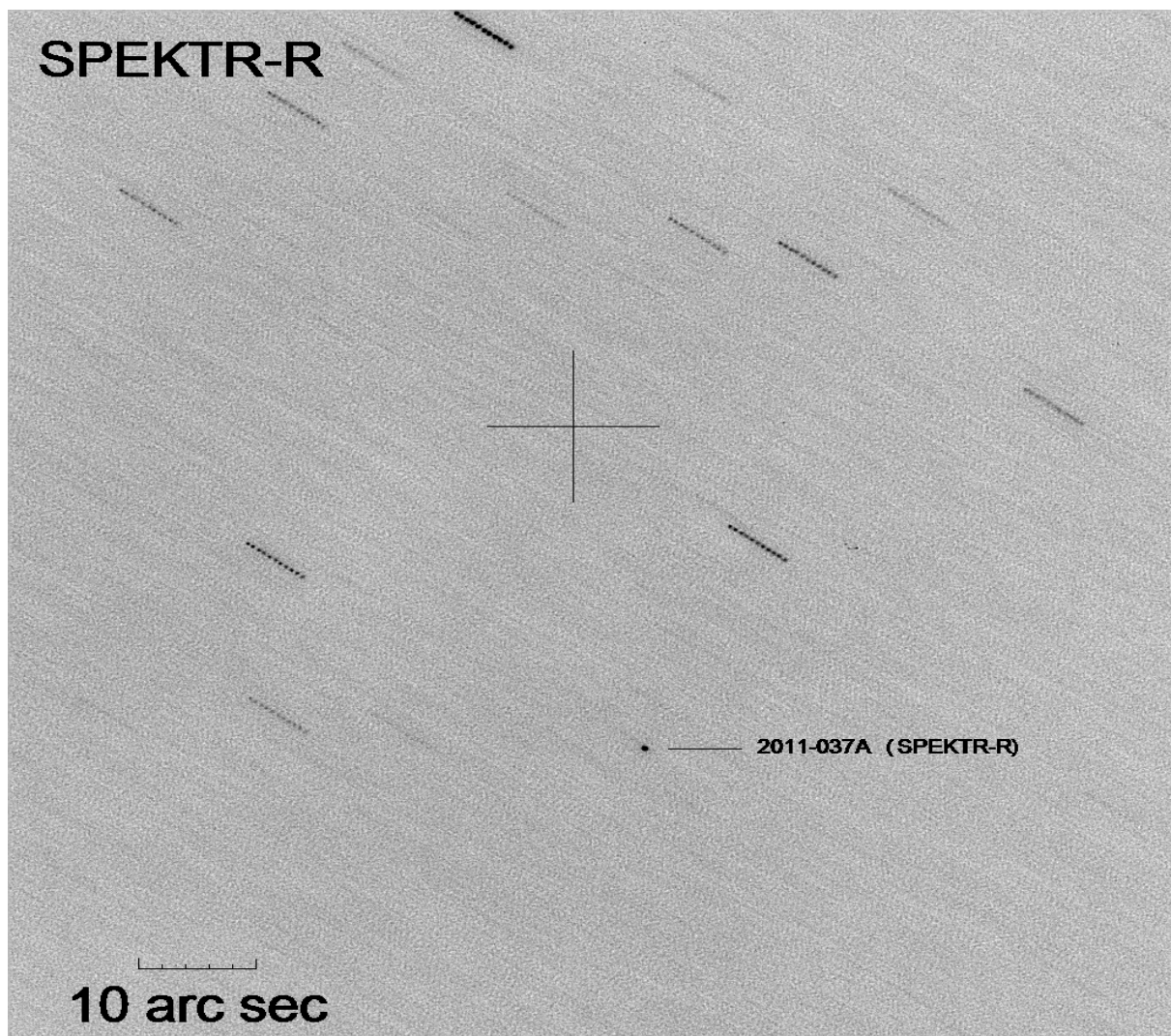


Рисунок 1 – Изображение КА полученное по методике наблюдения ГСС

Орбита КА СПЕКТР-Р смещается по небесной сфере в течение 7 дней, при этом происходит значительное изменение Склонения объекта от +75 до -15 градусов. Поэтому возникают ограничения по применению опорных каталогов, так каталог USNO UCAC-2 обладающий хорошей внутренней точностью имеет пробел в секторе от +45 до +90 градусов Склонения. Менее точный каталог USNO-A2 покрывает всю небесную сферу со Склонением от -90 до +90 градусов. Каталог USNO UCAC-3 обладает как высокой точностью, так и отсутствием пробелов на небесной сфере, однако он не встраивается в систему управле-

ния оптико-электронным комплексом и используется только на этапе окончательной обработки наблюдений.

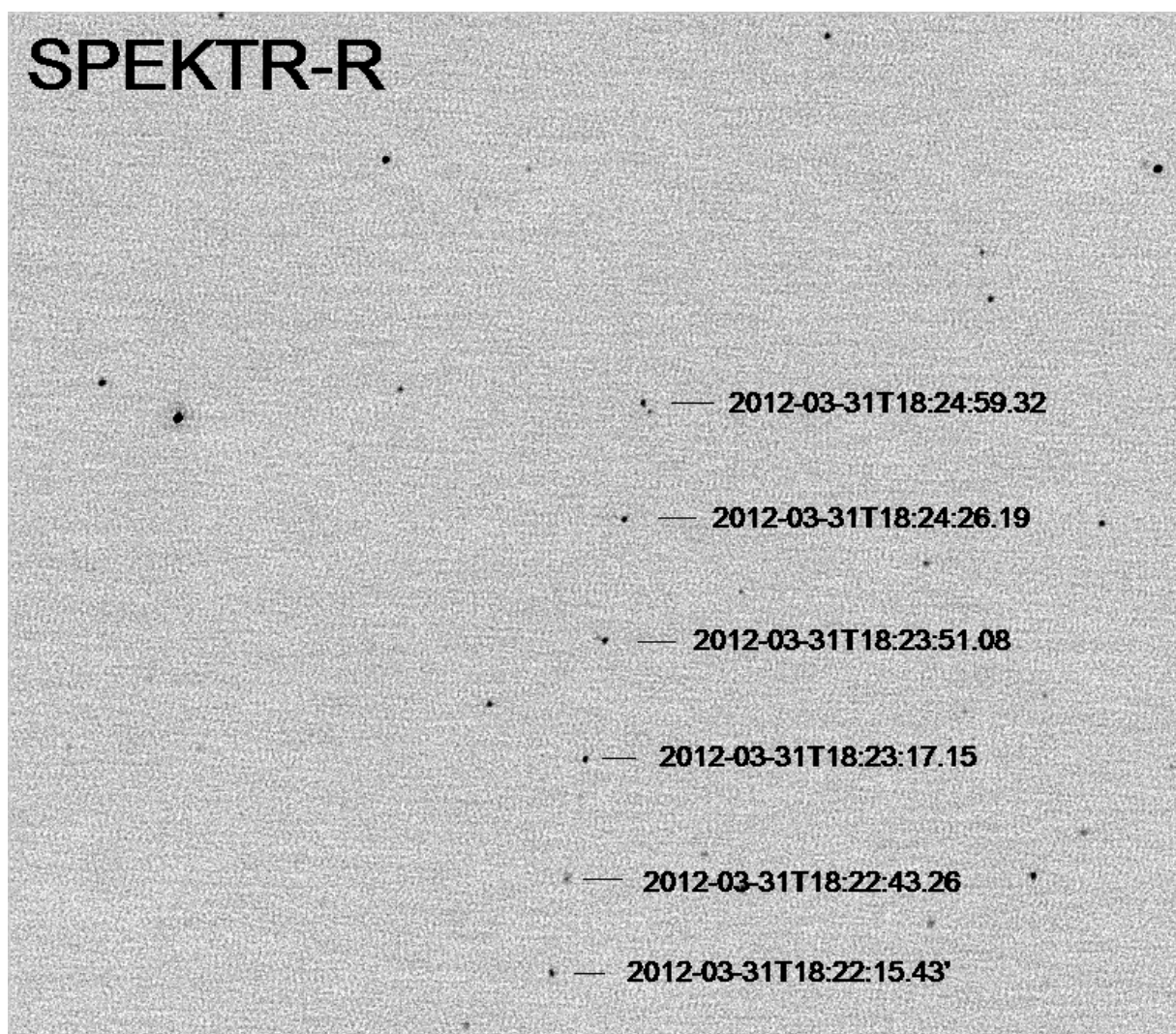


Рисунок 2 – Изображение, полученное с использованием методики предложенной КубГУ

Оптико-электронный комплекс астрофизической оптической обсерватории КубГУ изначально ориентировался, как многофункциональный инструмент способный решать задачи, как астрофизического направления, так и астрометрического. Он состоит из оптической трубы, системы Ричи-Кретьена, диаметром 0,51 метра; экваториальной платформы на базе монтировки «PARAMOUNT ME», ПЗС-камеры «FLI-8300»; службы времени с GPS-приемником и астрометеорологического комплекса. К его недостаткам можно отнести невоз-

возможность работы в секторе небесного меридиана в направлении Север-Юг. Это вызвано конструктивным решением - экваториальная платформа имеет немецкую модификацию и требует перекладки всего инструмента при подходе к меридиану - т.е. имеет «мертвую зону» при наблюдениях. В процессе наблюдений была отработана следующая методика:

1. Выход на точку захвата объекта по ЦУ.

В этом режиме комплекс центрируется по координатам объекта с опережением по времени в 2-3 минуты. За это время комплекс производит координатные вычисления и вносит поправку в точность наведения на цель.

2. Режим ожидания.

В режиме ожидания комплекс выдает в непрерывном режиме снимки, и оператор контролирует вход объекта в поле зрения системы. После появления объекта в поле зрения оптической системы начинается автоматическое сопровождение.

3. Режим автоматического сопровождения.

Комплекс в этот период производит серию снимков объекта, как правило, от 40 до 200, в зависимости от угловой скорости КА. После чего переходит к новой точке с опережением на несколько минут. Далее процесс повторяется.

4. Калибровочный режим.

После проводки объекта, которая длится от одного до нескольких часов, требуется произвести калибровку всех изображений с учетом плоского поля, темновых токов и шумов считывания. Как правило, это завершающий этап каждого наблюдения.

Учет плоского поля один из важнейших факторов при наблюдениях с цифровыми приемниками. При работе в городских условиях плоские поля различны от угла положения телескопа, высоты объекта над горизонтом и наземных факторов светового загрязнения. Так же вклад в плоское поле может внести Луна. Классический вариант получения плоского поля по сегментам утреннего и вечернего неба в нашем случае малопригоден. Поэтому был разработан

специальный метод получения плоского поля в промежутках между сериями изображений объекта. Снимается порядка 20-40 кадров участка неба в режиме смещения оптической системы. После чего в программе MaxIm DL производится создание мастер-флэтов в медианном сложении. При этом треки звезд исчезают, а остается только реальное плоское поле, которое и используется в дальнейшем для калибровки рабочего материала.

Получение темновых кадров и шумов считывания делается по завершении наблюдений в автоматическом режиме.

В процессе эксперимента удалось выяснить и другие факторы, значительно влияющие на результат наблюдений и дальнейшей обработки полученного материала.

В процессе работы нами были использованы программы для обработки позиционных наблюдений: Astrometrica (Herbert Raab), MaxIm DL (Doug George), IZMCCD (И. Измайлов). В процессе испытания было установлено, что программы имеют ряд особенностей при редукции изображений, полученных с короткими экспозициями, менее 4 секунд времени.

Astrometrica (Herbert Raab) - может использовать при работе все современные звездные каталоги, но при работе с рабочим полем менее 20x20 угловых минут редукция невозможна, либо имеет низкую точность. Это в первую очередь связано с внутренними настройками программы и ее особенностями по реализации отношения Сигнал/Шум. К сожалению пороговые значения при автоматической редукции кадра на сумму кадров с низким значением С/Н вносит значительные ошибки, порой достигающие 1-3 угловых секунд.

MaxIm DL (Doug George) - имеет ограниченный пакет звездных каталогов, что снижает ее эффективность при работе в зонах небесной сферы, где опорных звезд меньше 30 на кадр. Как указывалось выше, только каталог USNO UCAC-3 обладает хорошей точностью и полнотой заполнения по всей небесной сфере. К сожалению разработчики данного программного продукта в нашей версии не смогли реализовать подключения каталога USNO UCAC-3.

IZMCCD (И. Измайлов) - программа работает с различными полями, имеет полный пакет подключения звездных каталогов, ведется учет пошаговых измерений. Исходя из этого, в окончательном варианте мы остановились на российской программе IZMCCD созданной в Пулковской обсерватории ГАО РАН. Данная программа обладает высокой внутренней точностью и возможностью обработки больших массивов в полуавтоматическом режиме. Но самым главным преимуществом является полный контроль измерений на всем процессе работы. Оператор на каждом шаге выполняемых измерений, может корректировать результат и производить исправления, чего нельзя сделать в других программах.

Учитывая конструктивные, программно-аппаратные особенности комплекса наблюдения КА проводились по целеуказаниям (ЦУ) поступающим из отдела баллистики Института прикладной математики им. Келдыша (ОБ ИПМ).

Результаты наблюдений оперативно передавались в ОБ ИПМ, где проводилась дальнейшая обработка результатов наблюдений, уточнение невязок и дальнейшая корректировка вновь выдаваемых ЦУ. Таким образом, наблюдатели и обработчик наблюдений могли в процессе работы выявлять и корректировать ошибки, улучшая методику измерений и наблюдений, что, в конечном счете, привело к получению отличных результатов.

За время работы коллектив астрофизической оптической обсерватории отнаблюдал 79 часов чистого наблюдательного времени, получил 37122 положения КА, по которым выполнено 5141 измерение, средняя невязка наблюдений составила (+/-) 0",5. Данные наблюдений направлялись в полном объеме в отдел баллистики ИПМ им. Келдыша, а так же, усеченный вариант, направлялся в международный центр MPC DASO.

РОСТ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА БАРИЯ

Исаев В.А., Игнатъев Б.В., Лебедев А.В., Плаутский П.Г.,
Гаврилюк С.Ю., Головащенко С.С.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Введение

Кристаллы вольфрамата бария используются в качестве активной среды для ВКР-преобразователей лазерного излучения, которые нашли свое применение в устройствах оптической связи, медицины, космических технологий [1]. Однако их получение требует поддержания высоких температурных градиентов на границе кристалл-расплав (порядка 100 °С/см), обеспечивающих устойчивый рост и, вместе с тем, минимальных – в зоне растущего кристалла (не более 10 °С/см), для предотвращения его разрушения.

1. Рост монокристаллов вольфрамата бария

Кристаллы вольфраматов стронция и бария со структурой шеелита находят широкое применение в качестве нелинейно-оптических и лазерных сред. Однако возникающие при выращивании монокристаллооптическая неоднородность и механические напряжения, ведущие к растрескиванию, как известно, связаны с температурными градиентами в зоне роста и условиями после ростового отжига. Метод Чохральского (и его модификации) позволяет тонко контролировать условия роста кристалла (поддерживать заданный диаметр, скорость кристаллизации слитка, формировать требуемое тепловое поле в зоне роста) и является наиболее приемлемым в силу вышеуказанных особенностей выращивания молибдатов и вольфраматов щелочноземельных металлов.

Исходные реактивы SrCO_3 , WO_3 , Nd_2O_3 , Nb_2O_5 квалификации ОСЧ подвергались предварительной сушке при 350 °С в течение 5 часов, затем навешивались в заданных пропорциях (составы приведены в таблице 1) и перемалыва-

лись в шаровой мельнице 24 часа. Для компенсации испарения оксида вольфрама в шихту добавлялся избыток WO_3 в количестве 1 вес.%. Далее гомогенизированная смесь синтезировалась в платиновом тигле при температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 часов, в печи сопротивления. Кристаллы выращивались методом Чохральского из платиновых тиглей в воздушной атмосфере. Скорость вытягивания составляла 3 мм/ч, скорость вращения штока – 40 мин^{-1} . Над тиглем устанавливался платиновый нагреватель сопротивления (детальное описание конструкции теплового узла изложено в [2]). Выращивание производилось на заправки, вырезанные из номинально чистых кристаллов в направлении $[100]$. По окончании процедуры роста, производился отрыв кристалла от расплава, отжиг в течение 2 часов и охлаждение до комнатной температуры со скоростью $150\text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$.

Полученные кристаллы были высокого оптического качества, без видимых включений и механических дефектов (рис.1).

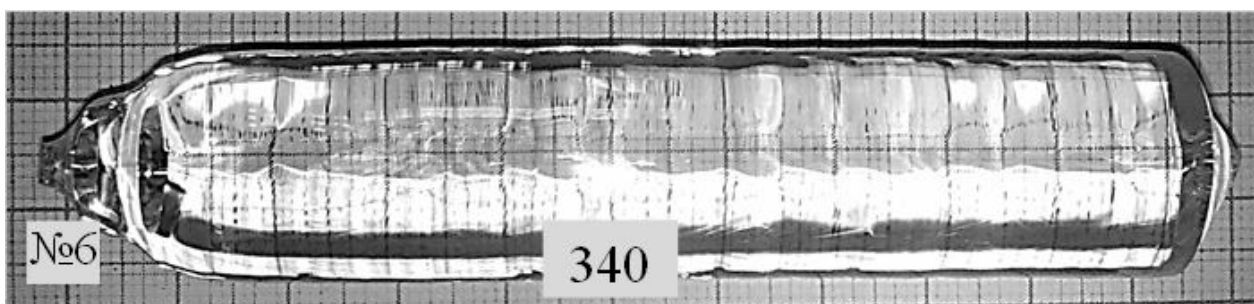


Рис.1. Один из кристаллов вольфраматов бария, выращенных модифицированным методом Чохральского

2. Измерение оптических характеристик монокристаллов вольфрамата бария

Для оптических измерений из цилиндрической части полученных кристаллов изготавливались плоскопараллельные пластины, толщиной 3 мм, с полированными поверхностями, ориентированные параллельно плоскости (100) .

Наиболее эффективным методом контроля качества лазерных кристаллов является определение искажений волнового фронта, прошедшего через исследуемый кристалл. Эти искажения зависят как от функции распределения показателя преломления в кристалле (неоднородности материала), так и от качества изготовления торцов и их параллельности.

Интерферометрический метод основан на сравнении двух пространственно-разнесенных лучей: прошедшего кристалл, искаженного фронта волны (сигнального) и плоского (опорного) [3]. Одна из схем стенда измерения неоднородности распределения показателя преломления в лазерных кристаллах представляет собой интерферометр Маха-Цандера (Mach-Zehnderinterferometer). Неоднородности кристалла приводят к разности оптических путей. По величине смещения полосы от прямолинейности можно судить о величине изменения оптической длины пути:

$$\Delta n_{ij} = m_{ij} \lambda / L, \quad (1)$$

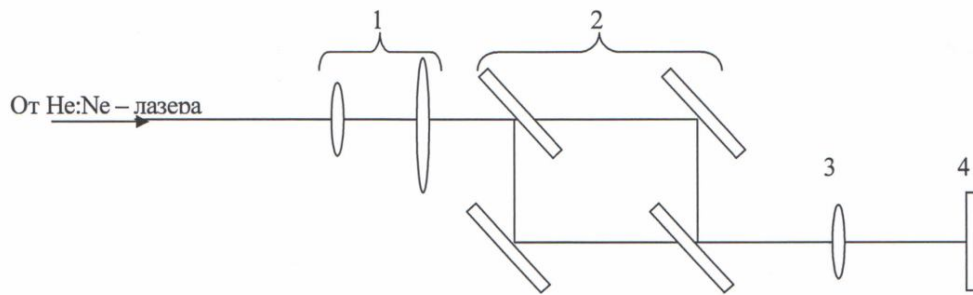
где Δn_{ij} – изменение показателя преломления; m_{ij} – величина смещения от прямолинейности в числе полос; L – длина кристалла в mm.

Метод измерения лазерной прочности прозрачных твердотельных оптических материалов заключается [4,5] в определении максимально допустимой плотности мощности (энергии) лазерного излучения, при которой не происходит повреждение поверхности.

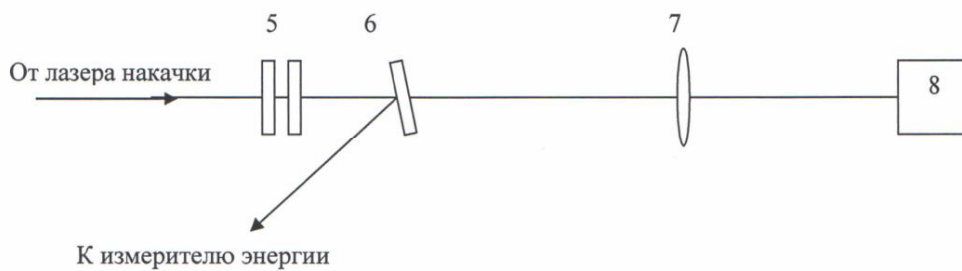
Метод измерения лазерной стойкости заключается в определении максимального количества импульсов лазерного излучения, которое выдерживает оптический материал до достижения повреждения поверхности при заданной плотности мощности (энергии) лазерного излучения.

Измерения проводят на стенде для измерений лучевой стойкости прозрачных твердотельных оптических материалов (рис.2)

Стенд по измерению оптической однородности монокристаллов



Стенд по измерению лучевой стойкости прозрачных твердотельных оптических материалов



Стенд по измерению коэффициента ВКР усиления прозрачных твердотельных оптических материалов

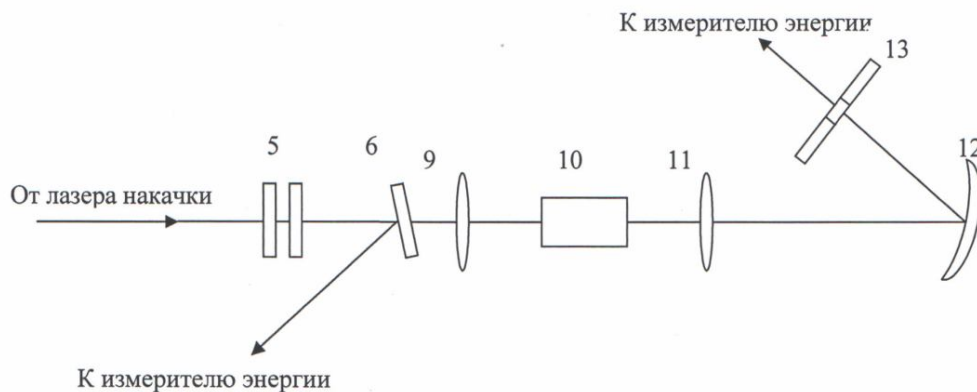


Рис.2. Стенды для измерения оптической однородности, лучевой стойкости и коэффициента ВКР усиления оптических материалов

1 – телескоп; 2 – интерферометр Маха-Цендера; 3 – объектив; 4 – экран; 5 – набор светофильтров; 6 – тонкая пластина; 7 – линза; 8 – исследуемый образец; 9 – линза резонатора; 10 – исследуемый образец; 11 – линза резонатора; 12 – решетка фокусирующая; 13 – диафрагма

За критерий повреждения принимают появление искры высокотемпературного свечения или необратимых изменений поверхности образца, наблюдаемые невооруженным глазом, как показано на рис. 2.

Повреждения полированной поверхности лучше наблюдать на фоне отражения от поверхности исследуемого образца экрана черного или белого цвета в зависимости от освещенности. Лучевая стойкость вольфрамата бария на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм оказалась равной $2267,62 \text{ МВт/см}^2$.

Также разрушение образца определяют по резкому увеличению рассеяния излучения He:Ne лазера на поврежденной поверхности.

Измерения коэффициента ВКР усиления прозрачных твердотельных оптических материалов проводят на стенде, схема оптическая принципиальная которого представлена на рис. 2.

Поворотом первого по ходу луча поляризатора 4(1) увеличивают значение энергии лазера накачки с шагом $\sim 10\%$ до возникновения ВКР – генерации. До момента появления ВКР – генерации проводят не менее 10 измерений. Далее, повышая значение энергии лазера накачки с шагом $\sim 10\%$, проводят еще 10 измерений. При этом плотность мощности излучения накачки должна оставаться ниже порога лучевой стойкости.

ВКР усиление в образце описывается следующим соотношением (2)

$$W_c(l) = W_c(0) \cdot \exp(G \cdot W_n^{nop} \cdot l) \quad (2)$$

где: $W_c(l)$ – плотность мощности стоксова излучения на выходе образца;

$W_c(0)$ – плотность мощности стоксова излучения на входе образца (при отсутствии входного сигнала – плотность мощности спонтанного шума в кристалле на стоксовой длине волны);

W_n^{nop} – пороговая плотность мощности на длине волны накачки;

G – коэффициент ВКР усиления

l – длина ВКР кристалла

Известно [1], что значение инкремента $(G \cdot W_n^{nop} \cdot l)$, необходимое для достижения порога ВКР генерации в вольфраматах, принимают порядка 30.

Методики теоретической оценки этой величины, связанной с материальными характеристиками вольфраматов, определяющими плотность мощности спонтанного шума в кристалле на стоксовой длине волны, приводятся в работах [1,3].

Отсюда значение коэффициента ВКР усиления G может быть вычислено по формуле 3:

$$G = \frac{30}{W_n^{nop} \cdot l}, \quad (3)$$

Измерения и расчеты показали, что коэффициент ВКР усиления оказался равным 7,7 см/ГВт.

Заключение

В настоящей работе предложена модификация метода Чохральского роста кристаллов, заключающаяся в использовании дополнительного омического нагревателя в зоне растущего кристалла и методика выбора режима его работы. С использованием этого метода выращены крупные кристаллы вольфрамата бария длиной до 110 мм и диаметром 20 мм высокого оптического качества. Коэффициент поглощения в области 1 – 3,7 мкм оказался менее $0,1 \text{ см}^{-1}$, градиент показателя преломления менее $1 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$. Из полученных кристаллов были изготовлены активные элементы длиной 65 мм и диаметром 5 мм для проведения испытаний на лучевую стойкость и определения коэффициента ВКР усиления на длине волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$. Они оказались равными соответственно $2267,62 \text{ МВт/см}^2$ и 7,7 см/ГВт.

Работа выполнена на базе кафедры физики и информационных систем и НОЦ «Технологии материалов квантовой и оптической электроники» при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012

годы» Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.513.11.3080).

Библиографический список

1. Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И., Осико В.В., Космына М.Б., Комарь В.К., Шульц Я., Елинкова Х. Генерационные свойства ВКР-активных кристаллов молибдатов и вольфраматов, активированных ионами Nd^{3+} при селективной оптической накачке // Квантовая электроника. 2006. т. 36. № 8. с. 720-726.
2. Исаев В.А., Игнатъев Б.В., Лебедев А. В., Плаутский П. Г., Аванесов С.А. Теплофизические особенности роста крупных монокристаллов вольфрамата бария для ВКР-преобразования лазерного излучения//Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2012, № 2, с. 3 – 9
3. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. Лазеры на кристаллах и их применение //Москва. Рикел. Радио и связь. 1994. 312 с.
4. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение //Ленинград. Машиностроение. 1976, 296 с.
5. Оптический производственный контроль. Под редакцией Д. Малакары //Москва. Машиностроение. 1985, 400 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АССИМЕТРИЧНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В АККУМУЛЯТОРАХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯЧЕЙКАХ

Козбаев К.К., Коржова Е. С., Лопатин Д. С., Баранов О. А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Реализована принципиально новая система интеллектуального менеджмента батарей. Микроконтроллер совместно с силовым блоком с помощью адаптивного алгоритма с элементами искусственного интеллекта управляет процессом зарядки, диагностики и "лечения" аккумуляторов.

Ключевая особенность предложенной технологии заключается в особых режимах и алгоритмах заряда и разряда, учитывающие текущее электрохимическое состояние аккумуляторных батарей и процессы, происходящие в них, такие например как избыточная сульфатация и переплюсовка. Свинцово-кислотный аккумулятор является полностью обратимым электрохимическим устройством. На практике срок работы аккумулятора редко превышает три года.

В процессе исследования прохождения переменного тока до 50 кГц в электролитах найдены определенные участки с наименьшим импедансом (рисунки 1, 2). При этом при увеличении концентрации растворимого вещества средняя частота резонансных сольватированных ионов растет (рисунок 1), что связано с уменьшением масс сольватированных ионов, обусловленного значительным уменьшением увлекаемых ими молекул электролита и снижением величины среднего ионного коэффициента активности. Для измерения использовался импеданс-метр ВМ-507.

В дальнейшем разрабатывался компактный импеданс-метр по схеме автобалансирующего моста (рисунок 4).

Для интерпретации сигналов АЦП и ЦАП был использован микроконтроллер с ФАПЧ Atiny45, замеряющей с промежутком в 120 секунд импеданс электролита, в данном случае электролит свинцового автомобильного

аккумулятора, изменяющий частоту импульсов в зависимости от изменения температуры и концентрации. При этом было замечено, что чем меньше фронт импульса, тем лучше накапливается заряд на пластинах аккумулятора. В силовую часть цепи были поставлены IGBT-транзисторы IRGB20B60P, обеспечившие фронт-спад 5/6 нс. Предварительные испытания измерения емкости по методу контрольной нагрузки показали набор 98 % от номинальной емкости аккумулятора в 1.8 раза быстрее контрольной зарядки постоянным током.

Далее исследовался импульсный однополярный ток на найденной резонансной частоте. Подавались импульсы максимальной амплитудой 100 В (средняя амплитуда 14 В), частотой 3.5 кГц, средней питаемой мощностью 15 Вт. Для контроля использовалась такая же мощность постоянного тока 14 В, ограниченного реостатом.

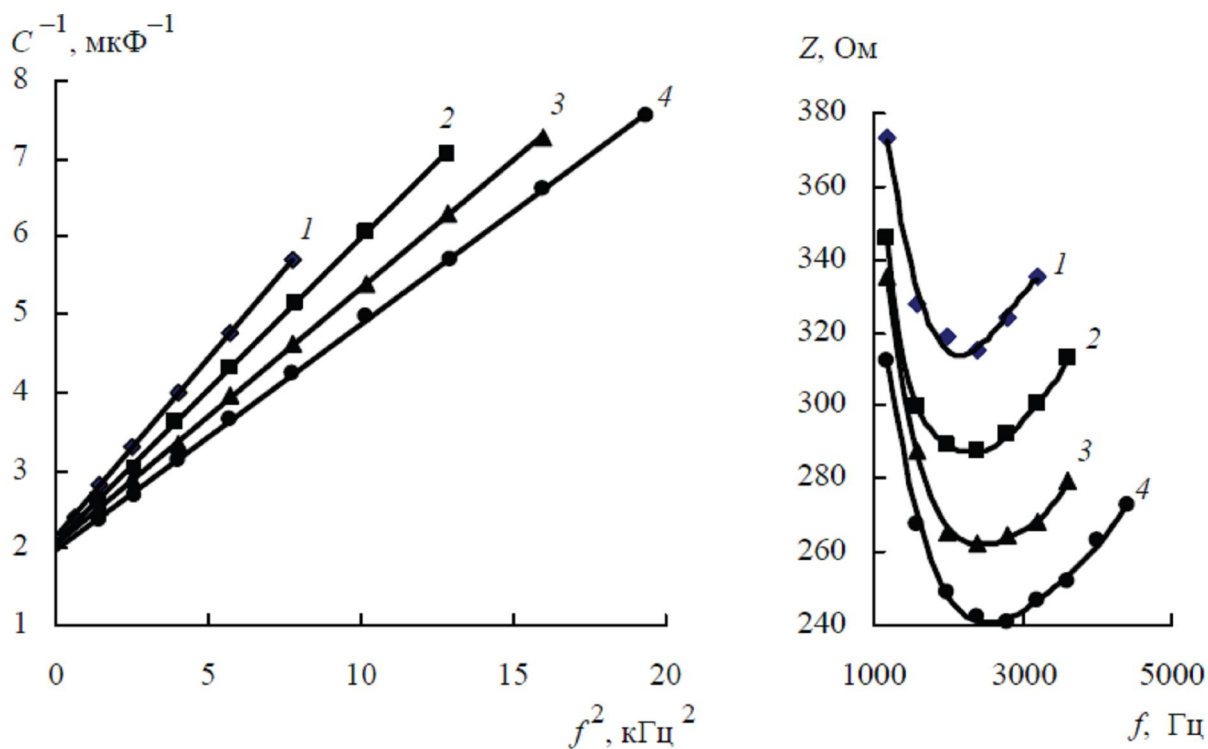


Рис 1. Зависимость C^{-1} от f^2 для 0,1 m раствора $LiFP_6$ (а)
и импеданса от частоты (б) при t , °C:

1 – 25; 2 – 30; 3 – 35; 4 – 40

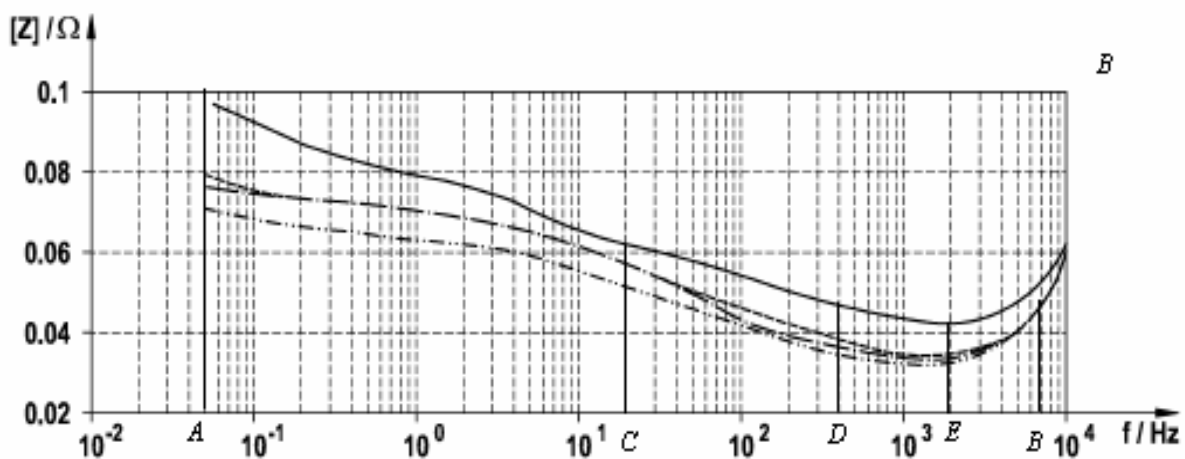


Рис 2. Измерение импеданса аккумулятора в зависимости от частоты

Поскольку с изменением концентрации раствора в процессе зарядки резонансная частота изменяется, для ее подстройки был разработан и изготовлен генератор пачек импульсов с фазовой автоподстройкой частоты на основе микросхемы НСF4046, позволяющий настраивать выходную частоту колебаний в соответствии с резонансной частотой гидратированных ионов и LC-контура, в которой C – динамическая емкость электролитической ячейки. Использование схемы с фиксировано частотой на основе микросхемы cd4538 показало низкие результаты и трудность настройки в резонанс, а также уход частоты при использовании другого электролита.

Далее подобная методика испытывалась на литий-кобальтовых аккумуляторах, импульсы шириной в 0.5 мкс и частотой 12 кГц, амплитудой до 0,3 кВ. При этом измерялось средняя мощность, потребляемая зарядным устройством, и средняя мощность (заряд), идущий от разряжаемого аккумулятора на нагрузку.

На контрольном аккумуляторе было потребление 14,5 В, ток 300 мА, на импульсном зарядном устройстве питание 36 В, 86 мА, осциллограмма импульсов приведена на рисунке 8. Общий нагрев аккумулятора при использовании постоянного тока составил 5,61 градусов, при использовании импульсного заряда 1,85 градуса. Измерения проводились прецизионным термистором.

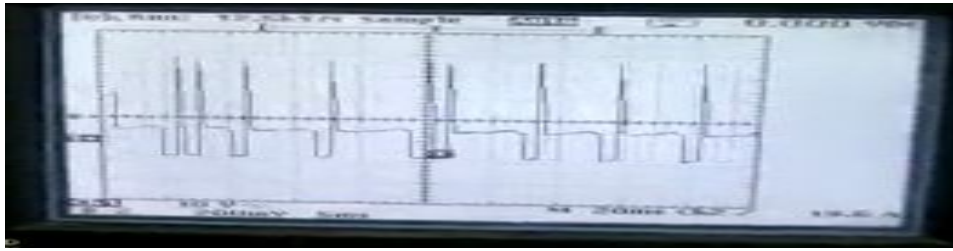


Рис 3. Осциллограммы импульсов, подаваемых на аккумулятор

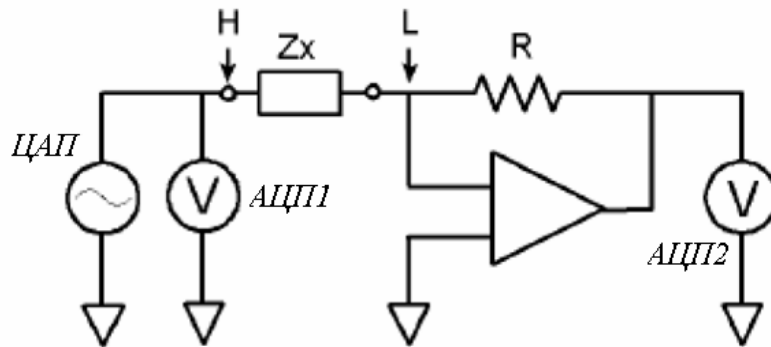


Рисунок 4. Измеритель импеданса на основе автобалансирующего моста



Рисунок 5. Система импульсного заряда для использования в системах резервного электроснабжения

Результаты показали снижение внутреннего сопротивления аккумуляторов в 1,9 – 2,6 раза. Снижение тепловых потерь говорит об увеличении КПД заряда. Разрабатывается схема импульсного питания

мощностью от 400 до 800 Вт. Для этого используются катушки на основе нанокристаллического материала Magnetec и быстрые диоды HEXFRED с временем релаксации порядка 28 нс. Планируется провести исследования срока службы аккумуляторов при использовании импульсной зарядки.

Технологии производства фотоэлектрических ячеек.

Сходная методика используется для создания слоистых покрытий фотоэлектрических ячеек. По структуре данные системы похожи на фотоэлектрические ячейки Гратцеля [4] на основе распределенного гетероперехода оксид титана - краситель.

Низкая стоимость оксида титана, но в то же время и высокая стоимость красителей и прозрачных покрытий не способствуют распространению данного типа батарей. Оксид титана и олова - халькогениды металлов и широкозонные полупроводники, но с низкими собственными фотоэлектрическими качествами - фоточувствительностью и фотопроводимостью. Известны халькогениды с более высокими фотоэлектрическими качествами - сульфид свинца и сульфид кадмия. Данные материалы используются в приборах ночного видения и ИК-детекторах. Рассмотрим гетеро-переход PbS - анилин, по отношению к анилину сульфид свинца будет полупроводникам n-типа

Предлагаемая технология нанесения нанопокровтий различных суспензий (органических полимеров, CIGS чернил) основана на методе диспергирования жидкостей в импульсном электрическом поле напряженностью более 4 кВ/см, частотой от 500 Гц до 14 МГц, шириной импульса от 30 нс до 10 мкс, представляет собой слабый тлеющий разряд различной интенсивности. Регулируя частотные и амплитудные параметры тлеющего разряда, можно регулировать размер частиц и толщину покрытий. Данная методика позволяет наносить покрытия на непроводящие объекты (стекло, пластик). Методика обладает более низкой точностью по сравнению с вакуумным напылением (около 0,5 мм)

Способ получения покрытий и монодисперсных наноразмерных порошков веществ, заключается в диспергировании жидкостей с эмиттера при импульсном электрическом потенциале относительно коллектора, отличающийся тем, что диспергируемые вещества переводят в жидкое состояние путем их нагревания в температурном интервале, большем, чем температура их плавления, и меньшем, чем температура их кипения, или путем их растворения в соответствующих растворителях, затем полученные жидкости диспергируют с эмиттера при соответствующих потенциалах в инертной либо активной среде газа или жидкости с температурой, меньшей или большей в случае диспергирования растворов веществ, чем температура дисперсного потока, которую перемещают навстречу дисперсному потоку со скоростью, меньшей скорости витания частиц, причем для получения многокомпонентных порошков в растворителе растворяют все ингредиенты в концентрациях, потребных процентному составу компонентов.

Диденко А.И., Лебедев В.А., Образцов С.В. с сотрудниками [1] показали, что наилучшие физико-механические свойства покрытий из цинка, никеля, железа, меди, серебра и свинца получаются при использовании переменного тока с соответствующей для каждого элемента резонансной частотой. Численное значение резонансных частот подчиняется строгой закономерности и может быть вычислено по формуле: $f = K / (nA)$, где f – частота асимметричного переменного тока, Гц; n – валентность осаждаемого элемента; A – атомная масса осаждаемого элемента; K – предельная резонансная частота разряда (или ионизация), равная 95 519 Гц.

Величина предельной резонансной частоты разряда хорошо согласуется со временем перезарядки двойного электрического слоя.

Технология позволяет 1) наносить различные неорганические, органические и биосоединения, полимерные и композиционные материалы на подложки различных рельефов и температур 2) наносить покрытия при комнатной температуре и атмосферном давлении, контролировать толщину покрытий и расход

используемых материалов 3) получать покрытия высокой степени однородности; 4) интегрировать предлагаемое технологическое решение в оборудование, работающее в режимах roll-to-roll, что позволит масштабировать производство и сократить расходы в десятки раз; 4) создавать не занимающие больших площадей мобильные установки с малой потребляемой энергией и экологически чистой технологией производства

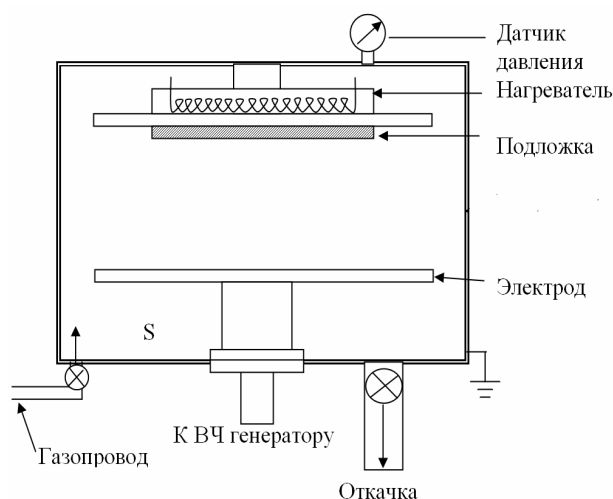


Рис. 5. Получение пленок сульфида свинца в ВЧ разряде

Для испытания необходимо нанести 3 слоя - прозрачные проводящие подложки из SnO_2 и 2 слоя полупроводника – сульфид свинца. В данном эксперименте имелась стеклянная подложка с оксидом олова, на которую необходимо было нанести кристаллы сульфида свинца размером 2-10 нм, объединенные в кластеры шириной 300-900 нм, что соответствует длине волны падающего света. Слой анилина наносился вручную (рисунок 6)

Гидрогенизированный сульфид свинца был получен в сероводородной среде в импульсных разрядах. Использовался безэлектродный разряд с частотой 0,5–13,5 МГц при давлении сероводорода 0,1–2 мм рт. ст. Обычно удельная мощность в разряде составляет $0,1-2,0 \text{ Вт/см}^2$, причем лучшие пленки получаются при малой удельной мощности.

Проведена серия экспериментов, в которых измерялась ЭДС при освещении данной системы от лампы накаливания мощностью 100 Вт на

расстоянии 60 см. При этом на электродах появлялась разность потенциалов в 1.12 В. Без образца при освещении разность потенциалов составляла 0.94 В, ток составлял 5.10 мА. При приближении источника света на 10 см напряжение увеличивалось до 1.06 В, ток 7.24 мА. Без освещения напряжение составляет 0.2 В при токе 0.45 мА, что объясняется остаточными гальваническими эффектами.

Работа производилась по грантам Фонда содействия развитию МП в НТС «Разработка автономных генераторов электроэнергии», «Разработка энергосберегающих систем для транспортных средств».

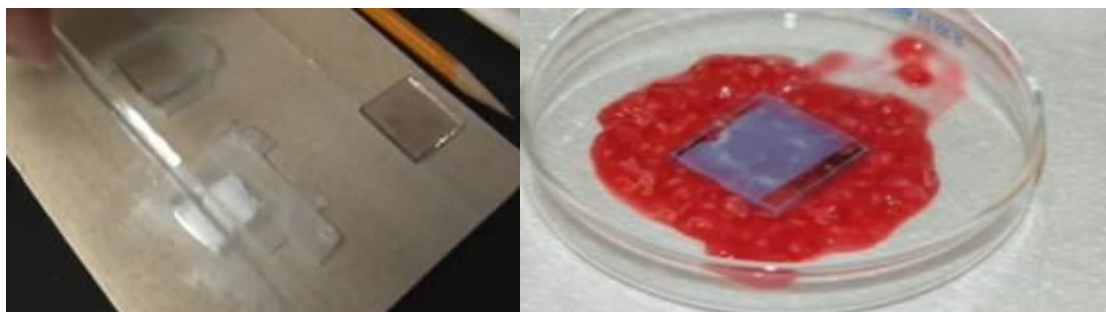


Рис. 6. Этапы производства ячеек в лаборатории: сначала наносится проводящее покрытие, далее наноструктурированный сульфид свинца, затем краситель

Библиографический список

1. Диденко, А.И. Интенсификация электрохимических процессов на основе несимметричного переменного тока / А.И Диденко, В.А Лебедев, С.В. Образцов и др. // Интенсификация электрохимических процессов. Под ред. Томилова А. П. М.: Наука, 1988. – С. 192 – 193
2. CN1967270A Method and system for testing battery impedance spectroscopy. Дата приоритета: 2005-11-18
3. WO2011101553A1 Method for the in situ diagnosis of batteries by electrochemical impedance spectroscopy ., Дата приоритета: 2010-02-17.
4. Nanostructured materials for Solar energy conversion. Ed.T. Soga. Elsevier, 2006, 614 p.

СИСТЕМА АВРОРАЛЬНЫХ КАМЕР MAIN: СИСТЕМА СБОРА И ДОСТУПА К ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НОЧНОГО НЕБА

Козелов Б.В.

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

Новый набор оптического оборудования для наблюдений ночного неба работает с 2009 г. вблизи г. Апатиты. Эта система названа MAIN - Multiscale Aurora Imaging Network. В докладе приводится состав системы, описание системы сбора и доступа к данным наблюдений, а также перечислены задачи, для решения которых эти данные могут использоваться. Приведены примеры.

В составе системы камер MAIN в 2011-2012 гг. работают 4 камеры: камера всего неба (Watec LCL-902 с объективом Fujinon YV2.2×1.4A-SA2), цветная камера с полем зрения 68 градусов (AVT Guppy F-044C NIR с объективом Fujinon 6 мм) и две идентичные черно-белые камеры с полем зрения 18 градусов (AVT Guppy F-044B NIR с объективом Avenir 25 мм и стеклянным фильтром на 558 нм). Камеры расположены в двух точках, разнесенных на 4.12 км по широте, что позволяет использовать идентичные узкоугольные камеры для триангуляционных оценок высоты объектов вблизи магнитного зенита. Схема расположения камер приведена на рисунке 1.

Камеры снабжены блоками GPS синхронизации времени, работают в патрульном режиме в темное время суток в зимний сезон, и регистрируют изображения ночного неба с 1-секундным временным разрешением. Детальное описание камер и примеры анализа данных приведены в работе [1].

Изображения с камер во время наблюдательного сезона доступны в реальном времени на веб-сайте [2]. Кеограммы (т.е. зависимость от времени распределения свечения в сечении поля зрения с севера на юг) и изображения с 10-секундным разрешением за все время наблюдений, вне зависимости от метеоусловий, помещены в веб-архив [3] и доступны для просмотра. После предварительного просмотра кеограмм за зимний период 2011-2012 гг. был составлен

список часовых интервалов (206 шт.), в течение которых камерами MAIN наблюдались полярные сияния. Для этих интервалов из изображений с 1-секундным разрешением сгенерированы avi-фильмы, также помещенные на сайт вместе с информацией о других одновременных наблюдениях [4].

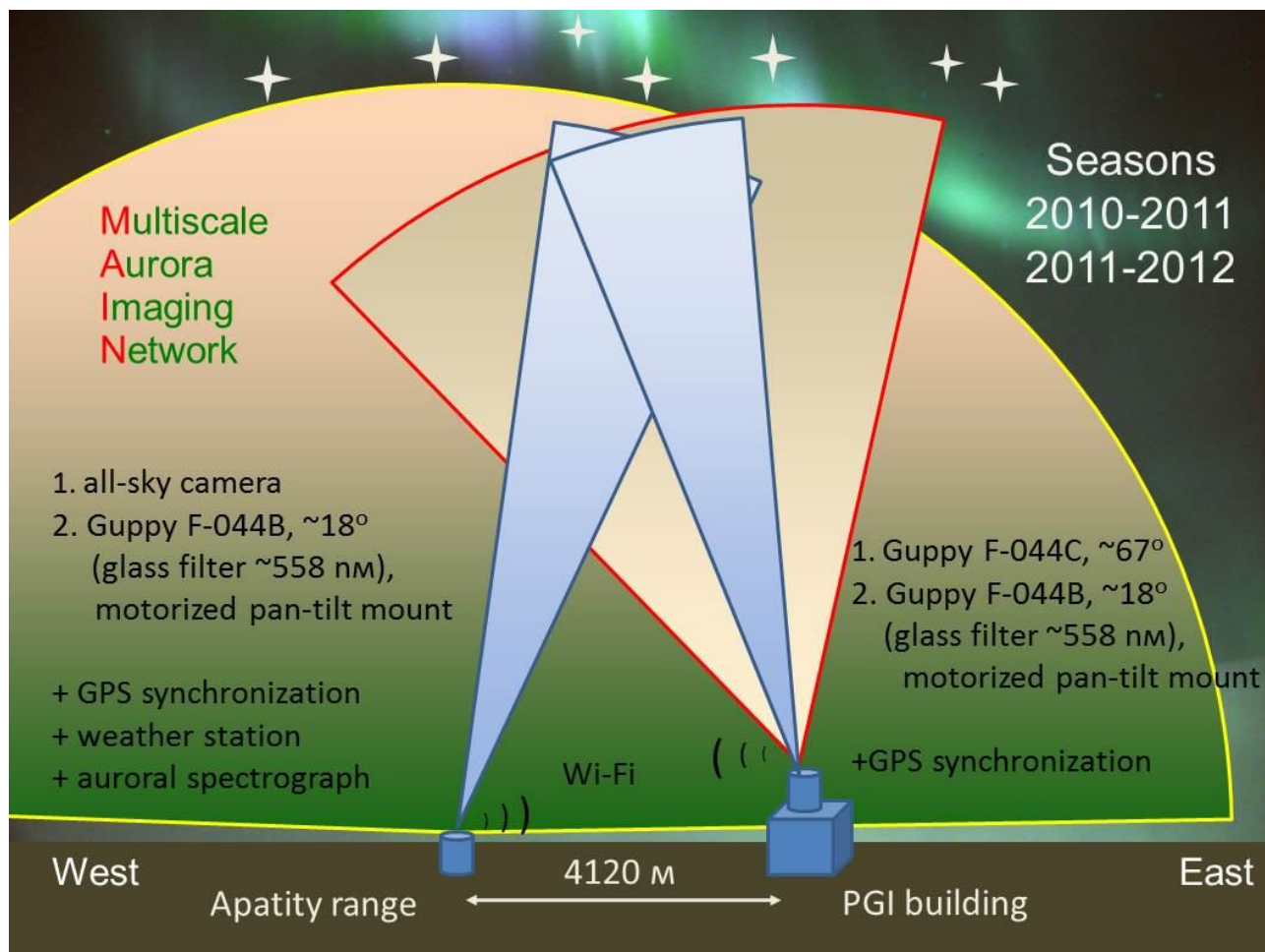


Рис. 1. Схема расположения камер системы MAIN.

Данные наблюдений системы MAIN могут использоваться для решения ряда актуальных геофизических задач, таких как:

- статистический анализ пространственных масштабов в структуре полярных сияний (в том числе характеристик самоподобия);
- по триангуляционным измерениям высоты полярных сияний - оценка энергии высыпающих частиц с пространственной детализацией до километра;

- анализ пространственно-временных характеристик в пульсирующих авроральных формах (в том числе наземная поддержка планируемых спутниковых экспериментов, например, проекта «РЕЗОНАНС»).

В следующем наблюдательном сезоне планируется дополнить систему третьей узкоугольной камерой, размещенной на несколько километров южнее существующих, а также включить в патрульный режим регистрацию электромагнитных волн КНЧ-ОНЧ диапазона.

Приведем здесь несколько примеров, демонстрирующих использование данных системы для триангуляционных оценок высоты. На рисунке 2 приведены кадры, полученные одновременно двумя черно-белыми камерами с полем зрения 15×10 градусов (18 градусов по диагонали). Яркая черта - это отражение солнечного света спутником IRIDIUM-37 в течение времени экспозиции (1 секунда). Видимый параллакс на фоне звезд составляет 7.5 ± 0.5 пикселей, что соответствует углу $\alpha = 0.30^\circ \pm 0.02^\circ$ при угловом разрешении камер $\sim 0.04^\circ$ на пиксел. Тогда расстояние от точки наблюдения до спутника равно $d / \sin \alpha$, где $d = 4.12$ км – это расстояние между камерами. Принимая во внимание угол ψ между направлением на спутник и направлением на горизонт, получаем в данном случае оценку высоты спутника:

$$H = d \sin \psi / \sin \alpha = 4.12 \sin 76^\circ / \sin 0.30^\circ = 760 \pm 50 \text{ км}$$

Это соответствует типичным высотам спутников IRIDIUM (~ 780 км). Меньшей погрешности при оценке высоты можно добиться при использовании субпиксельной интерполяции и объединении информации с нескольких последовательных кадров.

Другой пример – регистрация теми же камерами части траектории метеора - приведен на рисунке 3. В этом случае видимый параллакс был порядка 58-66 пикселей. Аналогичные приведенным выше оценки высоты вдоль траектории приводят к результатам, показанным на рисунке 4. В данном случае оценивались обе проекции положения метеора:

$$H = d \sin \psi / \sin \alpha \text{ и } D = d \cos \psi / \sin \alpha$$

Полученные высоты являются типичными для мелких метеоров.

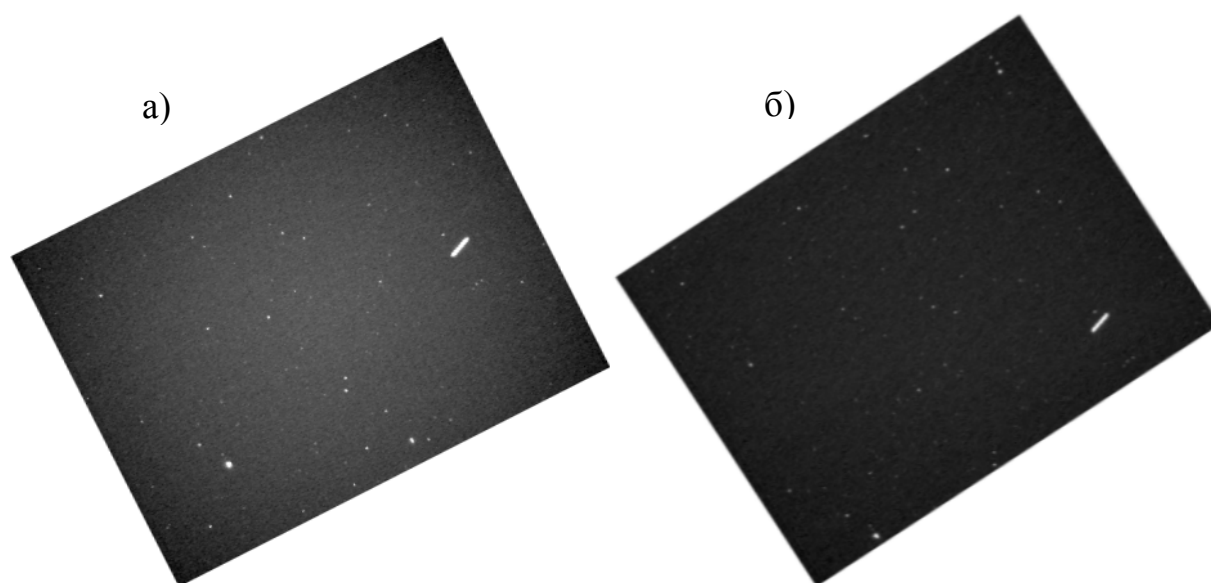
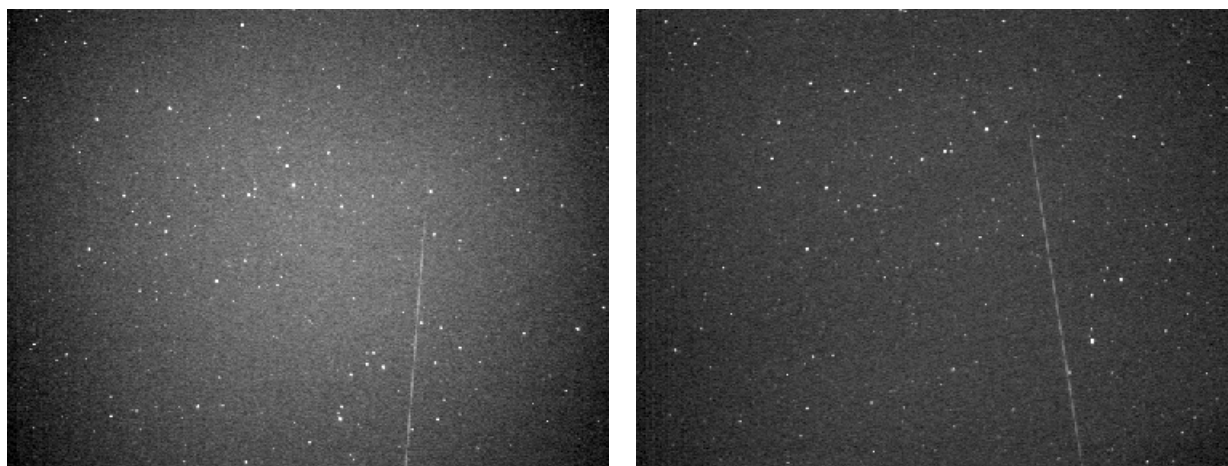


Рис. 2. Регистрация пролета спутника IRIDIUM-37 камерами системы MAIN:
а – камера на здании ПГИ, б – камера на стратосферном полигоне.



а) АРВ

б) АРР

Рис. 3. Регистрация метеора камерами системы MAIN.

В отличие от приведенных выше примеров, пульсирующие полярные сияния не имеют резких границ, что несколько затрудняет стереоидентификацию. В этом случае триангуляция может проводиться по локальным максимумам интенсивности свечения или максимумам градиентов интенсивности.

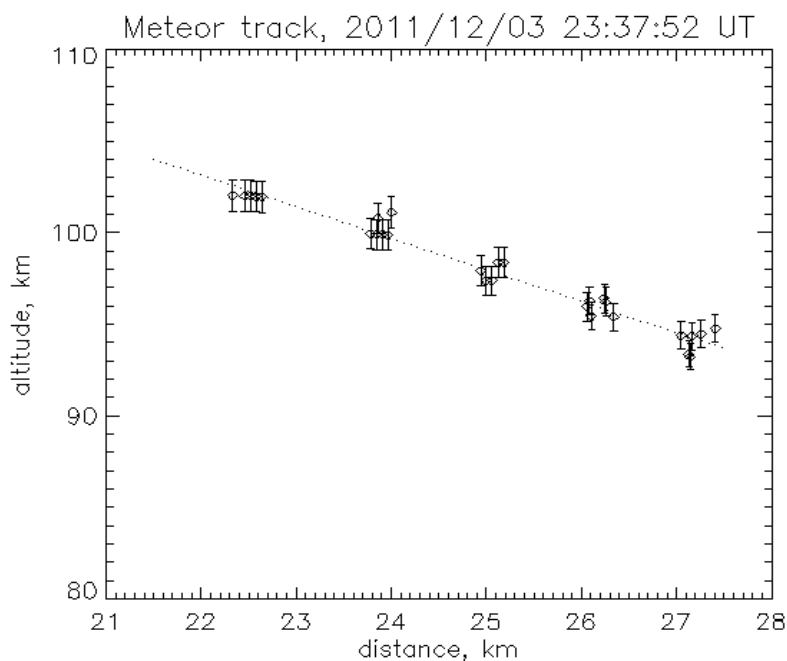


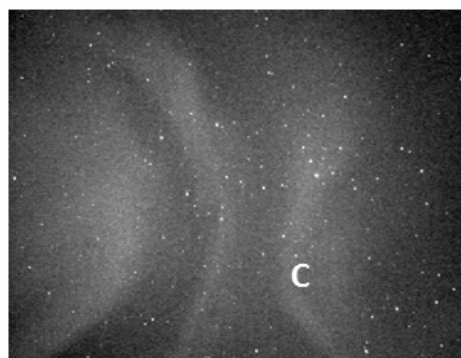
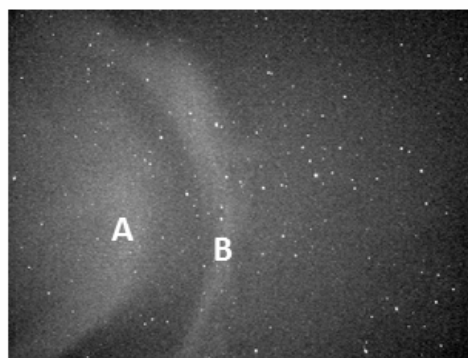
Рис. 4. Восстановленная часть траектории метеора.

На рисунке 5 приведены две пары кадров последовательной регистрации пульсирующих полярных сияний. В поле зрения видны 3 формы: две из них (А и В) видны на обеих парах кадров, а третья (С) – только на второй паре (период пульсаций этой формы ~ 4 с). Оценки высоты по локальным максимумам интенсивности дают значения ~ 97 км для форм А и В, и ~ 104 км для формы С. По этим значениям, имея результаты моделирования диссипации авроральных электронов в атмосфере Земли [5], можно оценить энергию высыпающих электронов, вызывающих свечение: ~ 30 кэВ для форм А и В, и ~ 14 кэВ для формы С. Эти значения соответствуют ожидаемым для утреннего сектора аврорального овала, где высыпаются электроны, рассеиваемые в экваториальной области магнитосферы в результате циклотронного взаимодействия с КНЧ-ОНЧ волнами [6].

2011/12/03 23:59:52 UT

23:59:54 UT

APB



APP

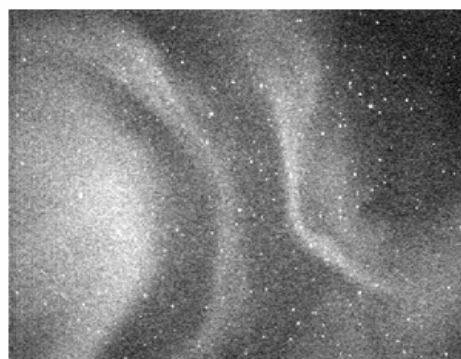
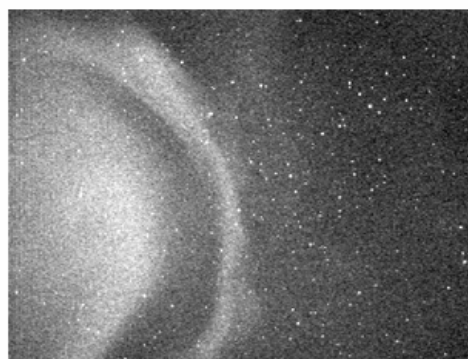


Рис. 5. Две пары кадров последовательной регистрации пульсирующих полярных сияний. Выделены 3 формы, для которых определялись высоты.

Благодарности: Работа частично поддержана Программой №22 Президиума РАН и грантом РФФИ №11-02-00397.

Библиографический список

1. <http://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/1/1/2012/>
2. <http://aurora.pgia.ru/realtime.html>
3. <http://aurora.pgia.ru/archive.html>
4. <http://aurora.pgia.ru/events.html>
5. Иванов В.Е., Козелов Б.В. , Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли . Апатиты: Изд.-во КНЦ РАН, 2001.
6. Trakhtengerts V. Yu., Demekhov A. G., Titova E. E., Kozelov B. V., Santolik O., Gurnett D., and M. Parrot, Interpretation of Cluster data on chorus emissions using the backward wave oscillator model, Phys.Plasma, V.11(4), P.1345-1351, 2004.

ФУЛЛЕРЕН C_{24} В МОДЕЛИ ХАББАРДА

Силантьев А.В.

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола

В настоящее время большое число теоретических исследований посвящено изучению углеродных фуллеренов и нанотрубок, которые представляют собой полиэдрические кластеры углерода [1]. Наряду с такими моделями, как модель Хюккеля, для описания свойств наноструктур также используется модель Хаббарда, которая одновременно была предложена Хаббардом [2] Гутцвиллером [3] и Канамори [4]. Эта модель широко используется для теоретического описания сильно коррелируемых электронных систем [5].

Целью данной работы является исследование фуллерена C_{24} с группой симметрии T_h в рамках модели Хаббарда в приближении однородных статических флуктуаций (ПОСФ), которое является наиболее простым вариантом приближения статических флуктуаций (ПСФ). Следует сказать, что в настоящее время имеется несколько разных подходов к вычислению функций Грина в ПСФ [6-8]. В данной работе при вычислении функций Грина мы будем придерживаться метода предложенного в [8]. Отметим, что фуллерен C_{24} с группой симметрии T_h был открыт в 2001 г. методом высокоразрешающей электронной спектроскопии при лазерной абляции на поверхности графита [9]. Этот фуллерен представляет собой усеченный октаэдр, состоящий из шести квадратов и восьми гексагонов, как показано на рис.1. Таким образом, в фуллерене C_{24} между атомами углерода имеется два типа связей. Длина связи на границе двух гексагонов составляет 0,1386нм, а на границе гексагон-квадрат – 0,1503нм [10]. Этот фуллерен уникален тем, что он представляет собой наименьший объемный кластер, не содержащий пентагонов и удовлетворяющий правилу изолированных квадратов, которое служит правилом стабильности [10]. Это правило является аналогом хорошо известного эмпирического правила изолированных

пентагонов [11], согласно которому кластеры, содержащие изолированные пентагоны являются наиболее стабильными.

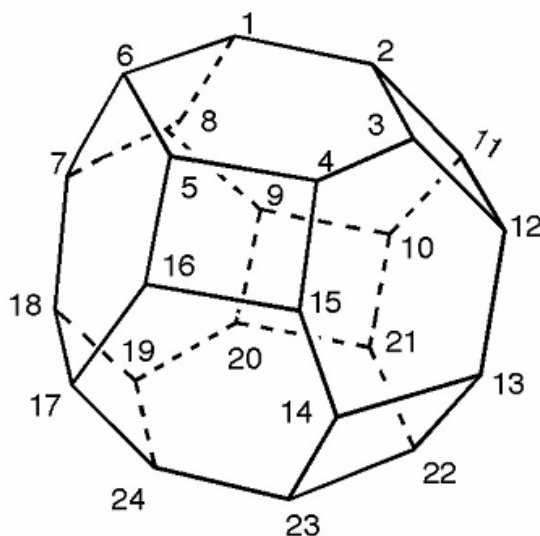


Рис. 1. Структура фуллерена C_{24} с указанием местоположения атомов углерода

В рамках модели Хаббарда [2] фуллерен C_{24} описывается гамильтонианом вида:

$$H = \sum_{\sigma_1, i} \varepsilon_i n_{i\sigma_1} + \sum_{\sigma_1, i \neq j} t_{ij} c_{i\sigma_1}^+ c_{j\sigma_1} + \frac{1}{2} \sum_{\sigma_1, i} U_i n_{i\sigma_1} n_{i\bar{\sigma}_1} \quad (1)$$

где $c_{i\sigma}^+$, $c_{i\sigma}$ - операторы рождения и уничтожения электронов со спином σ на узле i ; $n_{i\sigma}$ - оператор числа частиц со спином σ на узле i ; ε_i - собственная энергия электрона на узле i ; t_{ij} - интеграл переноса, описывающий перескоки электронов с узла i на узел j ; U_i - энергия кулоновского отталкивания двух электронов с противоположными спинами, находящимися на i -ом узле; $\bar{\sigma} = -\sigma$. Отметим, что при $U_i = 0$ модель Хаббарда переходит в модель Хюккеля.

В работе [8] показано, что в ПСФ оператор $n_{j\bar{\sigma}}$ является интегралом движения. Поскольку в ПОСФ считается, что оператор $n_{j\bar{\sigma}}$ не зависит от номера узла $n_{j\bar{\sigma}} = n_{\bar{\sigma}}$, то как показано в работе [8], для того чтобы получить замкнутую систему дифференциальных уравнений для отыскания операторов рождения,

достаточно записать уравнения движения для операторов $c_{f\sigma}^+$ и $c_{f\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}}$ ($f=1, \dots, 24$), заданных в представлении Гейзенберга:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dc_{1\sigma}^+}{d\tau} = \varepsilon \cdot c_{1\sigma}^+ + t \cdot c_{2\sigma}^+ + t_1(c_{6\sigma}^+ + c_{8\sigma}^+) + U \cdot c_{1\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} \\ \frac{d(c_{1\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}})}{d\tau} = (\varepsilon + U) \cdot c_{1\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + t \cdot c_{2\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + t_1(c_{6\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + c_{8\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}}) \\ \dots \\ \frac{dc_{24\sigma}^+}{d\tau} = \varepsilon \cdot c_{24\sigma}^+ + t \cdot c_{23\sigma}^+ + t_1(c_{17\sigma}^+ + c_{19\sigma}^+) + U \cdot c_{24\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} \\ \frac{d(c_{24\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}})}{d\tau} = (\varepsilon + U) \cdot c_{24\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + t \cdot c_{23\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + t_1(c_{17\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}} + c_{19\sigma}^+ n_{\bar{\sigma}}) \end{array} \right. \quad (2)$$

где t - интеграл переноса между атомами углерода на границе гексагон-гексагон, а t_1 - интеграл переноса между атомами углерода на границе гексагон-квадрат.

Система уравнений (2) является замкнутой и имеет точное аналитическое решение. Поскольку решение является громоздким, то мы его здесь не приводим. Зная решение системы уравнений (2) мы можем найти фурье-образ антикоммутирующих функций Грина:

$$\begin{aligned} \langle\langle c_{j\sigma}^+ | c_{j\sigma} \rangle\rangle &= \frac{i}{2\pi} \cdot \sum_{m=1}^{20} \frac{F_{j,m}}{E - E_m + i\hbar} \\ E_k &= \varepsilon + e_k, \quad E_{k+10} = E_k + U \quad F_{j,m} = q_m \cdot Q_{j,m}, \quad Q_{j,k+10} = Q_{j,k}, \quad k = 1 \dots 10, \\ q_m &= \begin{cases} 1 - n/2, & m = 1 \dots 10 \\ n/2, & m = 11 \dots 20 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} e_1 &= -b - 2b_1, \quad e_2 = -\sqrt{b^2 + b_1^2} - b_1, \quad e_3 = -\sqrt{b^2 - 2bb_1 + 4b_1^2}, \quad e_4 = -b, \\ e_5 &= b_1 - \sqrt{b^2 + b_1^2}, \quad e_6 = \sqrt{b^2 + b_1^2} - b_1, \quad e_7 = b, \quad e_8 = \sqrt{b^2 - 2bb_1 + 4b_1^2}, \\ e_9 &= b_1 + \sqrt{b^2 + b_1^2}, \quad e_{10} = b + 2b_1 \\ Q_{j,1} &= Q_{j,10} = 1/24, \quad Q_{j,2} = Q_{j,4} = Q_{j,5} = Q_{j,6} = Q_{j,7} = Q_{j,9} = 1/8, \quad Q_{j,3} = Q_{j,8} = 1/12 \\ b &= -t, \quad b_1 = -t_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) следует, что $e_3 = e_4$, $e_7 = e_8$ при $b_1 = b/2$.

Как известно [8], зная функцию Грина можно найти целый ряд физических величин, характеризующих физические и химические свойства наносистемы,

например, энергетический спектр E_m , электроотрицательность по Малликену χ_M , химический потенциал μ , энергию ионизации E_I , энергию сродства E_A , глобальную химическую жесткость η , глобальную химическую мягкость S , глобальную электрофильность ω , степень вырождения i -го энергетического уровня g_i , вероятность $w_{j,i}$ нахождения электрона с энергией E_i на узле j :

$$\begin{aligned} \chi_M &= -\frac{1}{2}(E_{LUMO} + E_{HOMO}), \quad \mu = -\chi_M, \\ E_I &= -E_{HOMO} + U_1, \quad E_A = -E_{LUMO} - U_1, \\ \eta &= \frac{1}{2}(E_{LUMO} - E_{HOMO}) + U_1, \quad S = \frac{1}{\eta}, \quad \omega = \frac{\mu^2}{2\eta}, \\ g_i &= \sum_{j=1}^N Q_{j,i}, \quad w_{j,i} = \frac{Q_{j,i}}{g_i} \end{aligned} \quad (5)$$

где E_{LUMO} - энергия самой нижней незанятой молекулярной орбитали, а E_{HOMO} - энергия самой верхней занятой молекулярной орбитали, U_1 - энергия, на которую смещаются E_{HOMO} и E_{LUMO} при удалении и добавлении одного электрона, N - число узлов в наносистеме.

Как известно, энергетический спектр системы определяется полюсами функций Грина. Из (3) и (4) следует, что энергетический спектр фуллерена C_{24} зависит от интегралов переноса. На рис.2 представлена зависимость энергетического спектра фуллерена C_{24} от интегралов переноса при $U=0$. В этом спектре можно выделить следующие особенности. При $b=0$ ($b_1=0$) энергетический спектр фуллерена C_{24} переходит в энергетический спектр димера (квадрата). Это можно объяснить тем, что в этих предельных случаях фуллерен C_{24} распадается на изолированные димеры и квадраты, соответственно. Другой особенностью энергетического спектра фуллерена C_{24} является то, что при $b_1 = b/2$ происходит вырождение энергетических уровней E_3 и E_4 , а также энергетических уровней E_7 и E_8 . Таким образом, при $b_1 = b/2$ происходит вырождение как связывающих, так и разрыхляющих орбиталей.

Для того чтобы найти степени вырождения энергетических уровней воспользуемся соотношениями (4) и (5):

$$\begin{aligned}
g_1 = g_{10} = g_{11} = g_{20} = 1, \quad g_3 = g_8 = g_{13} = g_{18} = 2, \\
g_2 = g_4 = g_5 = g_6 = g_7 = g_9 = g_{12} = g_{14} = g_{15} = g_{16} = g_{17} = g_{19} = 3
\end{aligned}
\tag{6}$$

Из (6) следует, что у фуллера C_{24} энергетические уровни E_1 - E_5 , полностью заняты.

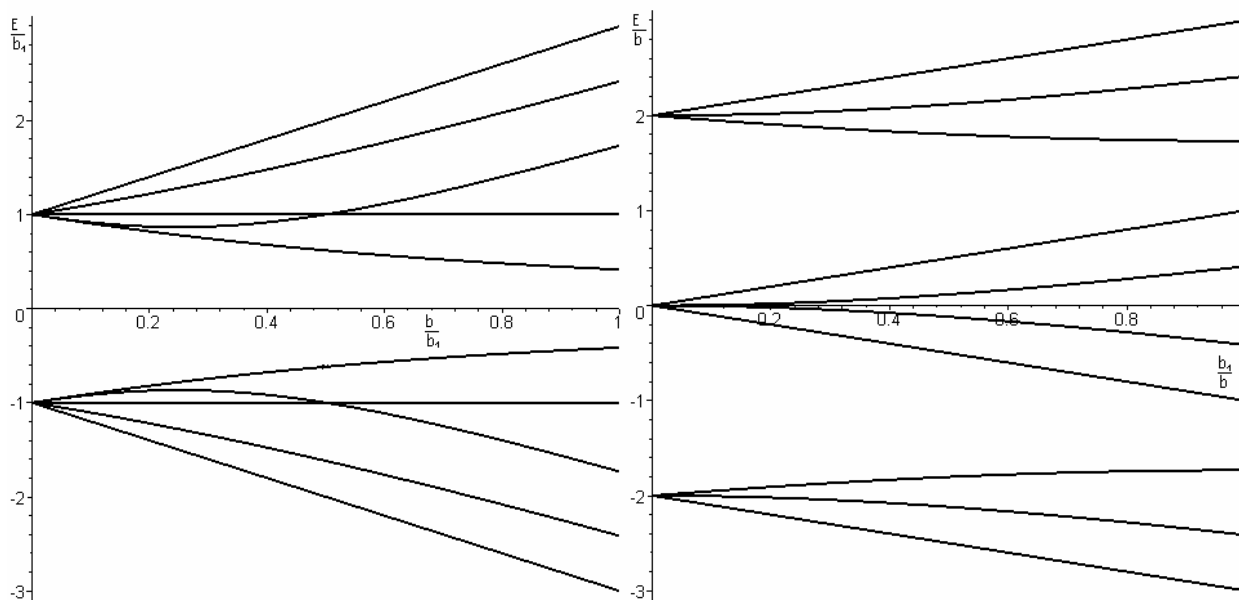


Рис. 2. Энергетический спектр фуллера C_{24} относительно ε для различных значений b и b_1 при $U=0$

Зная функции Грина можно найти также распределение электронов в фуллере C_{24} . Для этого используя (4) и (5) вычислим вероятность нахождения электрона с энергией E_i на узле j :

$$w_{j,i} = \frac{1}{24} \tag{7}$$

Таким образом, вероятность нахождения электрона с энергией E_i на каждом узле фуллера C_{24} одинакова. Это можно объяснить тем, что в этом фуллере все узлы эквивалентны.

Зная функцию Грина можно найти энергетический спектр фуллера C_{24} . При построении энергетических состояний для фуллера C_{24} воспользуемся методом, предложенным в [7,12]. Согласно этому методу нижнюю хаббардовской подзону будут составлять энергетические состояния, которые соответ-

вуют связывающим орбиталям с энергиями E_1 - E_5 , а верхнюю хаббардовскую подзону будут составлять энергетические состояния, которые соответствуют разрыхляющим орбиталям с энергиями E_{16} - E_{20} . Из энергетического спектра фуллерена C_{24} следует, что $E_{НОМО}$ и $E_{ЛУМО}$ будут определяться следующими соотношениями:

$$E_{НОМО} = \varepsilon + b_1 - \sqrt{b^2 + b_1^2}, \quad E_{ЛУМО} = \varepsilon + U + \sqrt{b^2 + b_1^2} - b_1 \quad (8)$$

Для того чтобы оценить физические параметры для фуллерена C_{24} , которые определяются соотношениями в (5) необходимо знать ε , U , U_1 , b , b_1 . В работе [13] эти параметры были оценены для фуллерена C_{60} :

$$U = 1.072 \text{ эВ}, \quad b = 1.838 \text{ эВ}, \quad b_1 = 2.222 \text{ эВ}, \quad \varepsilon = -5.308 \text{ эВ} \quad U_1 = 0.969 \text{ эВ} \quad (9)$$

Для фуллерена C_{24} ε и U можно взять теми же самыми, как и для фуллерена C_{60} , поскольку эти параметры, как видно из гамильтониана (1), характеризуют изолированный атом углерода. Будем считать, как это делается в ряде работ, что $U_1 = U$. Предположим также, что интеграл переноса линейным образом зависит от расстояния x между атомами углерода в фуллерене $b = k \cdot x + h$. Для фуллерена C_{60} расстояния между атомами углерода имеют следующие значения $1,4 \text{ \AA}$ и $1,46 \text{ \AA}$. Используя эти значения, а также (9) получим $k = -6,4 \text{ эВ/\AA}$, $h = 11,182 \text{ эВ}$. Тогда для фуллерена C_{24} $b = 1.5628 \text{ эВ}$, $b_1 = 2.3116 \text{ эВ}$.

Таким образом, для фуллерена C_{24} :

$$U = U_1 = 1.072 \text{ эВ}, \quad b = 1.5628 \text{ эВ}, \quad b_1 = 2.3116 \text{ эВ}, \quad \varepsilon = -5.308 \text{ эВ} \quad (10)$$

Из (5), (8) и (10) следует, что для фуллерена C_{24} :

$$\begin{aligned} \mu &= \varepsilon + \frac{U}{2} \approx -4,772 \text{ эВ}, \quad \chi_M \approx 4,772 \text{ эВ}, \quad E_I \approx 6,8587 \text{ эВ}, \quad E_A \approx 2,6853 \text{ эВ}, \\ \eta &\approx 2,0867 \text{ эВ}, \quad S = 0,4792 \text{ эВ}^{-1}, \quad \omega \approx 5,4564 \text{ эВ} \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) следует, что химический потенциал у фуллерена C_{24} равен химическому потенциалу модели Хаббарда в атомном пределе.

Зная энергетический спектр фуллерена C_{24} найдем ширину верхней Δ_u и нижней Δ_d подзон Хаббарда, а также ширину запрещенной зоны Δ :

$$\Delta_d = \Delta_u = 3b_1 + b - \sqrt{b^2 + b_1^2}, \quad \Delta = U + 2\sqrt{b^2 + b_1^2} - 2b_1 \quad (12)$$

Из (12) видно, что у фуллерена C_{24} , ширина верхней подзоны равна ширине нижней подзоны. Отметим, что вычисления, проведенные для ряда нанотрубок, содержащих только одни гексагоны, показали, что в этих наноструктурах ширина обеих подзон Хаббарда одинакова, в то время как в фуллерене C_{60} ширина верхней подзоны Хаббарда не равна ширине нижней подзоны Хаббарда [6,12]. Поэтому можно предположить, что различие в ширинах подзон Хаббарда в наносистемах связано с присутствием в них многоугольников с нечетным числом сторон.

Библиографический список

1. В.И. Соколов, И.В. Станкевич, Успехи химии. т. 62, с. 455 (1993).
2. J. Hubbard, Proc. Roy. Soc. A. v. 276, p. 238 (1963).
3. M.C. Gutzwiller, Phys. Rev. Lett. v. 10, p. 159 (1963).
4. J. Kanamori, Prog. Theor. Phys. v. 30, p. 275 (1963).
5. Ю.А. Изюмов, М.И. Кацнельсон, Ю.Н. Скрыбин, Магнетизм коллективизированных электронов. М. Наука, (1994), с. 367.
6. А.В. Силантьев, Известия Вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. №3, с. 151 (2011).
7. А.В. Силантьев, Структура и динамика молекулярных систем. №13А, с. 96 (2011).
8. А.В. Силантьев, Известия Вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. №4, с. 122 (2011).
9. T. Oki, M. Kuno, H. Kitahara, I. Navita, Int. J. Inorg. Mat. v. 3, p. 597 (2001).
10. В.В. Покропивный, А.Л. Ивановский, Успехи химии. т. 77, с. 899 (2008).
11. H.W. Kroto, Nature, v. 329, p. 529 (1987).
12. А.В. Силантьев, Вестник МарГУ. №8, с. 22 (2012).
13. А.В. Силантьев, Вестник МарГУ. №8, с. 18 (2012).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ТОКОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ МЕЗОСКОПИЧЕСКОМ КОЛЬЦЕ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Третьяк Д.Н., Тумаев Е.Н.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Сверхпроводящие мезоскопические кольца диаметром несколько микрон и толщиной 40-70 нм, шириной 200-400 нм при температуре порядка $0.95T_c$ представляют собой уникальные сверхчувствительные преобразователи энергии инфракрасного излучения в электрический ток, принцип действия которых основан на дискретности спектра токовых состояний сверхпроводящего кольца, вследствие чего даже незначительное внешнее воздействие приводит к их скачкообразной смене. Результаты теоретических и экспериментальных исследований симметричных и асимметричных сверхпроводящих колец приведены в целой серии работ А.В. Никулова с сотрудниками ([1] и др.), в которых обсуждается использование системы соединенных колец в качестве нетрадиционного источника энергии.

Для исследования токовых состояний в сверхпроводящих кольцах используется уравнение Гинзбурга-Ландау [2, 3], точное решение которого, как показано в работе [4], удается получить лишь для одномерного кольца. В настоящей статье приведены результаты численного исследования токовых состояний в симметричных сверхпроводящих кольцах конечной ширины.

Будем исходить из уравнений Максвелла-Гинзбурга-Ландау в безразмерной форме [3]

$$\left(-\frac{i}{\kappa}\nabla - \mathbf{A}\right)^2 \Psi - \Psi + \Psi^3 = 0, \quad (1)$$

$$[\nabla \times [\nabla \times \mathbf{A}]] = -\frac{i}{2\kappa}(\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - |\Psi|^2 \mathbf{A}, \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\mathbf{n} \left(-\frac{i}{\kappa} \nabla - \mathbf{A} \right) \Psi \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

где $\kappa = \frac{2^{3/2} e H_c \delta^2}{\hbar c}$ – параметр Гинзбурга-Ландау, e – заряд электрона, \hbar , c – по-

стоянная Планка и скорость света, $\delta = \sqrt{\frac{m c^2}{8 \pi e^2 \Psi_0^2}}$ – глубина проникновения маг-

нитного поля в сверхпроводник, m – масса электрона, $\Psi_0 = \sqrt{\frac{\alpha |\tau|}{b}}$ – значение па-

раметра порядка $\Psi(\mathbf{r})$ в отсутствие магнитного поля, $\tau = \frac{T - T_c}{T_c}$, T – температу-

ра сверхпроводника, T_c – критическая температура, $\alpha |\tau|$ и b – коэффициенты,

входящие в разложение свободной энергии сверхпроводника по параметру по-

рядка $\Psi(\mathbf{r})$, $H_c = 2 \sqrt{\frac{\pi}{b}} \alpha \tau$ – критическое значение напряженности магнитного

поля, при котором сверхпроводящее состояние исчезает, $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ – вектор-

потенциал электромагнитного поля, \mathbf{n} – вектор внешней нормали к границе Γ

сверхпроводящего образца. В уравнениях (1)-(2) и условии (3) параметр поряд-

ка отнесен к величине Ψ_0 , вектор-потенциал отнесен к величине $\sqrt{2} H_c \delta$, и ра-

диус-вектор \mathbf{r} отнесен к глубине проникновения δ . Второе уравнение пред-

ставляет собой уравнение Максвелла для магнитного поля, $[\nabla \times \mathbf{H}] = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$, в

правой части которого находится сверхпроводящий ток. Наличие в выражении

для сверхпроводящего тока слагаемого, пропорционального вектор-потенциалу

\mathbf{A} , нарушающего калибровочную инвариантность, связано с трактовкой явле-

ния сверхпроводимости как спонтанного нарушения калибровочной инвари-

антности.

Проведем вначале теоретический анализ токовых состояний в одномер-

ном кольце, т. е. в кольце исчезающе малой толщины. Уравнение Гинзбурга-

Ландау (1) допускает в этом случае точное решение [4], которое удобнее получить, используя (f, θ) -параметризацию, при которой параметр порядка $\Psi(\mathbf{r})$ разделяется на амплитуду $f(\mathbf{r})$ и фазу $\theta(\mathbf{r})$

$$\Psi(\mathbf{r}) = f(\mathbf{r}) \exp[i\theta(\mathbf{r})].$$

Как и для случая (ξ, η) -параметризации, уравнение (1) распадается на два уравнения

$$-\frac{1}{\kappa^2} \nabla^2 f + f \mathbf{p}^2 - f + f^3 = 0, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\kappa} f \nabla^2 \theta + 2 \mathbf{p} \nabla f = 0, \quad (9)$$

где величина \mathbf{p} , равная

$$\mathbf{p} = \frac{1}{\kappa} \nabla \theta - \mathbf{A},$$

играет роль обобщенного импульса. Граничное условие (3) запишется в виде

$$\mathbf{n} \left(-\frac{i}{\kappa} \nabla f + f \mathbf{p} \right) = 0.$$

Для бесконечно тонкого кольца радиусом R , находящегося в перпендикулярной плоскости кольца внешнем однородном постоянном магнитном поле напряженностью H , амплитуда параметра порядка $f = \text{const}$, $\nabla = \mathbf{e}_\varphi \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi}$ где

\mathbf{e}_φ – единичный вектор полярной системы координат (r, φ) , касательный к

сверхпроводящему кольцу, и $\mathbf{A} = \frac{1}{2} H R \mathbf{e}_\varphi$. Тогда уравнения (8) и (9) имеют вид

$$\mathbf{p}^2 - 1 + f^2 = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что $\theta = n\varphi$, где n – целое число. Тогда обобщенный импульс равен

$$\mathbf{p} = \left(\frac{n}{\kappa R} - \frac{1}{2} HR \right) \mathbf{e}_\varphi,$$

и, согласно (10), квадрат амплитуды параметра порядка

$$f^2 = 1 - \left(\frac{n}{\kappa R} - \frac{1}{2} HR \right)^2,$$

который достигает максимума, равного единице, при

$$\frac{\kappa}{2} HR^2 = n. \quad (12)$$

Выясним смысл этого равенства. Введем поток магнитного поля $\Phi = \pi R^2 H$, охватываемого сверхпроводящим кольцом, и квант магнитного потока $\Phi_0 = \frac{\pi \hbar c}{e}$. Тогда условию (12) можно придать вид хорошо известного условия квантования потока магнитного поля, охватываемого кольцом со сверхпроводящим током

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = n. \quad (13)$$

Входящий в формулу (13) магнитный поток Φ обусловлен как внешним полем $A_{ext}(\mathbf{r})$, так и полем $A_{int}(\mathbf{r})$, создаваемым сверхпроводящим током. Выделяя вклад внешнего поля в величину квадрата параметра порядка $|\Psi|^2 = f^2$, получаем

$$f^2 = 1 - \frac{1}{\kappa^2 R^2} \left(n - \frac{\pi HR^2}{\Phi_0} \right)^2. \quad (14)$$

Последнее выражение можно записать в виде

$$f^2 = 1 - \frac{1}{\kappa^2 R^2} \left(n - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^2. \quad (15)$$

Выражение (14) показывает, что зависимость величины f^2 от напряженности внешнего магнитного поля H имеет осциллирующий характер, аналогичный тому, который был получен в результате численного анализа токовых состояний в сверхпроводящем кольце конечной ширины (рис.1). Как из резуль-

татов расчета, приведенных на рисунке, так и из формулы (14) следует, что токовые состояния становятся неустойчивыми при значении потока внешнего магнитного поля $\Phi = \left(n + \frac{1}{2}\right)\Phi_0$. Действительно, при полуцелом отношении Φ / Φ_0 одинаковому значению магнитного потока Φ отвечают два разных значения n , отличающиеся на единицу, так как отношение Φ / Φ_0 можно записать в виде $\frac{\Phi}{\Phi_0} = n + \frac{1}{2}$ и $\frac{\Phi}{\Phi_0} = (n+1) - \frac{1}{2}$. Этим значениям n отвечают два различных параметра порядка $\psi_n = f \exp(in\varphi)$ и $\psi_{n+1} = f \exp[i(n+1)\varphi]$, что и вызывает неустойчивость. Напротив, токовое состояние при $\Phi = n\Phi_0$ является устойчивым, поскольку в этом случае квантовое число n определяется однозначно. Этот вывод имеет место и для кольца конечной ширины. Отличие кольца конечной ширины от бесконечно узкого кольца состоит в том, что для него имеется конечное число осцилляций параметра порядка, в то время, как для бесконечно узкого кольца число осцилляций параметра f^2 бесконечно велико. Экспериментальные данные, приведенные в [1] и других работах, подтверждают этот вывод.

Вычислим величину сверхпроводящего тока для одномерного кольца

$$\frac{4\pi}{c} \mathbf{j} = -\frac{i}{2\kappa} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - |\Psi|^2 \mathbf{A}$$

Из явного вида найденного выше параметра порядка получаем

$$\frac{4\pi}{c} \mathbf{j} = \frac{|\Psi|^2}{\kappa R} \left(n - \frac{\kappa R^2}{2} H \right) \mathbf{e}_\varphi,$$

что может быть записано в виде

$$\frac{4\pi}{c} j = \frac{f^2}{\kappa R} \left(n - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right).$$

Последнее выражение показывает, что как и параметр порядка, зависимость величины тока от потока магнитного поля, охватываемого кольцом, также имеет

осцилляционный характер, однако, в отличие от осцилляций положительно определенного параметра f^2 , осцилляции величины тока имеют знакопеременный характер. Причина такого характера осцилляций заключается в следующем: величина магнитного потока, охватываемого кольцом с током, равна числу квантов потока магнитного поля n . Следовательно, если напряженность магнитного поля имеет такую величину, что величина потока магнитного поля, охватываемого кольцом, не равна целому числу квантов магнитного потока Φ_0 , то возникающий в кольце ток создает магнитное поле, которое либо добавляется к внешнему магнитному полю, либо вычитается из внешнего поля так, чтобы в обоих случаях кольцо с током охватывало целое число квантов магнитного потока.

Численное исследование зависимости числа осцилляций от относительной толщины кольца, результаты которого приведены ниже, показывает, что количество осцилляций уменьшается с увеличением относительной ширины в полном согласии с известным выводом, что при помещении односвязного сверхпроводника во внешнее магнитное поле устойчивый сверхпроводящий ток в нем не возникает [5].

Для численных расчетов удобно использовать (ξ, η) -параметризацию, при которой комплексная величина Ψ разделяется на вещественную и мнимую части

$$\Psi(\mathbf{r}) = \eta(\mathbf{r}) + i\xi(\mathbf{r}).$$

Тогда уравнения (1)-(2) в поперечной калибровке вектор-потенциала электромагнитного поля $\nabla A = 0$ будут иметь следующий вид

$$-\frac{1}{\kappa^2} \nabla^2 \eta - \frac{2}{\kappa} A \nabla \xi + A^2 \eta - \eta + \eta(\xi^2 + \eta^2) = 0, \quad (16)$$

$$-\frac{1}{\kappa^2} \nabla^2 \xi + \frac{2}{\kappa} A \nabla \eta + A^2 \xi - \xi + \xi(\xi^2 + \eta^2) = 0, \quad (17)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \frac{4}{\kappa} (\xi \nabla \eta - \eta \nabla \xi) + (\xi^2 + \eta^2) \mathbf{A}. \quad (18)$$

Граничные условия (3) запишутся в виде

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\kappa} \nabla \xi - \mathbf{A} \eta \right) = 0, \quad \mathbf{n} \left(\frac{1}{\kappa} \nabla \eta + \mathbf{A} \xi \right) = 0. \quad (19)$$

Рассмотрим сверхпроводящее мезоскопическое кольцо с внутренним радиусом R_1 , внешним радиусом R_2 и толщиной h , которая меньше корреляционной длины ξ_c [2], что дает основание рассматривать мезоскопическое кольцо как двумерный объект, находящийся во внешнем однородном постоянном магнитном поле, вектор напряженности которого перпендикулярен плоскости кольца. В уравнениях (1)-(2) и эквивалентных им уравнениям (16)-(18) вектор-потенциал $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ складывается из потенциала внешнего поля $\mathbf{A}_{ext}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} [\mathbf{H} \times \mathbf{r}]$ и потенциала, порождаемого сверхпроводящим током $\mathbf{A}_{int}(\mathbf{r})$. Полный расчет электромагнитного поля представляет собой сложную задачу, для решения которой необходимо использовать специальные методы, одним из которых является следующий. Для расчета величин ξ и η , с помощью уравнений (4)-(5), и вычисления с их помощью токовых состояний сверхпроводящих мезоскопических колец используем приближение заданного внешнего магнитного поля, когда $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mathbf{A}_{ext}(\mathbf{r})$. Это приближение является стартовым для численной схемы, основанной на методе конечных элементов, используемом в программном пакете FlexPDE. К сожалению, описанный метод решения не всегда сходится, что, по-видимому, связано с нелинейным характером уравнений Гинзбурга-Ландау. Именно поэтому в дальнейшем для численного решения уравнений (4)-(5) полагается $\mathbf{A}_{ext}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} [\mathbf{H} \times \mathbf{r}]$.

Результаты численного анализа системы уравнений (1)-(3) при $R_1 = 20$ мкм, $R_2 = 25$ мкм, $\kappa = 0.026$, что соответствует использовавшимся в использовавшимся в исследованиях [1] алюминиевым кольцам, позволили получить рас-

пределение в кольце концентрации бозе-конденсата куперовских пар электронов $|\Psi(\mathbf{r})|^2$ в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля, которое приведено на рисунке 1.

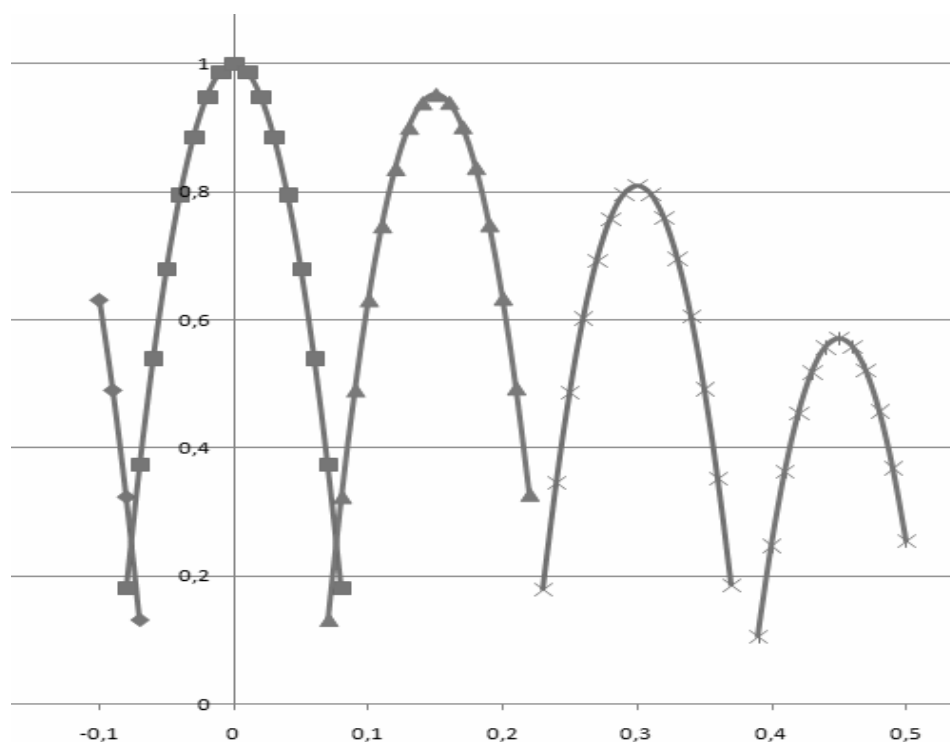


Рис.1. Зависимость относительной концентрации куперовских пар $|\Psi|^2 = \eta^2 + \xi^2$ от напряженности внешнего магнитного поля H / H_c

Библиографический список

1. Гуртовой В.Л., Дубонос С.В., Никулов А.В. и др. Зависимость величины и направления устойчивого тока от величины магнитного потока в сверхпроводящих кольцах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2007. Т. 132. С.1320-1339.
2. Tinkham M. Introduction to Superconductivity (2-nd ed.). McGraw-Hill Inc., 1996, 472 p.
3. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М. «Наука», 1987, 520 с.
4. Vodolazov D.Y., Baelus B.J., Peeters F.M. Stationary-phase slip state in quasi-one-dimensional rings // Physical Review B, 2002, 66, 054531, P.1-6.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2003, 620 с.

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ КВАНТОВЫХ КОЛЕЦ И ТОЧЕК ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Тумаев Е.Н., Чайкин А.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Введение

С конца прошлого века, благодаря развитию технологий создания микроскопических систем, стали активно исследоваться различные полупроводниковые низкоразмерные системы (НС) в виде квантовых точек, проволок, колец. Характерные размеры этих систем составляют величину порядка 10 нм. – 10 мкм. Такие системы, удерживающие в себе от одного до нескольких тысяч электронов, уже находят практическое применение: имеются сообщения о создании на их основе солнечных элементов нового поколения с улучшенными характеристиками [1], лазеров на квантовых точках. Квантовые кольца нашли применение при создании высокочувствительных детекторов теплового излучения [2].

При моделировании поведения электронов в таких системах возникает задача нахождения стационарных состояний электронов, удерживаемых в них. Результаты решения данной задачи помогают описать различные эффекты, возникающие в НС, такие как незатухающий ток, Вигнеровская кристаллизация электронов, эффект Ааронова-Бома и другие. Между тем, если учитывать кулоновское взаимодействие между электронами, а это необходимо, то каждый раз с увеличением количества электронов в рассматриваемой НС задача нахождения стационарных состояний электронов значительно усложняется, и для её решения применяют различные численные методы.

Целью работы является нахождение волновых функций и энергетических уровней электронов в НС. Из-за ограниченности объема статьи ограничимся в ней только рассмотрением одноэлектронных состояний. Поскольку подобные системы исследовались в основном прямыми численными методами, нашей це-

лю является также подведение аналитической базы с целью использовать более простой вариационный метод. Преимущество приближенных аналитических формул также в том, что они позволяют наглядно анализировать зависимости вычисляемых величин от значения исходных параметров системы, в то время как численные расчёты жестко привязаны к конкретным параметрам системы, изменение которых влечёт повторение громоздкой процедуры численного расчёта.

Одномерное квантовое кольцо

Важнейшими типами полупроводниковых низкоразмерных систем являются полупроводниковые квантовые точки и кольца, описанные в [3-6] и др. В данных источниках изучаются, в основном, малоэлектронные системы, за исключением [7], [8], где изучаются системы с очень большим числом электронов.

Основной темой данных работ является изучение поведения электронов в НС, помещённых в стационарное однородное магнитное поле. Одним из простейших случаев, дающих наглядные, хотя и парадоксальные результаты, является случай бесконечно тонкого однородного кольца, описанный, например, в [9]: на бесконечно тонкое кольцо радиуса R помещается один электрон, вся эта система помещается в однородное магнитное поле, проходящее перпендикулярно к площадке кольца (рисунок 1).

Для электрона, заключенного в такой системе, напишем уравнение Шредингера:

$$\frac{1}{2\mu} \left(p_\varphi + \frac{|e|\hbar}{c} A_\varphi \right)^2 \psi = E\psi, \quad (1)$$

где $p_\varphi = -\frac{i\hbar}{R} \frac{d}{d\varphi}$. Угловую компоненту векторного потенциала A_φ в уравнении

(1) запишем в виде, следующем из теоремы Стокса

$$A_\varphi = \frac{\Phi}{2\pi R}. \quad (2)$$

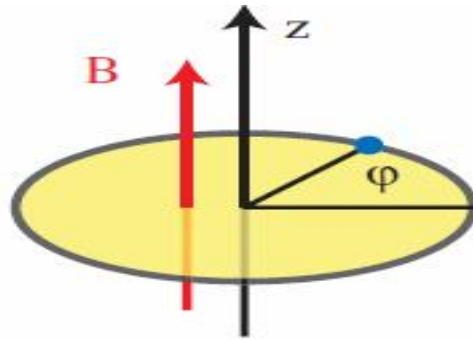


Рисунок 1 – Бесконечно тонкое кольцо в магнитном поле

Следует заметить, что формула (2) удовлетворяет, очевидно, Кулоновской калибровке вектор-потенциала, а также не зависит от того, проходит ли вектор индукции магнитного поля через обод кольца. В рассматриваемом случае очевидно, что, даже если электрон находится в области, где магнитное поле отсутствует, то изменение магнитного поля все равно повлияет на его состояние. Это и есть так называемый эффект Ааронова –Бома [9], [10].

Решение уравнения (1) выглядит достаточно просто:

$$\psi_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-im\varphi), \quad E_m = \frac{\hbar^2}{2\mu R^2} \left(m - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь: m – магнитное квантовое число, пробегающее целые значения, Φ_0 – квант магнитного потока, который дается соотношением

$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar c}{|e|}. \quad (4)$$

Следует обратить внимание, что квант магнитного потока в данном случае в два раза больше кванта магнитного потока, охватываемого сверхпроводящим током (см. статью Д.Н. Третьяка и Е.Н. Тумаева "Аналитическое и численное исследование устойчивых токовых состояний в сверхпроводящем мезоскопическом кольце во внешнем магнитном поле", в этом сборнике).

Введём величину $F = \Phi / \Phi_0$, и, положив для простоты вычислений $\hbar = 2\mu = e = 1$ (система единиц Хартри) и $R = 1$, построим график $E_m(F)$ для различных значений m (рисунок 2).

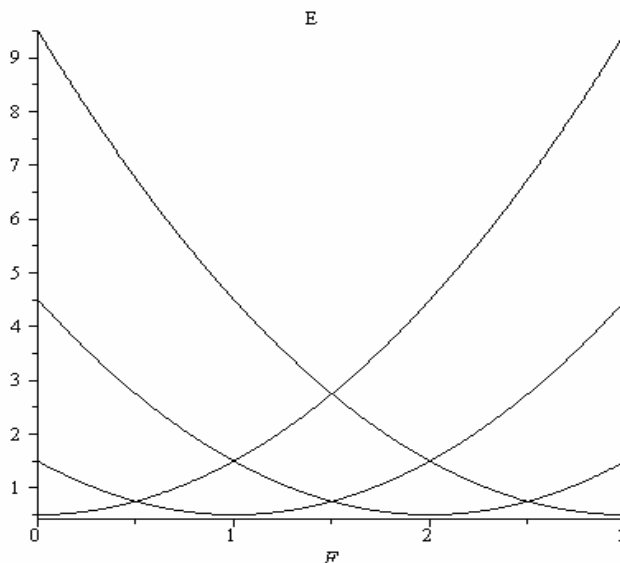


Рисунок 2 – Зависимость энергии E (ед-цы Хартри) электрона в одномерном кольце от отношения $F = \Phi / \Phi_0$

На рисунке видно, что между минимумами энергии, также, как и между точками пересечения, расстояние в один квант магнитного потока. При этом, точки минимумов энергии соответствуют целым F , а точки пересечения состояний – полуцелым F . Точки пересечения уровней с различными m являются точками возникновения неустойчивости (подробное обсуждение этого вопроса содержится в цитированной выше статье Д.Н. Третьяка и Е.Н. Тумаева в этом сборнике), т.е. перестройки состояния [9],[10].

Вследствие наличия точек перестройки энергетических уровней, повторяющихся с периодом, равным кванту магнитного потока, периодичным также будет и незатухающий (устойчивый) ток. Для нахождения зависимости незатухающего тока от магнитного потока, используем соотношение Бейерса– Янга [7], [9]

$$I = -\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial \Phi} = \frac{2}{c\Phi_0} \left(m - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) = \frac{2}{c\Phi_0} J(F), \quad (5)$$

где периодическая функция $J(F)$, равная $m - F$ в пределах периода, имеет график, представленный на рисунке 3.

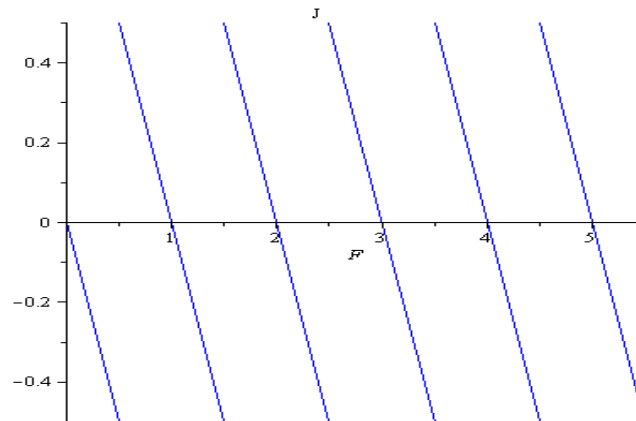


Рисунок 3 – Зависимость величины незатухающего тока (формула (5)) от параметра $F = \Phi / \Phi_0$

На графике изображены осцилляции незатухающего тока с периодом, равным кванту магнитного потока.

Рассмотренная система является идеализацией реальных квантовых колец, имеющих конечную ширину, и для которых используются различные модели квазиодномерных колец с удерживающими потенциалами: модель Волкано [7], [8], [11]; модель Хилла (смещённая парабола) [11],[12] и др., которые рассмотрены ниже.

Модельные потенциалы для квантовых колец и квантовых точек

Самыми широко используемыми на данный момент моделями квантовых колец являются двумерные модели Хилла и Волкано. Потенциалы Хилла и Волкано равны соответственно

$$U_H(r) = \frac{\mu\omega_0^2(r-r_0)^2}{2}, \quad U_V(r) = \frac{a_1}{r^2} + a_2r^2 - U_0, \quad (6)$$

где r – радиус полярной системы координат, r_0 – эффективный радиус кольца, ω_0 – эффективная частота удерживающего потенциала. Для сопоставления потенциалов U_H и U_V выберем параметры последнего следующим образом

$$r_0 = (a_1/a_2)^{1/4}, \quad \omega_0 = \sqrt{8a_2/\mu}, \quad U_0 = 2\sqrt{a_1a_2}.$$

Квантовая точка обычно описывается параболическим потенциалом:

$$U_D(r) = \frac{\mu\omega_0^2 r^2}{2} \quad (7)$$

В полярных координатах (r, φ) уравнение Шредингера для одного электрона в магнитном поле выглядит следующим образом:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} \right) + U(r)\psi - \frac{i\hbar\omega_B}{2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} + \frac{\mu\omega_B^2}{8} r^2 \psi = E\psi, \quad (8)$$

где $\omega_B = \frac{|e|B_z}{\mu}$ – циклотронная частота, и $U(r)$ – любой из перечисленных выше потенциалов.

Решения уравнения (18) с потенциалом Волкано известны уже достаточно давно [7], [11] и т.д. После подстановки (6) в (8) решение этого уравнения можно будет записать в следующем виде [7]:

$$\Psi_{nm}(r, \varphi) = \left[\frac{\Gamma(n+|m|+1)}{2^{M+1} \Gamma^2(M+1) n^2 \pi} \right]^{1/2} \frac{r^M}{\lambda^{M+1}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\lambda^2} - im\varphi\right) F\left(-n, M+1, \frac{r^2}{2\lambda^2}\right)$$

$$E_{nm} = \hbar\omega \left(n + \frac{M+1}{2} \right) - \frac{\hbar\omega_B}{2} m - U_0,$$

где $M = \sqrt{m^2 + 2a_1\mu/\hbar^2}$, $\lambda = \sqrt{\hbar/\mu\omega}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_B^2}$ – гибридная частота, $n = 0, 1, 2, \dots$ – радиальное квантовое число, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – магнитное квантовое число. При $a_1 = 0$ данное решение переходит в решение для квантовой точки с параболическим удерживающим потенциалом (7). Для простоты, положим $\hbar = \mu = |e| = 1$ (единицы Хартри), а также $a_1 = 1$, $\omega_0 = 1$, построим график зависимости $E_{0m}(\omega_B)$ (рисунок 4).

График, приведенный на рисунке 4, показывает, что, как и в случае бесконечно тонкого кольца, имеет место перестройка состояний при изменении магнитного поля. Однако, в отличие от задачи, рассмотренной выше, здесь магнитное поле полностью проникает внутрь образца, т. е., в ту область, где находится частица. За счёт перестройки состояний физические величины, такие как

намагниченность, незатухающие токи, средний радиус расположения электрона, и т.д., будут меняться периодически в зависимости от внешнего однородного магнитного поля. Исследованная модель демонстрирует эффекты, вызываемые конечной шириной кольца. В отличие от идеального бесконечно узкого кольца, здесь минимум энергии каждого последующего периода осцилляций увеличивается. Это, естественно, отражается и на незатухающем токе. Формула силы тока выглядит следующим образом [7]:

$$I_m = -\frac{|e|\omega}{4\pi} \left(\frac{m}{M} - \frac{\omega_B}{\omega} \right) \quad (9)$$

Для графического изображения зависимости (9), выберем значения параметров $a_1 = 1$, $\omega_0 = 1$.

График зависимости тока от циклотронной частоты (рисунок 5), в сопоставлении с рисунком 3, наглядно отражает изменения, вносимые в поведение тока в зависимости от внешнего магнитного поля квазиодномерностью системы: на периодах характер зависимости не является строгой прямой (за исключением первого периода). При увеличении магнитного поля наблюдается уменьшение амплитуды тока от периода к периоду. Степень выраженности такого поведения зависит от параметров ямы ω_0 и a_1 . Описание поведения энергии электрона в кольце также можно найти в [13] и многих других источниках.

Исследуем теперь случай $a_1 = 0$, когда потенциал Волкано переходит в потенциал квантовой точки с параболическим удерживающим потенциалом. Используя приведенные выше формулы, и полагая для простоты $\omega_0 = 1$, построим график зависимости энергии основного состояния электрона (радиальное квантовое число n равно нулю) от величины магнитного поля, выраженного через циклотронную частоту (рисунок 6).

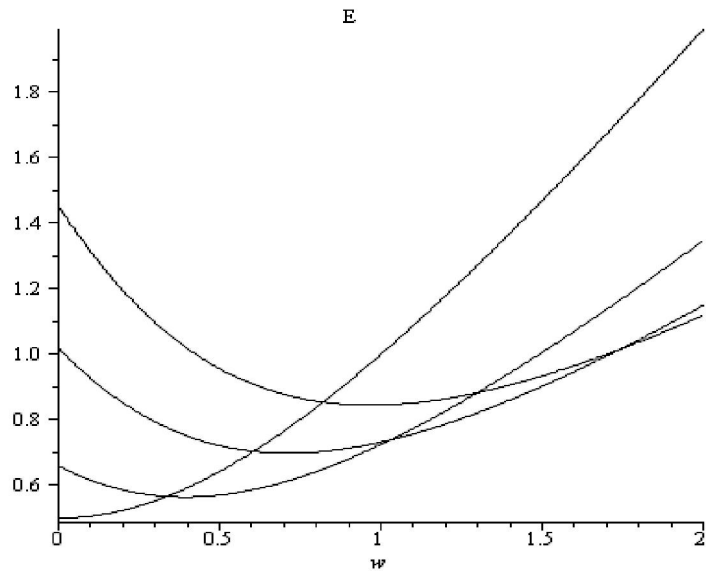


Рисунок 4 – Зависимость энергии основного состояния E электрона в квантовом кольце от циклотронной частоты ω_B (ед-цы Хартри) значений $m = 0, 1, 2, 3$ (снизу вверх по оси E)

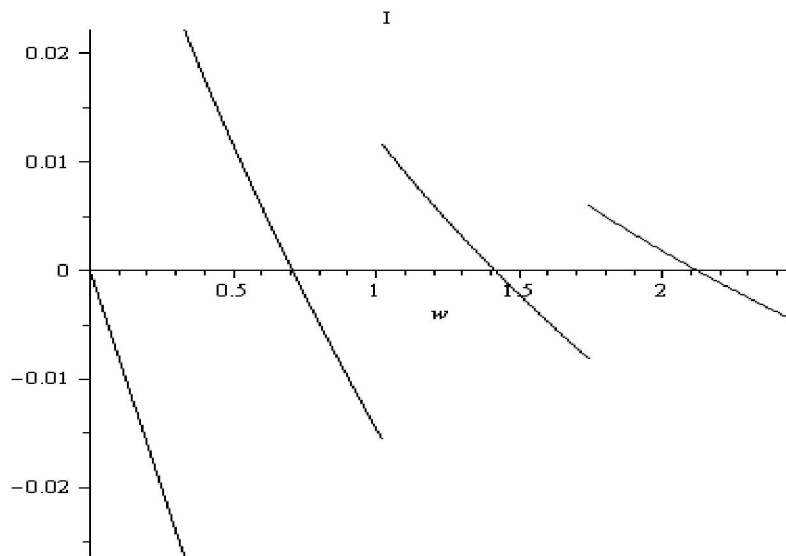


Рисунок 5 – Зависимость величины незатухающего тока (ед-цы Хартри) от циклотронной частоты

Состояния электрона в квантовой точке, находящейся во внешнем магнитном поле, т.е. состояния Фока-Дарвина [14], характеризуются тем, что при различных значениях орбитального квантового числа m , не пересекаются (рисунок 6, [13],[14],и.т.д.), т.е. не происходит отмеченной выше перестройки состояний при изменении магнитного поля. Следовательно, квантовая точка с па-

рабочим удерживающим потенциалом, не описывает наблюдавшийся в экспериментах устойчивый ток.

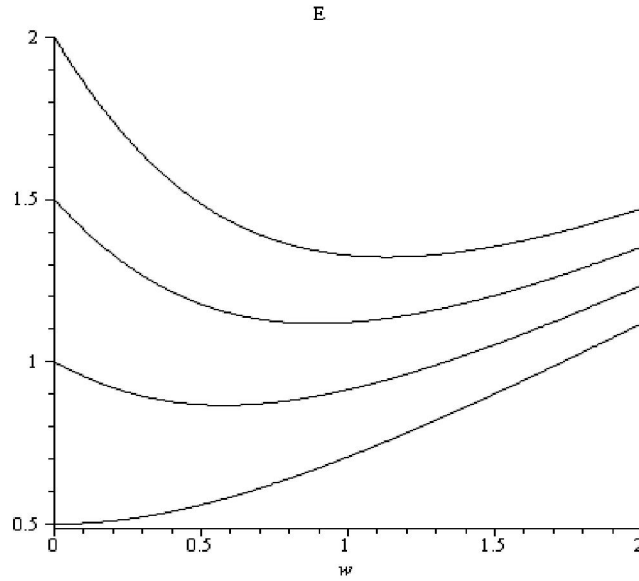


Рисунок 6 – Зависимость энергии основного состояния E (ед-цы Хартри) электрона в квантовой точке от циклотронной частоты для значений $m = 0, 1, 2, 3$ (снизу вверх по оси энергии)

Рассмотрим теперь потенциал Хилла. В отличие от цитированных выше работ, в которых исследование одноэлектронных состояний проводится либо численно, либо в рамках теории возмущений, найдем точные решения уравнения Шредингера, которое будет выглядеть следующим образом

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\mu \omega_0^2}{2} (r - r_0)^2 \psi - i \frac{\hbar \omega_B}{2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} + \frac{\mu \omega_B^2}{8} r^2 \psi = E \psi. \quad (10)$$

Поскольку потенциал Хилла инвариантен относительно вращений в плоскости (r, φ) (SU(2)-инвариантность), то волновые функции будем искать в виде $\psi(r, \varphi) = R(r) \exp(-im\varphi)$. Тогда уравнение Шредингера в единицах Хартри примет следующую форму

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \frac{m^2}{r^2} R \right) + \frac{\Omega^2}{2} r^2 R - \omega_0^2 r_0 r R + \frac{\omega_0^2 r_0^2}{2} R = \tilde{E} R, \quad (11)$$

где $E = \tilde{E} - \frac{m}{2} \omega_B$, $\Omega^2 = \omega_0^2 + \frac{\omega_B^2}{4}$. Заменой

$$R(r) = r^{|m|} \exp\left(-\frac{\Omega}{2}r^2 + \frac{\omega_0^2 r_0}{\Omega}r\right) w(r)$$

уравнение (11) приводится к виду:

$$r \frac{d^2 w}{dr^2} + \left(1 + 2|m| + \frac{2\omega_0^2 r_0}{\Omega}r - 2\Omega r^2\right) \frac{dw}{dr} + \left(2\beta r + \frac{\omega_0^2 r_0 (1 + 2|m|)}{\Omega}\right) w = 0, \quad (12)$$

где через β обозначена следующая комбинация параметров

$$\beta = \tilde{E} - \Omega(|m| + 1) + \frac{\omega_0^4 r_0^2}{2\Omega^2} - \frac{\omega_0^2 r_0^2}{2}. \quad (13)$$

Уравнение (12) – биконфлюэнтное уравнение Гойна (К. Heun, 1889) [15], [16]. В общем случае точное решение задачи (12) получить невозможно, поскольку специальные функции, удовлетворяющие этому уравнению, на данный момент изучены плохо. Однако налагая определённые условия на параметры уравнения (12), возможно получить отдельные точные решения. Эти решения сами по себе весьма ограничены в использовании, однако, как показано ниже, могут быть использованы как базисные при нахождении энергии основного состояния вариационным методом Ритца. Для их нахождения разложим функцию $w(r)$ в степенной ряд

$$w(r) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^n \quad (14)$$

Подставив (14) в (12), и приравняв слагаемые при одинаковых степенях r , найдём рекуррентное соотношение между коэффициентами ряда (14):

$$A_1 = -\frac{\omega_0^2 r_0}{\Omega} A_0, \quad (15)$$

$$A_{n+1} = \frac{2[\Omega(n-1) - \beta]\Omega A_{n-1} - \omega_0^2 r_0 (1 + 2|m| + 2n) A_n}{(n+1)(n+2|m|+1)\Omega}. \quad (16)$$

Для того, чтобы получить полиномиальное решение уравнения (12), ряд (14) необходимо оборвать. Обрыв ряда достигается наложением определённых ограничений на параметры, входящие в уравнение (12). Чтобы организовать обрыв ряда на n -ом члене, необходимо, чтобы два последующих члена одно-

временно были равны нулю. В частности, чтобы оборвать ряд на 1-м члене, нужно чтобы $A_2 = 0$ и $A_3 = 0$. Данная ситуация возможна тогда, когда:

$$\Omega = \left[\frac{\omega_0^4 r_0^2 (3 + 2|m|)}{2} \right]^{1/3}, \quad (17)$$

$$\beta = \Omega. \quad (18)$$

Выражение (17) показывает, что точное значение энергии,

$$E = \Omega(|m| + 2) + \frac{\omega_0^2 r_0^2}{2} - \frac{\omega_0^4 r_0^2}{2\Omega^2} - \frac{m\omega_B}{2}, \quad (19)$$

вытекающее из формулы (18), отвечает конкретному значению гибридной частоты Ω , т. е, вполне определенному значению величины внешнего магнитного поля. Волновая функция этого состояния равна

$$\psi_1(r, \varphi) = A_0 r^{|m|} \exp\left(-\frac{\Omega}{2} r^2 + \frac{\omega_0^2 r_0}{\Omega} r - im\varphi\right) \left(1 - \frac{\omega_0^2 r_0}{\Omega} r\right). \quad (20)$$

В силу осцилляционной теоремы, состояние (19). (20) соответствует первому возбуждённому состоянию. Для основного состояния в данной задаче точные решения в аналитической форме найти не удаётся.

В работе [11] численными методами проводится подробное сравнительное исследование моделей Волкано и Хилла. В цитированной статье был найден радиус кольца, при котором энергия электрона минимальна, построены графики энергии электрона в потенциальной яме Хилла. Показано, что потенциал Хилла лучше описывает свойства экспериментальных образцов, чем потенциал Волкано по следующим причинам:

1. Модель Волкано не даёт радиуса, при котором энергия электрона минимальна, сходного с найденным.
2. Точки перестройки состояний, получаемые с помощью модели Хилла, ближе к экспериментальным.

Естественно, глубокое преимущество потенциала Волкано по сравнению с другими аналогичными потенциалами, состоит в том, что электронные состояния в нем возможно найти точно, поскольку уравнение Шредингера приво-

дится к гипергеометрическому виду. В противоположность, класс потенциалов, для которых уравнение Шредингера приводится к уравнению Гойна, еще не описан, хотя некоторые предварительные результаты приведены в монографии [16].

Следует отметить, что электронные состояния в потенциале Хилла были найдены численно ещё в [17]. Данный удерживающий потенциал выбирался в этой работе в следующем виде:

$$U(r) = \alpha(1 - r/r_0)^2.$$

Приведём наглядные изображения потенциала Хилла, данные в [17] для различных значений параметра α при $r_0 = 10$ (рис. 7).

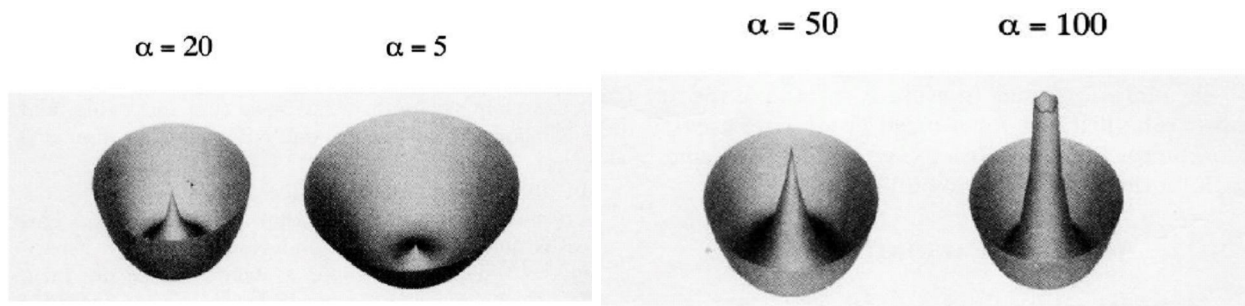


Рисунок 7 – Удерживающий потенциал с различными α и радиусом $r_0 = 10$

Альтернативная модель кольца

Немалый интерес представляет исследование потенциальных ям, отличных от Волкано и Хилла. Данное исследование актуально тогда, когда возможно на этапе изготовления или в процессе эксплуатации контролировать форму удерживающего потенциала низкоразмерного квантового объекта. В качестве альтернативы моделям Хилла и Волкано для квантового кольца, нами предлагается потенциал следующего вида

$$U(r) = \frac{b^2}{16}r^6 - \alpha r^2 + U_0, \quad (21)$$

где $\alpha > 0$, и параметр U_0 выбирается так, чтобы потенциальная энергия (35) была всюду неотрицательной. По аналогии с широко используемым в молекулярной физике потенциалом Леннарда-Джонса, который имеет также название

«потенциал «12-6»», назовем (21) потенциалом «6-2». Потенциал (21) имеет минимум при $r_0 = (16\alpha/3b^2)^{1/4}$, что позволяет зафиксировать аддитивную константу значением $U_0 = \alpha r_0^2 - \frac{b^2}{16} r_0^6$. Преимущество потенциала «6-2» состоит в том, что при $\alpha \leq 0$ или при $\alpha > 0$ в присутствии внешнего магнитного поля достаточной величины потенциал $U(r)$ моделирует квантовую точку. Итак, низкоразмерная система (21) при критическом значении магнитного поля скачкообразно меняет свой тип: квантовое кольцо становится квантовой точкой. Данный факт может оказаться важным в будущем при создании различных триггеров на основе полупроводниковых низкоразмерных систем. Кроме того, сохраняя положительные черты потенциала Хилла, данный потенциал позволяет найти и исследовать как основное состояние, так низколежащие возбужденные состояния, и продемонстрировать перестройку энергетических уровней, сопровождающуюся появлением устойчивого тока.

При решении уравнения Шрёдингера положим, как и выше, $\hbar = 2\mu = e = 1$. Уравнение Шрёдингера для электрона в потенциальной яме (21) и перпендикулярном плоскости системы в однородном перпендикулярном магнитном поле имеет вид (8) с потенциалом (21). Поскольку потенциал «6-2» SU(2)-инвариантен, представим волновую функцию в виде $\psi(r, \varphi) = f(r) \exp(-im\varphi)$, тогда уравнение Шрёдингера приводится к следующему виду

$$-\left(\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} + \frac{m^2}{r^2} f\right) + \left(\frac{b^2}{16} r^6 - \alpha r^2\right) f = \tilde{E} f, \quad (22)$$

где $E = \tilde{E} + U_0 - \frac{m\omega_B}{2}$. Заменой $\xi = r^2$, $f(\xi) = \xi^{|m|/2} \exp(-b\xi^2/16) w(\xi)$ уравнение (22) приводится к биконфлюэнтному уравнению типа Гойна

$$\xi \frac{d^2 w}{d\xi^2} + \left(1 + |m| - \frac{b}{4} \xi^2\right) \frac{dw}{d\xi} + \left[\frac{2\alpha - b(2 + |m|)}{8}\right] \xi w + \tilde{E} w = 0. \quad (23)$$

Уравнение (23) относится к тому же типу, что и уравнение (12), аналитическое решение его возможно только при определенных соотношениях между a и b , и для их нахождения ищем решение (23) в виде

$$w(\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \xi^n. \quad (24)$$

Подставив (24) в (23) и приравняв коэффициенты при одинаковых степенях ξ к нулю, получим рекуррентные соотношения между коэффициентами ряда

$$A_1 = -\frac{\tilde{E}}{1+|m|} A_0, \quad A_{n+1} = \frac{[b(2n+|m|) - 2\alpha] A_{n-1} - 8\tilde{E}A_n}{8(1+n)(1+|m|+n)}. \quad (25)$$

Формулы (25) показывают, что в отличие от уравнений гипергеометрического типа [18], уравнения класса Гойна приводят к рекуррентным соотношениям, охватывающим три подряд идущих коэффициента, поэтому условие обрыва ряда (25) дает, во-первых, не только уровни энергии, но и упомянутое выше соотношение, и, во-вторых, оказывается возможным получить только ограниченное число решений уравнения Шредингера. Перечислим эти решения.

При $m = 0$ аналитические решения возможны при $\alpha = nb$, их явный вид приведен в таблице 1.

Точно такой же ряд решений можно получить и для других значений квантового числа m . Нами найдены волновые функции и уровни энергии для основного состояния при $m = 1$ и 2 , которые, ввиду громоздкости, здесь не приводятся.

Таким образом, мы видим, что существуют ключевые значения α , при которых имеют место точные решения уравнения Шредингера. В промежутках между этими точками найти точное решение невозможно, поэтому для них развит вариационный метод [18], [19], результаты которого приведены ниже. Выбирая потенциал «6-2» при $\alpha = 3b$ как опорный, и учитывая наличие внешнего магнитного поля, влияние которого сводится к изменению параметра α , заменим (21) потенциалом следующего вида

$$U(r) = \frac{b^2}{16} r^6 - (3b - x)r^2 + U_0. \quad (26)$$

Параметр x связан с циклотронной частотой соотношением $x = \omega_B^2/16$.

Таблица 1. Уровни энергии и волновые функции некоторых состояний частицы в поле потенциала «6-2» при $m = 0$

$\alpha = b$	Основное состояние $\psi_{0,b} = A_0 \exp(-br^4/16), \tilde{E}_{0,b} = U_0$
$\alpha = 2b$	Основное состояние $\psi_{0,2b} = A_0 \exp(-br^4/16)(1 + r^2\sqrt{b}/2), \tilde{E}_{0,2b} = U_0 - 2\sqrt{b}$ Первое возбужденное состояние $\psi_{1,2b} = A_0 \exp(-br^4/16)(1 - r^2\sqrt{b}/2), \tilde{E}_{1,2b} = U_0 + 2\sqrt{b}$
$\alpha = 3b$	Основное состояние $\psi_{0,2b} = A_0 \exp(-br^4/16)(1 + r^2\sqrt{3b}/2 + br^4/4), \tilde{E}_{0,3b} = U_0 - 2\sqrt{6b}$
$\alpha = 4b$	Основное состояние $\psi_{0,2b} = A_0 \exp(-br^4/16)(1 + b^{1/2}\beta r^2 + b\gamma r^4 + b^{3/2}\sigma r^6),$ $\tilde{E}_{0,3b} = U_0 - 4\beta,$ где $\beta = \sqrt{10 + \sqrt{73}}/2, \gamma = (7 + \sqrt{73})/16, \sigma = (\sqrt{73} - 1)\beta/114$

Опираясь на результаты, приведенные в таблице, выберем пробную волновую функцию основного состояния при $m \neq 0$ в виде

$$\psi_{0m}(r, \varphi) = A_0 r^m \exp(-br^4/16 - im\varphi)(1 + Zr^2), \quad (27)$$

где Z – варьируемый параметр. Следуя методу, минимизируем среднее значение $\langle \psi_{0m} | H | \psi_{0m} \rangle$ гамильтониана

$$H = -\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{b^2}{16} r^6 - (3b - x)r^2.$$

Результаты расчета параметра Z для основного состояния при $m = 0, 1, 2$ и $b = 1$ приведенные на рисунке 8, демонстрируют, что использование выражений, полученных минимизацией $\langle \psi_{0m} | H | \psi_{0m} \rangle$, корректно лишь для определённых промежутков значений x .

Действительно, графики рис. 6 демонстрируют, что, начиная с некоторого значения x параметр Z принимает отрицательные значения, и у волновой функции (69) появляется нуль, что невозможно для волновой функции основ-

ного состояния, т. е., вариационный метод становится противоречивым. Расчёты также показывают, что с увеличением величины углового момента m значение вариационного параметра уменьшается, поэтому при его больших значениях радиальную часть волновой функции основного состояния с достаточной степенью точности можно аппроксимировать выражением $f(r) = A_0 \exp(-br^4/16)$.

В связи с этим для разрешения указанного выше противоречия, выберем варьируемую волновую функцию, описывающую основное состояние частицы в яме (21), в виде

$$\psi_{0m}(r, \varphi) = A_0 r^{|m|} \exp(-Zr^4 - im\varphi).$$

Повторяя процедуру минимизации среднего значения гамильтониана, получим, полагая, как и выше, $b = 1$, следующий результат

$$Z = \frac{2x - 6 + \sqrt{48 - 24x + 4x^2 + 12|m| + 3m^2}}{16(|m| + 2)}.$$

Значение энергии основного состояния, полученное вычислением $\langle \psi_{0m} | H | \psi_{0m} \rangle$ при найденном значении Z

$$E_{0m} = U_0 + \langle \psi_{0m} | H | \psi_{0m} \rangle - 2m\sqrt{x}$$

приведены на рисунке 9.

Графики, приведенные на этом рисунке, показывают, что в области слабых магнитных полей (малые значения x) имеются точки перестройки состояний, характерные для колец Волкано и Хилла, рассмотренных ранее. Коренное отличие данной модели в следующем. В отсутствие магнитного поля ($x = 0$) состояние с $m = 0$ является основным, в согласии с тем, что в этом случае отсутствует дополнительная энергия, связанная с орбитальным движением частицы.

С увеличением магнитного поля вначале имеет место перестройка уровней, как в моделях Хилла и Волкано, вследствие чего в основном состоянии у частицы появляется орбитальный момент, а затем, при дальнейшем возрастании величины магнитного поля, имеет место возвращение электрона к состоянию с $m = 0$. Данный результат ожидаем, поскольку с возрастанием величины

магнитного поля происходит трансформация квантового кольца, имеющего место при $3b - x > 0$ в квантовую точку при $3b - x \leq 0$, а, как известно, состояние с $m = 0$ для квантовой точки является наиминимумом. Как отмечалось выше, в состоянии с $m \neq 0$ возникает устойчивый ток, который исчезает при $m = 0$. Таким образом, для потенциала «6-2» возникает перспектива создания управляющего нанозлемента, состояние которого переключается внешним магнитным полем. Такие управляющие элементы могли бы найти применение в полупроводниковой нанoeлектронике.

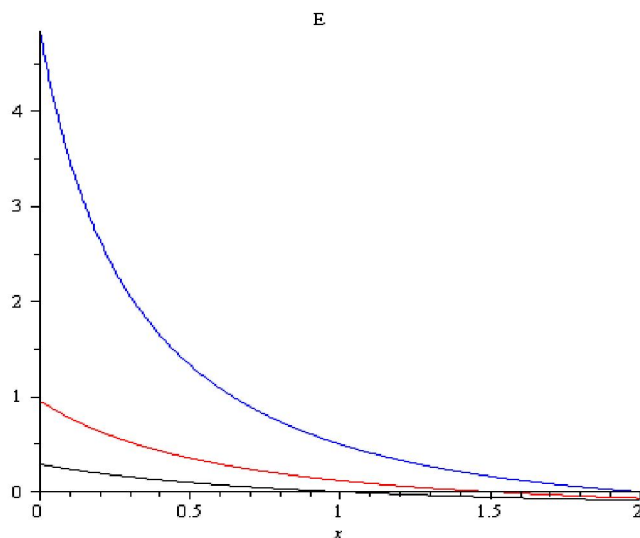


Рисунок 8 – Зависимость вариационного параметра Z от величины x для значений (сверху вниз) $m = 0, 1, 2$

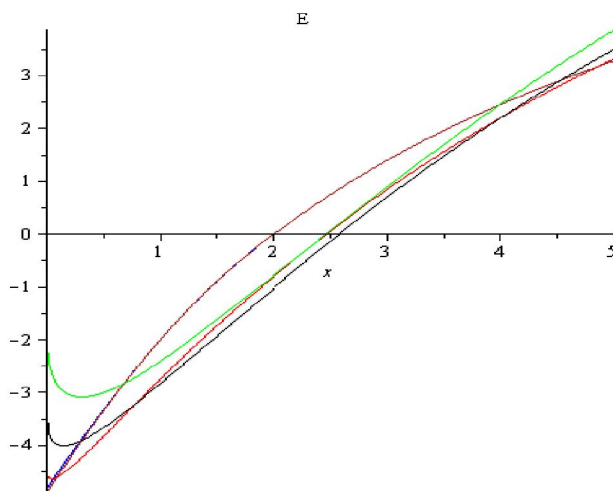


Рисунок 9 – Зависимость энергии E (ед-цы Хартри, без U_0) основного состояния от параметра ямы x для значений $m = 0, 1, 2, 3$ (снизу вверх по оси E)

Библиографический список

1. Luque A., Marti A., Nozik A.J. Solar cells based on quantum dots: multiple exciton generation and intermediate bands // MRS bulletin, Vol. 32, March 2007, P. 236-241.
2. Гуртовой В.Л., Дубонос С.В., Никулов А.В. и др. Зависимость величины и направления устойчивого тока от величины магнитного потока в сверхпроводящих кольцах // ЖЭТФ, 2007, Т. 132. С.1320-1339.
3. Maksym P.A., Chacroborty T. Quantum Dots in a Magnetic Field: Role of Electron-Electron Interactions // Phys. Rev. B, 1990, Vol. 65, № 1, P.108-111.
4. Castelano L.K., Hai G.-Q, Partoens B., Peeters F.M. // Artificial molecular quantum rings: Spin density functional theory calculations. Jan. 9, 2007 (Engl.), URL: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0701185.pdf>
5. Kleemans N.A.J.M., Bominaar-Silkens I.M.A., e.t.c. Oscillatory Persistent Currents in Self-Assembled Quantum Rings // Phys. Rev. Letters 99, 2007, P. 146808 – 146808-4.
6. Marlion Rincon Fulla. One and two-particle systems in toroidal quantum nanorings under adiabatic approximation. Universidad Nacional de Colombia sede medellín facultad de ciencias escuela de física, 2010, 67 pp.
7. Tan W.C., Inkson J.C. Magnetization, persistent currents, and their relation in quantum rings and dots // Phys. Rev. B, 1999, Vol. 60, №15, P. 5626-5635.
8. Маргулис В.А., Миронов В.А. Магнитный момент кольца Волкано // Физика твёрдого тела, 2008, Т. 50, вып. 1, стр. 148-153.
9. Veivers S., Koshkinen P. e.t.c. Quantum rings for beginners: Energy spectra and persistent currents // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2008, Vol. 21, P. 1-35.

10. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику. М.: изд-во «Физматлит», 2004, 304 с.
11. Simonin J., Proetto C.R., Barticevic Z., Fuster G. Single-Particle electronic spectra of quantum rings: A comparative study // *Phys. Rev. B*, 2004, Vol.70, P.205305 – 205305-8.
12. Васильченко А.А., Бунякин А.В., Сыромятников П.В. Осцилляции неза-
тухающего тока в квантовых кольцах в сильном магнитном поле // *Экологиче-
ский вестник научных центров ЧЭС*, 2010, №3, стр. 13-15.
13. Climente J.L., Pannelles J. Nanoscopic semiconductor quantum ring // *Contri-
butions to science*, 2007, Vol. 3, № 4, P.447-457.
14. Reimann S.M., Manninen M. Electronic structure of quantum dots // *Reviews
of modern physics*, 2002, Vol. 74, P. 1224-1236.
15. Ronveaux A. (ed.) Heun's differential equations. Oxford University press, Ox-
ford, 1995, 320 pp.
16. Славянов С.Ю., Лай В. Специальные функции: Единая теория, основан-
ная на анализе особенностей. СПб.: изд-во «Невский Диалект», 2002, 312 с.
17. Chakraborty T., Pietilainen P. Electron-Electron interaction and the persistent
current in a quantum ring // *Phys. Rev. B*, 1994, Vol. 50, № 12, P. 8460-8468.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская тео-
рия. М.: Физматлит, 2008, 800 с.
19. Давыдов А. С. Квантовая механика. М.: «Наука», 1973, 703 с.

СКАЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИИ

Шестаков Ю.И.

Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва.

Квazarы, гамма – всплески, спектр ярких радиоисточников и многое другое, получили возможное объяснение в рамках предложенной скалярной модели гравитации. Гравитационный коллапс звезды или скопления звезд и, в частности Вселенной, сопровождается стремлением геометрических и физических характеристик соответствующего объекта к конечным пределам. Модель не нуждается в привлечении гипотезы о темной энергии и антигравитации, так как ускоренное разбегание галактик является следствием неравномерного изменения масштабного фактора, а не силами.

Ключевые слова: Время; вселенная; гамма всплеск; гравитационные волны; квазар; коллапс; пространство; радиоисточник; темная материя; темная энергия; черная дыра.

Содержание

1. Введение. Исходные постулаты.
2. Потенциал
 - 2.1. Функция Лагранжа
3. Коллапс
4. Инфинитные траектории фотонов
5. «Черные дыры» и их спутники.
6. Гравитационные волны.
7. Приведенные потоки
8. Вероятная природа квазаров
9. Вероятная природа гамма - всплесков
10. Основные итоги
11. Приложения.

12. Библиографический список.

1. Введение. Исходные постулаты.

Новейшие открытия астрономов такие как квазары или гамма всплески не находят объяснения в рамках существующих теорий гравитации.

Подсказкой, стимулирующей создание предлагаемой модели, явились яркие радиоисточники с «тепловым» спектром, смещенным в радиодиапазон. Смещение при этом составляет колоссальную величину z не менее 10^6 . Такое смещение можно получить в сильном поле сколлапсировавшей звезды- коллапсара (англ. *collapsar*, от англ. *collapsed star*), если допустить, что существует силовое взаимодействие фотона и гравитационного поля.

$$d\vec{P} / dt = \vec{g}E / c^2 \quad (0.21)$$

Здесь \vec{g} - напряженность гравитационного поля (далее – напряженность поля); E - полная энергия фотона или любой другой частицы.

Предлагаемая модель гравитации построена на основе трех постулатов. Предпочтение было отдано наиболее известным и проверенным утверждениям.

Первый постулат: скорость света постоянна, и является предельной скоростью движения любых материальных объектов, (исключая пекулярное изменение расстояния, обусловленное свойством пространства менять масштаб в зависимости от гравитационного потенциала).

Второй постулат: масса любой частицы связана с полной энергией частицы, за исключением потенциальной энергии во внешнем поле, знаменитой формулой Эйнштейна $E = mc^2$.

Выбор третьего постулата необходимо тщательно обосновать, потому, что он обладает существенной новизной по сравнению с уже названными постулатами. Он утверждает, что масштаб длины и масштаб времени зависит от гравитационного потенциала. Иначе говоря, эталон длины (линейка), как и любые тела, уменьшаются в размере по мере погружения в потенциальную яму (по мере приближения к тяжелому небесному телу), а часы замедляют свой ход.

Этот выбор частично упрощается тем, что уже из первых двух принятых постулатов вытекает как следствие эффект замедления времени в потенциальной яме. Прделаем несложное рассуждение.

При падении в потенциальную яму энергия фотона растет. Скорость фотона при этом не меняется в соответствии с первым постулатом. Его энергия, связана с частотой формулой $E = h\nu$ и растет за счет увеличения частоты. Отсюда мы и увидим, что время в потенциальной яме замедляется.

Пусть, например, на башне расположен источник монохроматического излучения, а на поверхности Земли приемник. За каждый оборот Земли число испущенных волн должно равняться числу принятых $N_{Rad} = N_{Acc}$, потому что волны не могут стационарно накапливаться или исчезать между приемником и источником. Если считать, что на башне и на Земле за один оборот Земли прошло одинаковое число секунд, то и частоты получатся одинаковыми, потому, что $\nu = N / t$. Рост частоты $\nu_{Acc} > \nu_{Rad}$ означает замедление времени у приемника. (Рис. 1.)

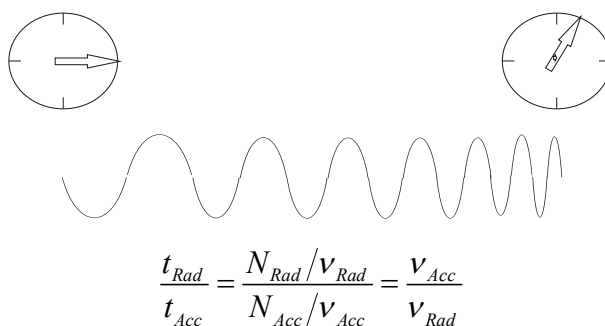


Рис. 1 Связь хода времени и частоты сигнала.

Подробный расчет (Приложение 1.) показывает, что частота фотона, по мере погружения в потенциальную яму возрастает $\nu / \nu_0 = e^{-\Phi} = z$ в соответствии с (П1-6). Время соответственно замедляется $t_0 / t = z$ в соответствии с (П1-7). t - время в потенциальной яме, t_0 - время вдали от небесного тела, $\Phi = \varphi / c^2$ - без-

размерный потенциал или глубина потенциальной ямы. Индексом $_0$ всюду отмечены величины, измеренные в пространстве с нулевым потенциалом.

Убедимся в том, что не только время замедляется в потенциальной яме, но и сокращаются размеры всех тел. Для этого проанализируем результаты эксперимента по зондированию Венеры [1, с. 1] (Рис. 2). В таком эксперименте радиосигнал с Земли посылали на Венеру и измеряли время возврата сигнала на Землю. Выбирали момент, когда Венера почти скрывалась за Солнцем, так чтобы радиолуч проходил рядом с Солнцем.

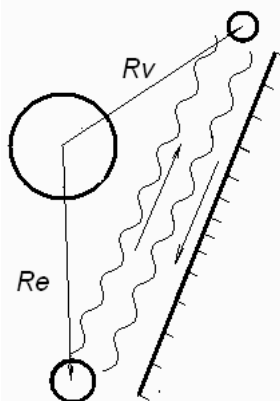


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению задержки радиосигнала, отраженного от Венеры и проходящего вблизи Солнца.

Близость Солнца увеличивала время прохождения луча на 0,2 миллисекунды. Учет замедления времени способен объяснить задержку только на 0,1 миллисекунды. Это позволило сделать удачное предположение о том, что эталон длины сокращается по мере приближения к Солнцу. Расчет (Приложение 2) показал, что длина эталона может быть связана с потенциалом формулой $l = l_0 e^{\Phi}$.

В соответствии с этим, элементы траектории, измеренные укороченным эталоном длины, получают увеличенные значения.

$$\frac{dx}{dx_0} = \frac{dy}{dy_0} = \frac{dz}{dz_0} = \frac{dt_0}{dt} = e^{-\Phi} = z \quad (0.22)$$

или

$$\frac{d\bar{R}}{d\bar{R}_0} = \frac{dt_0}{dt} = e^{-\Phi} \quad (0.23)$$

x, y, z, t - координаты, измеренные реальным эталоном;

x_0, y_0, z_0, t_0 - координаты, измеренные неизменным (условным) эталоном.

Величина $e^{-\Phi} = z$ будет часто встречаться в статье, и надо обратить внимание, что это и красное смещение фотона выходящего из потенциальной ямы, и коэффициент замедления времени в потенциальной яме, и коэффициент сокращения эталона длины, и коэффициент увеличения полной энергии частицы, падающей в потенциальную яму. Эта величина меняется в широких пределах и может достигать величины $\sim 10^9$.

Введем для удобства условное плоское фоновое пространство, в котором эталон длины не меняется и будем рассматривать реальное пространство на его фоне.

Из (1.2) следует, что якобиан преобразования имеет вид

$$J = \begin{vmatrix} z^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z \end{vmatrix} = z^2 \quad (0.24)$$

Соответственно, метрический тензор плоского пространства преобразуется в следующий

$$g^{ik} = \frac{dx^i}{dx^{0i}} \frac{dx^k}{dx^{0m}} g^{lm0} = \begin{vmatrix} z^{-2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -z^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -z^2 \end{vmatrix} \quad (0.25)$$

Поскольку векторы преобразуются в коллинеарные векторы, то якобианы преобразования для поверхностей и объемов имеют диагональную форму и равны соответственно для поверхности

$$\frac{D(x, y)}{D(x_0, y_0)} = e^{-2\Phi} \quad (0.26)$$

и для объема

$$\frac{D(x, y, z)}{D(x_0, y_0, z_0)} = e^{-3\Phi} \quad (0.27)$$

В приложении 2 показано, что принятое преобразование масштабов пространства и времени обеспечивает выполнение сразу двух тестов: на задержку и на отклонение луча в поле Солнца.

После проведенного обоснования сформулируем третий постулат:

В потенциальной яме время замедляется, а расстояния, измеренные укороченным эталоном, увеличиваются в соответствии с формулой (1.2)

Если потенциал меняется со временем линейно, то и эталон длины меняется линейно, поэтому каждое новое измерение обнаружит дополнительное линейно возрастающее расстояние между телами. Происходит пекулярное движение. В случае если потенциал меняется нелинейно со временем, то измерения обнаружат дополнительное (независящее от действующих сил) пекулярное ускорение.

Рассмотрим теперь вопрос о применимости модели пространства Минковского. В разных точках деформированного пространства время идет по-разному. Удобно ввести всеобщее время, измеряемое числом оборотов массивного источника гравитации. Рассмотрим подвижную систему координат на фоне неподвижной системы координат. Пусть движение происходит вдоль сонаправленных осей x и x' . За один оборот небесного тела все точки оси x' должны смещаться на одинаковое число метров относительно оси x иначе будет меняться соотношение масштабов. Поскольку один оборот небесного тела будет происходить за разное локальное время, то скорости разных точек будут разные. $V_1 / V_2 = e^{\Phi_1 - \Phi_2}$ Соответственно Лоренцево сокращение тоже разное $\gamma = \gamma(\Phi)$. В областях пространства, достаточно малых для того, чтобы можно было считать потенциал постоянным, события происходят в пространстве Минковского. Но, строго говоря, только неподвижная относительно источника гравитации система координат в гравитационном поле является инерциальной. Неоднородное преобразование масштаба соответствует переходу от пространства

Минковского, (вдали от источника поля) к Риманову пространству (вблизи источника поля).

Завершая описание пространства, дадим определение расстояния между точками $M_1(x_1, y_1, z_1)$ и $M_2(x_2, y_2, z_2)$, неподвижными относительно источника поля, как произведение скорости света на интеграл локального времени прохождения светового сигнала от точки M_1 до точки M_2 вдоль «геодезической линии», соединяющей эти точки на которой этот интеграл имеет минимальное значение.

$$d(M_1, M_2) = c \int_{M_1}^{M_2} d\tau \quad (0.28)$$

При рассмотрении центрально симметричной задачи потенциал зависит только от радиуса. Поэтому круговые орбиты являются эквипотенциальными. Орбита, имеющая относительно плоского пространства длину $L_0 = 2\pi R_0$ в реальном пространстве измеряется укороченным эталоном и потому имеет длину

$$L = 2\pi R_0 e^{-\Phi} \quad (0.29)$$

Поверхность эквипотенциальной сферы в реальном пространстве получает значение в соответствии с якобианом преобразования (1.6).

$$S = 4\pi R_0^2 e^{-2\Phi} \quad (0.30)$$

На рис.3 показаны эквидистантные орбиты в плоском и реальном пространствах с позиции внешнего наблюдателя (расположенного вдали от источника гравитации). Введем обозначение

$$R_{Eff} = R_0 e^{-\Phi} \quad (0.31)$$

и перепишем (1.9) и (1.10) в виде

$$L = 2\pi R_{Eff} \quad (0.32)$$

$$S = 4\pi R_{Eff}^2 \quad (0.33)$$

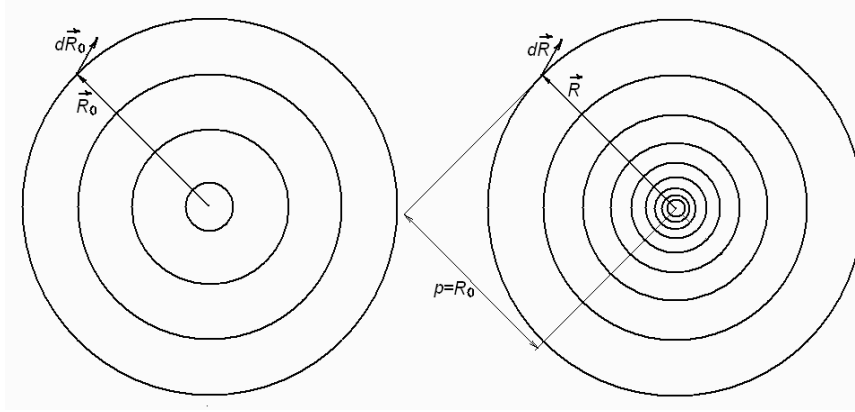


Рис. 3. Эквидистантные орбиты в плоском и реальном пространстве.

2. Потенциал.

Напряженность поля с учетом (1.10) равна плотности силовых линий

$$g = -\frac{MG}{R_0^2 e^{-2\Phi}} \quad (0.34)$$

Учитывая, так же что напряженность поля есть градиент потенциала

$$g = -\frac{c^2 d\Phi}{dR_0} \frac{dR_0}{dR} = -c^2 \frac{d\Phi}{dR_0 e^{-\Phi}} \quad (0.35)$$

и приравнивая правые части (2.1) и (2.2) получим уравнение

$$e^{-\Phi} d\Phi = \frac{MG}{c^2} \frac{dR_0}{R_0^2} = r_m \frac{dR_0}{R_0^2} \quad (0.36)$$

$r_m = \frac{MG}{c^2}$ - удобно назвать массовым или минимальным радиусом. Интегрируя

(2.3), получим

$$\Phi = -\ln\left(1 + \frac{MG}{R_0 c^2}\right) = -\ln\left(1 + \frac{r_m}{R_0}\right) \quad (0.37)$$

Единица под знаком логарифма получилась из условия нормировки

$$\lim_{R_0 \rightarrow \infty} \Phi = 0.$$

Из (2.4) следует

$$e^{-\Phi} = 1 + \frac{r_m}{R_0} \quad (0.38)$$

Из (2.5) и (1.11) видно, что

$$\boxed{R_{\text{eff}} = R_0 e^{-\Phi} = R_0 + r_m} \quad (0.39)$$

Это принципиальная формула, показывающая, что эффективный радиус небесного тела или звездного скопления не может стать меньше r_m , что важно при рассмотрении коллапса.

Формула (2.1) может быть переписана в виде

$$g = -\frac{MG}{R_{\text{eff}}^2} \quad (0.40)$$

2.1. Функция Лагранжа

Строго говоря, гравитационное поле не является потенциальным или вихревым и корректно написать функцию Лагранжа для пробной частицы в гравитационном поле нельзя. Дело в том, что работа поля на замкнутой траектории отлична от нуля и зависит от соотношения скоростей на восходящих и нисходящих участках траектории. На рисунке 4 показана вертикально расположенная замкнутая труба переменного сечения. Пусть жидкость, заполняющая трубу, опускается по узкой части трубы, а поднимается по широкой. Релятивистская зависимость массы от скорости приводит к тому, что каждый моль жидкости тяжелее при опускании, чем при подъеме и соответственно работа силы тяжести на замкнутом пути отлична от нуля. В части о квазарах показано, что аналогичный процесс наработки энергии происходит в окрестности квазаров и объясняет неистощимость этих источников.

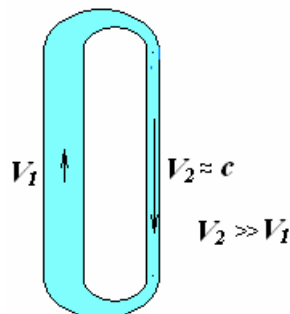


Рис. 4. Пример иллюстрирующий непотенциальность гравитационного поля.

Указанная особенность гравитационного поля не позволяет корректно использовать вариационный метод для описания движения или получения уравнений самого поля. Ниже будет показано, что деятельность квазаров делает время неоднородным и наработка энергии не противоречит теореме Нетер. К сожалению, многие теоретики безапелляционно отклоняют любой подход кроме вариационного. Подходя формально, можно придумать функцию Лагранжа и получить из нее стандартным методом уравнение движения для пробной частицы.

Функция Лагранжа в отсутствии поля имеет вид

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.1.1)$$

Потенциальная энергия с учетом соотношения $E = E_0 e^{-\Phi}$ (Приложение 1),

$$U = E_0 - E = E_0 (1 - \exp(-\Phi)) \quad (2.1.2)$$

Учитывая вид потенциала (2.4) получим

$$U = -E_0 \frac{r_m}{R_0} \quad (2.1.3)$$

Функция Лагранжа в поле

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + E_0 \frac{r_m}{R_0} \quad (2.1.4)$$

По стандартной процедуре

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dv} = \frac{dL}{dR}$$

Получим

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{E_0 r_m}{R_0^2} \frac{dR_0}{dR} = -\frac{E_0 r_m}{e^{-\Phi} R_0^2} = -\frac{E r_m}{e^{-2\Phi} R_0^2} = -\frac{GME / c^2}{(R_0 + r_m)^2} = g(E / c^2). \quad (2.1.5)$$

Стандартная процедура дала правильный результат лишь потому, что была искусственно введена потенциальная энергия (2.1.2).

В действительности гравитационное поле не является потенциальным.

На этом я вынужден ограничить построение теории. Не аддитивный по массе потенциал (2.4) делает вычисление поля даже от двух источников очень

сложной задачей. Однако и полученный результат позволяет рассмотреть целый ряд интересных задач в приближении сферической симметрии.

3. Коллапс

Выпишем для удобства основные полученные формулы

Длина орбиты

$$L = 2\pi R_{\text{Eff}} \quad (3.1)$$

Поверхность сферы

$$S = 4\pi R_{\text{Eff}}^2 \quad (3.2)$$

Напряженность поля

$$g = -\frac{MG}{R_{\text{Eff}}^2} \quad (3.3)$$

$$R_{\text{Eff}} = R_0 + r_m \quad (3.4)$$

$r_m = \frac{MG}{c^2}$; R_0 - прицельный параметр орбиты.

Присутствие величины r_m в выражении для эффективного радиуса приводит к конечным предельным значениям всех характеристик коллапсирующего объекта. Когда прицельный параметр R_0 стремится к нулю, все геометрические и физические характеристики объекта стремятся к конечным пределам.

$$L \Rightarrow 2\pi r_m; \quad S \Rightarrow 4\pi r_m^2; \quad g \Rightarrow -\frac{MG}{r_m^2}$$

Объем стремится к величине.

$$V > \frac{4}{3}\pi r_m^3 \quad (3.5)$$

Знак $>$ стоит потому, что внутри звезды потенциал продолжает убывать, а эталон длины укорачивается. Отметим, что объем не пропорционален массе коллапсирующего объекта, а растет пропорционально массе в третьей степени. Поэтому достижимая при коллапсе средняя плотность (3.6) обратно пропорциональна квадрату массы или квадрату минимального радиуса.

$$\mu_{av} = \frac{M}{V} < \frac{3c^2}{4\pi G r_m^2} \quad (3.6)$$

В частности, коллапсирующая Вселенная в соответствии с (3.6) не может иметь большой плотности.

Оценим состояние Вселенной исходя из современной оценки ее массы $M_U = 2.4 \cdot 10^{53} \text{ kg}$. В соответствии с (2.4) $r_m = 1.8 \cdot 10^{26}$ метров или 18 миллиардов световых лет, что близко к наблюдаемому размеру. Предельная плотность коллапсирующей Вселенной естественно совпадает с современной оценкой $\Omega = 10^{-26} \text{ kg} / \text{m}^3$. Поэтому можно предположить, что Вселенная находится на поздней стадии коллапса, когда все ее геометрические и физические параметры приблизились к своим пределам. Разбегание галактик обусловлено ростом массы и потенциала вселенной. Соответствующее изменение пространственного масштаба ведет к пекулярному расширению вселенной и подробно описано в части 8. о квазарах. Там же рассчитано и ускорение.

Независимо от пекулярного расширения происходит обычное сжатие под действием сил тяготения. Рассчитаем скорости движения галактик к центру Вселенной без учета вращения Вселенной.

Расстояние галактики от центра Вселенной $R = zR_0$; z - масштабный фактор. Результирующая скорость с учетом изменения масштабного фактора

$$V = R_0 \frac{dz}{dt} + z \frac{dR_0}{dt} = R_0 \frac{dz}{dt} + \frac{dR}{dt} \quad (3.7)$$

В (3.7) учтено, что $z dR_0 = dR$; $v = dR/dt$ - скорость сжатия;

пекулярная скорость расширения.

$$\vec{v}_z = \vec{R}_0 \frac{dz}{dt} = \vec{R} \frac{1}{z} \frac{dz}{dt} = \vec{R} H_z \quad (3.8)$$

Назовем $H_z = \frac{1}{z} \frac{dz}{dt}$ масштабной постоянной

Распределение скоростей сжатия свяжем с потенциалом, созданным шаром радиусом R (Рис. 5) на границе которого находится некоторая галактика

$$\varphi \approx -\frac{MG}{R} \approx -\frac{4\Omega R^3 G}{R} \approx -4\Omega GR^2 \quad (3.9)$$

$$\bar{v} = -\sqrt{-2\varphi} = -\sqrt{8\Omega G \bar{R}} \quad (3.10)$$

Подставляя известную величину, $\Omega = 10^{-26} \text{ kg} / \text{ m}^3$ получим выражение.

$$v = -\sqrt{8\Omega G R} = -2.26 * 10^{-18} R \quad (3.11)$$

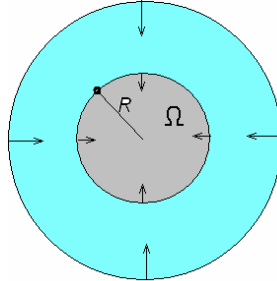


Рис. 5. Сжатие Вселенной под действием сил тяготения.

Новую константу

$$H_v = -\sqrt{8\Omega G} = -2.26 * 10^{-18} \text{ s}^{-1} \quad (3.12)$$

назовем постоянной сжатия.

Используя (3.8), (3.11) и (3.12) перепишем (3.7) в виде

$$V = R(H_z + H_v) \quad (3.13)$$

Постоянная Хаббла равна сумме.

$$H = H_z + H_v = 2.3 * 10^{-18} \text{ c}^{-1} \quad (3.14)$$

Отсюда

$$H_z = (2.3 + 2.26) 10^{-18} = 4.56 * 10^{-18} \text{ c}^{-1} \quad (3.15)$$

Рассмотрим коллапс компактного объекта.

Существование предельной плотности (3.6) приводит к существованию предельного давления. Максимальное давление в центре звезды оценим по формуле

$$P_g = \mu_{av} \frac{GM}{r_m^2} r_m \quad (3.16)$$

С учетом $r_m = \frac{MG}{c^2}$ получим

$$P_g \approx \mu_{av} c^2 \quad (3.17)$$

Подставляя $\mu_{av} \approx \frac{3c^2}{4\pi Gr_m^2}$ получим

$$P_g \approx \frac{c^4}{4Gr_m^2} \quad (3.18)$$

Следовательно, предельное давление обратно пропорционально квадрату массы. Максимальное предельное давление получается при минимальной массе коллапсирующей звезды, так называемом пределе Оппенгеймера – Волкова, около 3,5 масс Солнца. Для такой звезды

$$r_m = \frac{G3.5M_{\oplus}}{c^2} = 4.7 \cdot 10^3 m \quad (3.19)$$

$$P_{g_{\max}} \approx \frac{c^4}{4Gr_m^2} \approx \frac{81 \cdot 10^{32}}{4 \cdot 6.67 \cdot 10^{-11} (4.7 \cdot 10^3)^2} \approx 1.4 \cdot 10^{36} Pa \quad (3.20)$$

Согласно (3.18) чем больше звезда и больше r_m тем меньше предельное давление, возникающее при коллапсе. Если выразить массу звезды через массу Солнца $N_{\oplus} = M / M_{\oplus}$, то предельное давление можно записать так.

$$P_g \approx \frac{1.4 \cdot 10^{36}}{N_{\oplus}^2} \quad (3.21)$$

В приложении 3 показано, что существуют условия, при которых в процессе коллапса противодействие, обусловленное нагревом коллапсирующего объекта, превысит гравитационное давление. Нагрев объекта обусловлен поглощением внешнего излучения, мощность которого увеличивается в z^2 раз. При этом в z раз увеличивается энергия фотонов и в z раз уменьшается время поглощения в потенциальной яме. Поскольку при коллапсе z растет неограниченно, то соседние звезды способны разогреть объект до температуры, при которой давление излучения остановит коллапс.

$$\frac{\sigma T^4}{c} = \frac{1.4 \cdot 10^{36}}{N_{\oplus}^2} \quad (3.22)$$

С учетом (3-22) температура остановки составит

$$T_{Bal} = 10^{13} / \sqrt{N_{\oplus}} \quad (3.23)$$

Для достижения такой температуры потребуется $z \approx 10^{21} / N_{\oplus}$ (Приложение

3)

По закону Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{T} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{10^{13} / \sqrt{N_{\oplus}}} = 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} \quad (3.24)$$

Смещенное излучение, приходящее к Земле, будет иметь

$$\lambda_m = z \lambda_{\max} = \frac{10^{21}}{N_{\oplus}} 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} = 2.9 \cdot 10^5 / \sqrt{N_{\oplus}} \quad (3.25)$$

Максимум смещенного спектра окажется в радиодиапазоне если безразмерная масса источника $N_{\oplus} \approx 10^{11}$. При этом интенсивность спектра в метровом диапазоне (Приложение 4) соответствует яркостной температуре $T_{br} = 10^{16} K^0$ и мы получаем яркий радиоисточник с «тепловым спектром» в соответствии с тем, что наблюдают астрономы (рис. 6).

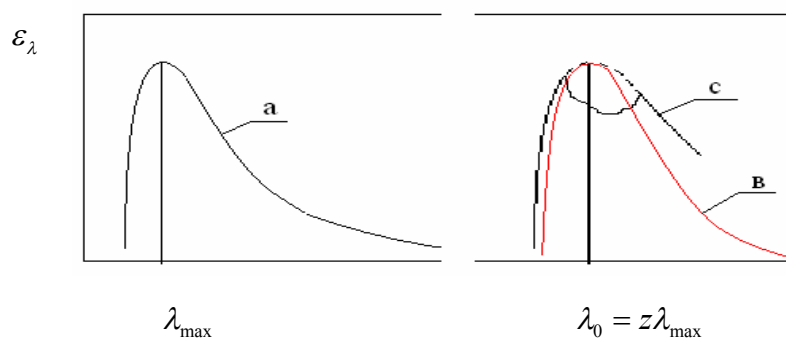


Рис. 6. Иллюстрация возможного механизма возникновения радиоисточников с «тепловым спектром»: а – тепловой спектр; в – тепловой спектр, смещенный в радиодиапазон; с – характерный спектр радиоисточника.

Таким образом, рассмотренный механизм показывает принципиальную возможность остановки коллапса. В реальности, действует совокупность сложных механизмов.

Отличие экспериментальных спектров от расчетного объясняется присутствующими механизмами уширения и поглощением в окружающей среде.

4. Инфинитные траектории фотонов.

Для понимания природы ярких радиоисточников важен факт существования инфинитных траекторий фотонов в сильных полях. Для движения по круговой орбите, центростремительное ускорение должно равняться напряженности поля

$$\frac{c^2}{R_0 + r_m} = \frac{MG}{(R_0 + r_m)^2} \quad (4.1)$$

после преобразований получаем соотношение,

$$1 = \frac{r_m}{R_0 + r_m} \quad (4.2)$$

которое выполняется только если прицельный параметр орбиты $R_0 = 0$.

Это значит, что круговых орбит для фотонов в центрально – симметричном поле не существует.

Форму траекторий можно понять при рассмотрении угла поворота импульса при движении фотона по короткому участку круговой траектории (Рис. 7, Рис. 8). Приращение радиального импульса равно произведению силы действующей на фотон на время движения по отрезку дуги.

$$\Delta P = \frac{h\nu}{c^2} \frac{MG}{R_{Eff}^2} \frac{R_{Eff} \delta}{c} \quad (4.3)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta P}{P} = \delta \frac{r_m}{R_{Eff}} \quad (4.4)$$

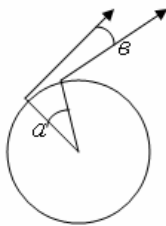


Рис. 7. Приращение импульса.

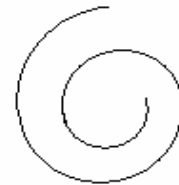


Рис. 8. Траектория фотона

Из (4.4) видно, что траектория фотона имеет вид расходящейся спирали (рис. 8).

Любая орбита фотона вылетевшего с поверхности звезды инфинитна. Из-за красного смещения

$$z = \frac{v}{v_0} = e^{-\Phi} \quad (4.5)$$

звезды с глубоким потенциалом воспринимаются как «черные дыры».

5. «Черные дыры» и их спутники.

Градиент поля в окрестности коллапсара имеет вид.

$$\frac{dE_G}{dR} = \frac{dE_G}{dR_0} \frac{dR_0}{dR} = \frac{2MG}{(R_0 + r_m)^3 (1 + r_m/R_0)} \quad (4.6)$$

В области, где $R_0 \gg r_m$

$$\frac{dE_G}{dR} \approx \frac{2MG}{R_0^3} \quad (4.7)$$

В области, где $R_0 \ll r_m$

$$\frac{dE_G}{dR} = \frac{2MGR_0}{r_m^4} \quad (4.8)$$

Значит при $R_0 \Rightarrow 0$ поле практически однородно, особенно для массивных черных дыр. Поэтому приливный механизм предельно мал и не мешает длительному существованию звезд спутников на глубоких орбитах.

На круговой орбите центростремительное ускорение равно напряженности поля $\frac{v_{sat}^2}{R_{Eff}} = \frac{MG}{R_{Eff}^2}$ следовательно, $v_{sat}^2 = c^2 \frac{r_m}{R_{Eff}}$ поэтому при $R_0 \ll r_m$ отношение

$\frac{r_m}{R_{Eff}} \approx 1$ и мы получим $v_{sat} \approx c$. Энергия спутников вычислена в приложении 5 формула (П5-1).

$$E_{sat} = mc^2 \sqrt{\exp(-\Phi)} = mc^2 \sqrt{z}$$

Период обращения спутника T по локальному времени для всех орбит, имеющих $R_0 \ll r_m$ не зависит от радиуса орбиты

$$\Phi \approx \frac{2\pi r_m}{c} = 2\pi \frac{GM}{c^3} \quad (4.9)$$

$$\omega = c / r_m \quad (4.10)$$

Так для черной дыры в соседней галактике имеющей массу $M = 2.8 \cdot 10^{38} \text{ kg}$ [3, с. 1] получим $T \approx 4.3 \cdot 10^3 \text{ sec}$ $\omega = 1,5 \cdot 10^{-3}$

Гравитационное излучение при такой частоте позволяет просуществовать спутнику около $t \sim 30$ миллионов лет в локальном времени или $t_0 = zt$ для земного наблюдателя. Поскольку это очень большое время то велика вероятность обнаружения спутников. Полученные значения для частоты и периода являются локальными. Для наблюдателя на Земле частота уменьшится в z раз.

Признаком для идентификации спутника является равенство смещений: частоты обращения $\omega_0 = \omega/z$ и частоты излучения $\nu_0 = \nu/z$.

6. Гравитационные волны

В случаях, когда пекулярным движением можно пренебречь $R dz/dt \ll V$ и вдали от источников 4-градиент поля не меняется при преобразованиях Лоренца.

$$\Delta\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = const$$

Для переменного поля в пустоте получим волновое уравнение.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \Delta\varphi$$

Расчет интенсивности гравитационных волн (Приложение 5) дает

$$I \approx \kappa \frac{GM^2 \omega^6 r_A^4}{c^5}, \quad (6.1)$$

что совпадает с результатом ОТО [2, с.455.].

7. Приведенные потоки

Интересно отметить, что дивергенция вектора в формуле Остроградского $\int_V \text{div} \vec{A} dV = \int_S \vec{A} d\vec{S}$ не характеризует плотность источников или стоков в сильных полях. Например, для стационарного потока жидкости по вертикальной трубе,

число молей, протекающих за секунду в разных сечениях, будет разным из-за разности хода времени. При этом источники или стоки в привычном понимании отсутствуют. По той же причине, в длинном вертикальном соленоиде, ток в нижних витках больше, чем в верхних. Соответственно магнитная индукция различна в разных сечениях соленоида. Соответствующие особенности движения в сильных полях иллюстрирует рисунок 9. На рисунке показано также, что связанные нерастяжимой нитью грузы, движутся по вертикали с разными скоростями. Однако формула Остроградского сохраняет прежний смысл для приведенного потока равного обычному потоку, деленному на масштабный фактор. Аналогичный вывод справедлив и для формул Грина и Стокса. Для приведенного потока

$$\int_V \operatorname{div} \frac{\vec{A}}{z} dV = \int_S \frac{\vec{A}}{z} d\vec{S} \quad (6.2)$$

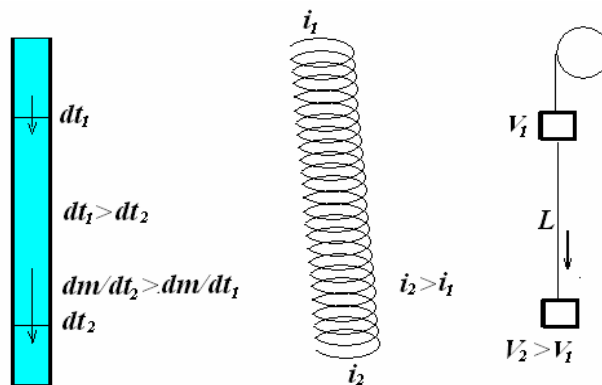


Рис. 9. Непривычные эффекты в сильных полях.

8. Вероятная природа квазаров

Квазары [5, с.1] уже давно привлекают интерес астрофизиков благодаря своим уникальным свойствам. По мере изучения этих объектов стало ясно, что это компактные объекты, светимость которых многократно превышает светимость целых галактик, содержащих сотни миллиардов звезд. Парадоксальной представлялась и переменность светимости этих объектов. Объект 3С 273 менял свой блеск за несколько лет почти на целую звездную величину, т.е. при-

мерно в 2.5 раза! Светимость 3С 273 приблизительно в сто раз превышает светимость нашей Галактики. Основной вопрос, связанный с квазарами, - это объяснение гигантского выделения энергии.

Предположим, что на центральный коллапсар галактики падает поток вещества, кинетическая энергия которого многократно превышает энергию покоя этого вещества. Кинетическая энергия этого вещества после столкновения с коллапсаром излучается в пространство. После сброса энергии масса вещества уменьшается в миллионы раз, приближаясь к массе покоя. Под давлением излучения это вещество выносится обратно в область низкого потенциала. Обратим внимание на то, что при падении масса вещества многократно превышает массу того же вещества при относительно медленном подъеме. По этой причине сила создаваемая давлением излучения пренебрежимо мала по сравнению с весом при падении. Иначе говоря, излучение не мешает веществу падать и набирать колоссальную кинетическую энергию, но способно поднять то же вещество в область нулевого потенциала с минимальной затратой энергии. Таким образом, в каждом цикле движения вещества вырабатывается гигантская энергия излучения. Энергия излучения, сравнимая с кинетической энергией падающего вещества в миллионы раз превышает энергию покоя вещества. Нестационарность падающего потока проявляется в виде переменной светимости квазаров.

Центральный поток вещества создает в большой окрестности квазара распределение массы $M(r) \sim r$, что обеспечивает постоянство окружных скоростей звезд в галактике [6, с. 1129]. Более точно, распределение массы с учетом скорости V_r центрального потока подчиняется соотношению $M(r) \sim r/V_r$. Это отражается на росте окружных скоростей звезд по мере удаления от центра галактики, где центральный поток вещества заметно тормозится.

Рассмотрим подробнее силы, действующие на частицу, падающую на коллапсар. Пусть D - диаметр частицы и $m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ - ее масса; $\beta = \frac{v}{c}$ - безразмерная скорость.

Помимо силы притяжения

$$\vec{F}_g = m\vec{g} = \gamma m_0 g \frac{-\vec{R}}{R} \quad (8.1)$$

на частицу действует давление излучения со стороны квазара

$$\vec{F}_v \approx \frac{\pi D^2}{4} \frac{I}{c} \frac{\vec{R}}{R} \quad (8.2)$$

I - плотность потока излучения (W / m^2)

Сила притяжения будет основной если

$$\gamma m_0 g > \frac{\pi D^2}{4} \frac{I}{c} \quad (8.3)$$

Учтем, что фактор γ может достигать величин $\sim 10^9$ при падении частицы в поле квазара. В этом случае давление излучения пренебрежимо мало.

Выброс вещества излучением может происходить лишь при малых значениях фактора γ . В этом случае давление излучения разгоняет частицу до такого значения γ , при котором достигается равенство

$$\gamma m_0 g = \frac{\pi D^2}{4} \frac{I}{c} \quad (8.4)$$

Учтем далее, что напряженность поля $-\vec{g}$ и интенсивность излучения I убывают с расстоянием пропорционально друг другу.

В этих условиях достигнутое значение γ сохраняется.

На больших расстояниях необходимо учитывать поглощение излучения толстым слоем разлетающегося вещества. Кроме того, существенную роль начнет играть поле созданное слоем разлетающегося вещества. В результате частица замедлится и полетит обратно. За время своего долгого путешествия частица соединится с другими такими же частицами и войдет в состав небесного

тела, которое беспрепятственно снова наберет скорость, соответствующую $\gamma \sim 10^9$ и в очередной раз конвертирует кинетическую энергию в излучение.

Наработка энергии в окрестности квазара увеличивает массу и потенциал Вселенной. Изменение потенциала приводит к прямой зависимости функции Лагранжа от времени. Вследствие этого отклонение от закона сохранения энергии не противоречит теореме Нетер.

Рассмотрим отдельно влияние квазаров на разбегание галактик.

Можно предположить, что число квазаров и их суммарная мощность пропорциональны массе вселенной. Тогда

$$dM / dt_0 \approx M / \tau \quad (8.5)$$

$$M = M_0 e^{t/\tau} \quad (8.6)$$

Пусть W - суммарная мощность квазаров, тогда характерное время τ

$$\tau = \frac{M}{W / c^2} \quad (8.7)$$

Учитывая, что минимальный радиус Вселенной

$$r_m = \frac{GM}{c^2} \quad (8.8)$$

Вычислим скорость расширения внешней границы как

$$\frac{dr_m}{dt_0} = \frac{G}{c^2} \frac{dM}{dt_0} = \frac{G}{c^2} \frac{M}{\tau} = \frac{r_m}{\tau} \quad (8.9)$$

Ускорение внешней границы составит

$$\frac{d^2 r_m}{dt_0^2} = \frac{G}{c^2} \frac{M}{\tau^2} = \frac{r_m}{\tau^2} \quad (8.10)$$

Учитывая, что скорость может быть записана в соответствии с законом Хаббла

$$\frac{dr_m}{dt_0} = H r_m \quad (8.11)$$

Подставляя (8-9) найдем

$$H = \tau^{-1} \quad (8.12)$$

С учетом (8-12) запишем

$$\boxed{\ddot{r}_m = H^2 r_m} \quad (8.13)$$

На произвольном расстоянии r ускорение составит

$$\ddot{r} = H^2 r_m \frac{r}{r_m} = H^2 r \quad (8.14)$$

Таким образом, наработка массы Вселенной квазарами (8-6) экспоненциально увеличивает минимальный радиус Вселенной, что и приводит к пекулярному (за счет уменьшения пространственного масштаба) разлету Вселенной. Пекулярное ускорение не требует приложения сил, поэтому и антигравитация не требуется.

В этом состоит возможный ответ на широко обсуждаемый вопрос о причине ускоренного расширения Вселенной [7, с. 267].

Из (8-7) можно оценить суммарную мощность квазаров в предположении, что масса Вселенной растет только за счет квазаров.

$$W / c^2 = M / \tau = MH \quad (8.15)$$

Подставляя значения массы вселенной и постоянной Хаббла в соответствии с современными представлениями $H = 2.3 * 10^{-18} c^{-1}$; $M_U = 2.4 * 10^{53} kg$ получим

$$dM / dt_0 \approx M / \tau \approx 2.3 * 10^{-18} * 2.4 * 10^{53} = 5.52 * 10^{35} kg / c \quad (8.16)$$

Таким образом, масса вселенной растет со скоростью $2.75 * 10^3$ масс Солнца в секунду.

Мощность, вырабатываемая квазарами, составляет соответственно величину

$$W \approx 5.52 * 10^{35} * c^2 \approx 5.52 * 10^{35} * 9 * 10^{16} \approx 5 * 10^{52} J / c \quad (8.17)$$

Таков масштаб отклонения от закона сохранения энергии.

9. Вероятная природа гамма-всплесков.

Гамма – всплески [8, с.415] поражают воображение своей мощностью не менее чем квазары. Покажем, что γ - всплеск может возникать при столкновении небесного тела со спутником коллапсара.

Пусть потенциал на орбите спутника коллапсара

$$\Phi \ll -1 \quad (9.1)$$

В момент столкновения, энергия небесного тела согласно (П1-5)

$$E(\Phi) \approx mc^2 e^{-\Phi} \gg mc^2 \quad (9.2)$$

С большой точностью можно допустить, что вся кинетическая энергия тела

$$E_k(\Phi) \approx mc^2 (e^{-\Phi} - 1) \quad (9.3)$$

превратится в энергию излучения

$$E_\gamma \approx E_k \quad (9.4)$$

При выходе из потенциальной ямы, излучение получит красное смещение, $z = e^{-\Phi}$ и его энергия станет равной

$$E_{\gamma,0} = E_k e^\Phi \quad (9.5)$$

$$E_{\gamma,0} \approx mc^2 (e^{-\Phi} - 1) e^\Phi \approx mc^2 \quad (9.6)$$

Таким образом, возникает всплеск излучения с общей энергией равной, по порядку величины, энергии покоя небесного тела упавшего на спутник коллапсара. Максимальная энергия тормозных γ - квантов равна кинетической энергии электронов.

$$h\nu_{\max} = m_e c^2 (e^{-\Phi} - 1) \quad (9.7)$$

При выходе из потенциальной ямы энергия γ - квантов уменьшится в соответствии с красным смещением $z = e^{-\Phi}$ и станет равной

$$h\nu_{\max} = m_e c^2 (e^{-\Phi} - 1) e^\Phi \approx m_e c^2 \approx 0.5 \text{ MeV} \quad (9.8)$$

Полученная энергия γ - квантов и энергия γ - всплеска хорошо согласуются с характеристиками наблюдаемых γ - всплесков.

Можно ожидать, что длительность γ - всплеска по локальному времени, сравнима с длительностью столкновения небесного тела, имеющего около световую скорость, с поверхностью коллапсара.

$$t \approx D/c \quad (9.9)$$

D - диаметр небесного тела; c - скорость света.

Для земного наблюдателя этот процесс будет длиться дольше

$$t_0 \approx te^{-\Phi} \approx e^{-\Phi} D / c \quad (9.10)$$

Для объяснения наиболее мощных γ -всплесков с энергией 10^{54} эрг, необходимо предположить, что на спутник коллапсара упала нейтронная звезда диаметром около 10^4 метров. При этом $t \approx 3 \cdot 10^{-5}$ секунды. Наблюдаемая длительность γ -всплесков составляет $t_0 \approx 30$ секунд. Это значит, что $\frac{dt_0}{dt} = e^{-\Phi} \approx 10^6$. Такое соотношение соответствует потенциалу на орбите спутника коллапсара $\Phi \approx -13.8$

На поверхности коллапсара потенциал может быть значительно меньше и достигать величины $\Phi_0 \approx -20.7$ (Приложение 3, формула (ПЗ-5)). При таком потенциале коллапсар превращается в яркий радиоисточник с «тепловым спектром», имеющий яркостную температуру $T_{br} = 10^{16} K^0$

Падение небесного тела на сам коллапсар тоже может создать гамма всплеск, однако длительность гамма всплеска в этом случае будет значительно больше, чем при столкновении со спутником коллапсара, так как

$$dt_0 / dt = e^{-\Phi} \approx 10^9 \div 10^{10} \quad (9.11)$$

Кроме того большой коллапсар имеет очень низкую среднюю плотность (3.6) и резкого торможения не произойдет.

Если предложенное объяснение природы гамма – всплесков верно, то они могут сопровождаться мощнейшими выбросами гравитационных волн.

10. Основные итоги

В изложенной скалярной модели гравитации

1. Коллапс отдельной звезды или любого звездного скопления характеризуется конечными пределами всех геометрических и физических характеристик коллапсирующего объекта.
2. В центральном поле траектории фотонов являются инфинитными.
3. Яркие радиоисточники – продукт коллапса массивного объекта.
4. Разбегание галактик происходит с ускорением $\ddot{r} = H^2 r$.

5. Сколлапсировавший объект нагревается звездами – спутниками до температуры, превышающей температуру этих звезд.

6. Спутники массивных черных дыр – долгожители.

7. Гравитационные волны – продольные.

8. Вероятным источником темной материи является центральная черная дыра галактики.

9. Неистощимость квазаров – следствие нарушения закона сохранения энергии в условиях неоднородного времени, согласующееся с теоремой Нетер.

10. Гамма всплески могут происходить при столкновении небесных тел со спутниками квазаров и вероятно сопровождаются наиболее мощными выбросами гравитационных волн.

Краткое изложение данной работы содержится в [9, с.462].

Автор, конечно, не претендует на создание завершенной теории, поскольку рассмотрение ограниченного круга задач проведено только в рамках простейшего приближения центрально – симметричного поля. (ЦСП).

11. Приложения

Приложение 1. Красное смещение в гравитационном поле.

Не зная заранее метрику пространства, можно все же предположить, что напряженность поля для сферически симметричного случая равна заряду, деленному на поверхность эквипотенциальной сферы.

$$\vec{g} = -\frac{4\pi GM}{S} \frac{\vec{R}}{R} \quad (\text{П1-1})$$

В плоском пространстве, когда $S = 4\pi R^2$, формула (П1-1) переходит в Ньютоновскую $g = \frac{GM}{R^2}$. Из второго постулата можно сделать вывод, что на фотон, как и на любую другую частицу, обладающую массой, действует сила.

$$\vec{F} = (E/c^2) \vec{g} \quad (\text{П1-2})$$

Умножая скалярно (П1-2) на $d\vec{R}$, получим $\vec{F}d\vec{R} = (E/c^2)\vec{g}d\vec{R}$ или

$$dE / E = \vec{g}d\vec{R}/c^2 \quad (\text{П1-3})$$

Интегрирование выражения (П1-3) в пределах от ∞ до \vec{R} дает

$$\ln \frac{E_0}{E(\vec{R})} = \frac{1}{c^2} \int_{\infty}^{\vec{R}} \vec{g}d\vec{R} = \frac{\varphi(\vec{R})}{c^2} = \Phi(\vec{R}) \quad (\text{П1-4})$$

Запишем полученное выражение в виде.

$$E = E_0 e^{-\Phi}, \quad (\text{П1-5})$$

Φ - безразмерный потенциал.

Выражение (П1-5) записано для произвольной частицы и, в частности, для фотона. Поэтому решение (П1-5) означает также, что частота фотона меняется в зависимости от потенциала в соответствии с (П1-6)

$$\nu / \nu_0 = e^{-\Phi} = z \quad (\text{П1-6})$$

z - красное смещение.

Фотон может преодолеть любую разность потенциалов потому, что экспонента не обращается в нуль. В соответствии с (П1-6) ход времени зависит от потенциала.

$$dt_0 / dt = e^{-\Phi} \quad (\text{П1-7})$$

Индексом $_0$ отмечены значения величин при нулевом потенциале.

Приложение 2. Задержка радиосигнала в поле Солнца.(Эффект Шапиро)

Известный эксперимент по прохождению радиосигнала от Земли к Венере и обратно вблизи Солнца [1, с. 1] зарегистрировал задержку сигнала, вызванную влиянием гравитационного поля Солнца в соответствии с ОТО.

$$\Delta t = \frac{2r_g}{c} \ln \frac{R_e R_v}{c^2}$$

Рассчитаем тот же эффект в нашей модели. Расположим начало координат в центре звезды и сопоставим произвольной точке М радиус R в реальном пространстве (Рис.1) и радиус R_0 в плоском пространстве.

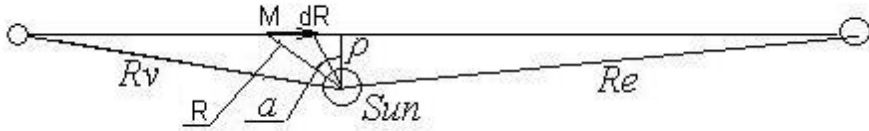


Рис. 1. К расчету задержки сигнала проходящего вблизи Солнца.

В соответствии с принятой гипотезой об изотропном сжатии пространства, элементы длины связаны соотношением $dR = z dR_0$. Для фотона на каждом участке имеет место соотношение $ds^2 = c^2 dt^2 - z^2 (dR_0)^2 = 0$. В сопровождающей системе координат поэтому $dt = z dR_0 / c$. Для внешнего наблюдателя $dt_0 = z^2 dR_0 / c$. Точке с радиус – вектором \vec{R} поставим в соответствие угол $\alpha = \arccos(\rho / R)$. ρ – прицельный параметр луча. При этом получим

$$dR_0 = \rho \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}; \quad dR = \rho \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} z$$

Для земного наблюдателя прохождение этого участка длится

$$dt_0 = z dt = z dR / c = \frac{\rho}{c} \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} z^2$$

Подставляя $z^2 = (e^{-\Phi})^2 \approx (1 - \Phi)^2 \approx 1 - 2\Phi \approx 1 + 2 \ln(1 + r_m / R_0) \approx 1 + 2r_m / R_0 \approx 1 + r_g / R_0$

Получаем $dt_0 \approx \frac{c}{c} \frac{d\bar{b}}{\cos^2 \bar{b}} \left(1 + \frac{r_g \cos \bar{b}}{c}\right)$. В отсутствии поля $dt_{00} = \frac{c}{c} \frac{d\bar{b}}{\cos^2 \bar{b}}$

Задержка сигнала $\delta t = dt_0 - dt_{00} = \frac{r_g}{c} \frac{d\alpha}{\cos \alpha}$.

Учитывая, что $\int_0^{\alpha_i} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} = \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_i}{2} \right) \right|$ где $\alpha_i \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\rho}{R_i}$; $\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_i}{2} \right) \approx \frac{R_i}{\rho}$

С учетом двойного прохода сигнала, окончательно получаем

$$\delta t = \frac{2r_g}{c} \ln \frac{R_e R_v}{\rho^2} \quad (\text{П2-1})$$

Отклонение луча гравитационным полем.(эффект Эйнштейна)

Пользуясь формулой (П2-1) легко получить угол отклонения луча из соотношения

$$\alpha = -c \frac{d\delta t}{2d\rho} = \frac{2r_g}{\rho} \quad (\text{П2-2})$$

Здесь учтена задержка $\frac{\delta t}{2}$ за один проход.

Приложение 3. Условия остановки коллапса.

В соответствии с (3.22) для остановки коллапса нужна температура $T_{Bal} = 10^{13} / \sqrt{N_{\oplus}}$. Допустим, что звездное окружение способно нагреть небесное тело в нулевом потенциале до $T_0 = 300K^0$. Для нагрева, до температуры T_{Bal} требуется увеличить мощность падающего излучения в $(T_{Bal} / T_0)^4$ раз

Поскольку мощность падающего излучения возрастает в z^2 раз, то необходимо иметь

$$z = \left(\frac{T_{Bal}}{T_0} \right)^2 \approx \frac{1}{N_{\oplus}} \left(\frac{10^{13}}{300} \right)^2 \approx \frac{10^{21}}{N_{\oplus}} \quad (\text{П3-1})$$

По закону Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{T} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{10^{13} / \sqrt{N_{\oplus}}} = 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} \quad (\text{П3-2})$$

Смещенное излучение, приходящее к Земле, будет иметь

$$\lambda_m = z \lambda_{\max} = \frac{10^{21}}{N_{\oplus}} 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} = 2.9 \cdot 10^5 / \sqrt{N_{\oplus}} \quad (\text{П3-3})$$

Таким образом, максимум смещенного спектра окажется в метровом диапазоне, если безразмерная масса сколлапсировавшего объекта составляет $N_{\otimes} \approx 10^{11}$. Видно из (П3-3), что более легкие «черные дыры» светят на более длинных волнах.

Коллапс одинокой звезды.

Мощность реликтового излучения поглощаемого звездой растет пропорционально z^2 и температура эквивалентной печи растет как $\sqrt[4]{z^2} = \sqrt{z}$. Так что температура звезды не меньше $T_{\min} = 2.725\sqrt{z}$

Для достижения температуры баланса необходимо иметь

$$z = \left(\frac{T_{bal}}{2.725} \right)^2 = \left(\frac{10^{13}}{2.725 \sqrt{N_{\oplus}}} \right)^2 = 1.3 \cdot 10^{25} / N_{\oplus} \quad (\text{ПЗ-4})$$

По закону Вина

$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{T} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3} \sqrt{N_{\oplus}}}{10^{13}} = 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} \quad (\text{ПЗ-5})$$

С учетом красного смещения

$$\lambda_{max} z = 2.9 \cdot 10^{-16} \sqrt{N_{\oplus}} \cdot 1.3 \cdot 10^{25} / N_{\oplus} = 3.77 \cdot 10^9 / \sqrt{N_{\oplus}} \quad (\text{ПЗ-6})$$

Таким образом, к земному наблюдателю приходят волны слишком большой для регистрации длины, поскольку безразмерная масса N_{\oplus} отдельной звезды едва ли может быть слишком большой. Поэтому черные дыры, не имеющие звезд спутников, не удастся наблюдать в собственном излучении.

Приложение 4. Яркие источники радиоизлучения с тепловым спектром.

Интенсивность излучения, выраженная через число фотонов

$$N_{T,\nu} = 2\pi\nu^2 c^{-2} \left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (\text{П4-1})$$

Красное смещение z приводит к тому, что такое число фотонов наблюдается на частоте $\nu_{dis} = \nu / z$. Поэтому для получения смещенного спектра в приведенной формуле необходимо заменить $\nu \Rightarrow z\nu_{dis}$

$$N_{T,\nu_{dis}} = 2\pi z^2 \nu_{dis}^2 c^{-2} \left(\exp\left(\frac{hz\nu_{dis}}{kT}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (\text{П4-2})$$

Огибающая наблюдаемых спектров имеет похожую форму. Полезно иметь в виду, что присутствуют два компенсирующих друг друга эффекта: 1. интервал частот $\Delta\nu$ при смещении равном z сократится в z раз, и плотность фотонов на интервал частот увеличится в z раз. 2. Время вдали от источника идет быстрее в z раз, что снижает плотность потока в z раз.

Если предположить, $T = 10^7 K$, то для попадания максимума спектра в радиодиапазон, необходимо чтобы $z = 10^9$

Для радиочастот $h\nu \ll kT$, и формула (П4-1) для области радиодиапазона принимает вид

$$N_{T,\nu} = 2\pi\nu^2 c^{-2} \frac{kT}{h\nu} \quad (\text{П4-3})$$

При этом в формуле смещенного спектра в области радиодиапазона $10^9 h\nu_{dis} \approx kT$ и формула (П4-2) для радиодиапазона получит вид

$$N_{T,\nu_{dis}} \approx 2\pi z^2 \nu_{dis}^2 c^{-2} \quad (\text{П4-4})$$

Для получения на радиочастоте $\nu = \nu_{dis}$ в несмещенном спектре (П4-3) такой же плотности фотонов на единичный интервал частоты как в смещенном спектре (П4-4), пришлось бы поднять температуру до величины T_{Br} исходя из

равенства
$$z^2 = \frac{kT_{Br}}{h\nu_{dis}}$$

$$T_{Br} = \frac{z^2 h\nu_{dis}}{k} = \frac{zh\nu}{k} = zT \approx 10^{16} K \quad (\text{П4-5})$$

Такую яркостную температуру имеют наблюдаемые радиоисточники.

Приложение 5. Энергия спутников.

Определим энергию спутника на круговой орбите. Центостремительное ускорение равно напряженности поля

$$\frac{x^2}{R_{Eff}} = \frac{MG}{R_{Eff}^2}, \quad \frac{\nu^2}{R_{Eff}} = \frac{MG}{R_{Eff}^2} \quad \text{следовательно, } x^2 = c^2 \frac{r_m}{R_{Eff}} \quad \text{или} \quad \frac{x^2}{c^2} = \frac{r_m}{R_0 + r_m}. \quad \text{Для энер-$$

гии спутника получаем выражение

$$E_{sat} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\nu^2/c^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{\frac{R_0}{R_0 + r_m}}}.$$

Учитывая, что $\exp(-\Phi) = 1 + \frac{r_m}{R_0} = \frac{R_0 + r_m}{R_0}$ получим

$$E_{sat} = mc^2 \sqrt{\exp(-\Phi)} = mc^2 \sqrt{z} \quad (\text{П5-1})$$

Интересно рассмотреть следствия, вытекающие из естественного предположения, что черная дыра образуется из протозвезды обладающей моментом количества движения. Все оседающее на звезду вещество на поздней

стадии формирования черной дыры это спутники. Звезда, основная масса которой накоплена за счет поглощения спутников, вращается со скоростью, которая компенсирует силу тяжести. Коллапс такой звезды будет неглубоким. Возможно, что переменные звезды способны выходить из коллапса благодаря вращению и возрастанию температуры.

Приложение 6. Мощность гравитационного излучения

Пусть два тела равной массы M вращаются вокруг общего центра тяжести по круговой орбите радиусом $r_1 = r/2$. где r - расстояние между телами. На расстоянии $R \gg r_1$ имеем $\sqrt{R^2 + r_1^2} \approx R$ суммарный потенциал в приближении слабого поля будет

$$\varphi = -MG \left(\frac{1}{R + r_1 \sin \alpha \sin \omega(t - R/c)} + \frac{1}{R - r_1 \sin \alpha \sin \omega(t - R/c)} \right)$$

или после преобразований

$$\varphi \approx -\frac{2MG}{R} \left(1 + \frac{r_1^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \omega(t - R/c)}{R^2} \right) \quad (\text{П6-1})$$

где α - угол между направлением момента системы двух небесных тел и направлением излучения. Постоянная часть потенциала

$$\bar{\varphi} = -\frac{2MG}{R} \quad (\text{П6-2})$$

представляет собой обычное поле неподвижного источника на большом расстоянии.

Переменная часть потенциала

$$\tilde{\varphi} \approx \bar{\varphi} \frac{r_1^2}{R^2} \sin^2 \alpha \sin^2 \omega(t - R/c) \quad (\text{П6-3})$$

Вычислим поле в волновой зоне где

$$R \approx cnT = cn \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{П6-4})$$

$$\tilde{\varphi} \approx \bar{\varphi} \frac{r_1^2 \omega^2}{4\pi^2 n^2 c^2} \sin^2 \alpha \sin^2 \omega(t - R/c) \quad (\text{П6-5})$$

Напряженность на большом расстоянии

$$E_G \approx -\frac{d\tilde{\varphi}}{dR} \approx \frac{\bar{\varphi}^2 r_1^2 \omega^3}{4\pi^2 n^2 c^3} \sin^2 \alpha \sin 2\omega(t - R/c) \quad (\text{П6-6})$$

Плотность энергии

$$W \approx kE_G^2 = k \frac{\bar{\varphi}^2 r_1^4 \omega^6}{16\pi^4 n^4 c^6} \sin^4 \alpha \sin^2 2\omega(t - R/c) \quad (\text{П6-7})$$

Для усреднения по времени учтем, что среднее

$$(\sin^2 x)_{\text{вр}} = 0.5$$

Плотность потока

$$S = \bar{W}c \approx k \frac{\bar{\varphi}^2 r_1^4 \omega^6}{32\pi^4 n^4 c^5} \sin^4 \alpha$$

с подстановкой $k = -\frac{1}{8\pi G}$ и $\bar{\varphi} = -\frac{2MG}{R}$

окончательно

$$S \approx -\frac{M^2 G \omega^6 r_1^4}{R^2 64\pi^5 n^4 c^5} \sin^4 \alpha \quad (\text{П6-8})$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{MG}{4r_1^3}} \quad (\text{П6-9})$$

Проинтегрируем (8) по сфере радиусом R , где элемент сферического пояса $ds = 2\pi R^2 \sin \alpha d\alpha$

$$I \approx -\frac{GM^2 \omega^6 r_1^4}{32\pi^4 n^4 c^5} 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^5 \alpha d\alpha = -\frac{1}{30\pi^4 n^4} \frac{GM^2 \omega^6 r_1^4}{c^5} \quad (\text{П6-10})$$

или подставляя $r_1 = r/2$, получим

$$I \approx \kappa \frac{GM^2 \omega^6 r_1^4}{c^5} \quad (\text{П6-11})$$

Полученное выражение отличается от соответствующего выражения приведенного в [2, с. 455] постоянным коэффициентом,

$$\kappa = \frac{1}{480\pi^4 n^4} \quad (\text{П6-12})$$

который содержит свободный параметр n и может быть отнормирован в соответствии с данными наблюдений.

Интересно оценить интенсивность излучения для спутников черной дыры в М31, поскольку этот объект уже привлек внимание астрономов долгоживущими спутниками [3, с.1]. Положим $r \approx r_m = 2 \cdot 10^{11} m$, массу спутника положим $M \approx 10^{30} kg$.

$$I \approx 6,4 \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{60} (1,5 \cdot 10^{-3})^6 (2 \cdot 10^{11})^4}{243 \cdot 10^{40}} = 3,2 \cdot 10^{36} \text{ Вт} \quad (\text{П6-13})$$

12. Библиографический список

1. <http://lib.ru/TEXTBOOKS/TEACH/Physics/node4.html>
2. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц, т.2, Теория поля, Москва, «Наука», 1988.
3. <http://elementy.ru/news/164824>
4. <http://elementy.ru/lib/25560/25564>
5. Квазар <http://www.astromag.ru/objects/002.php>
6. Рябов В.А., Царев В.А., Цховребов А.М. Поиски частиц темной материи. УФН 178 (2008) с. 1129.
7. А.Д. Чернин. Темная энергия и всемирное антитяготение. УФН 178, №3 (2008) с. 267-300.
8. Fishman, C.J. and Meegan, C.A. Gamma-Ray Bursts. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 33 (1995): 415–458.
9. SHeStakov Yu. I. The Scalar Model of The field of The Gravity. Proceedings of XV International Scientific Meeting PIRT-2009 Moscow 6-9 July 2009. Pp.462-466 .

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕПТАНТА РЕАКЦИИ $p n \rightarrow p K^+ \Sigma^-$, ИЗУЧАЕМОЙ НА СПЕКТРОМЕТРЕ ANKE

Шиков Е.Н.

НИЦ "Курчатовский институт" ФГБУ "Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П. Константинова", г. Гатчина

Введение

На сегодняшний день механизмы образования гиперонов, а также их взаимодействия с нуклонами изучены не до конца. В частности, отсутствует информация о рождении Σ^- гиперона в протон-нейтронных взаимодействиях. Для решения этой задачи проводится исследование реакции $p n \rightarrow p K^+ \Sigma^-$ на спектрометре ANKE, расположенном в одной из прямых секций ускорительно-накопительного кольца COSY-Juelich (Германия). Непрерывно циркулирующий в кольце ускорителя высокоинтенсивный пучок протонов взаимодействует с дейтериевой кластерной мишенью. Дейтериевая мишень в данной работе используется как эффективная нейтронная мишень, т.е. изучалась реакция $p d \rightarrow p_{sp} p K^+ \Sigma^-$. Это объясняется тем, что характерная энергия связи нуклона в ядре дейтерия почти на 3 порядка меньше, чем кинетическая энергия налетающего протона пучка, что позволяет считать нуклоны мишени квазисвободными ("спектаторная модель") [1]. Регистрация этого квазисвободного протона (далее в тексте именуемого "спектаторным") позволяет определить энергию $p n$ -системы. Конечной целью работы является определение полного и дифференциальных сечений данного процесса. Это невозможно без знания геометрического акцептанса реакции - углового и энергетического захвата спектрометра.

В связи с тем, что спектрометр ANKE регистрирует лишь малую часть событий данной реакции, акцептанс можно рассчитать только с помощью математического моделирования (методом Монте-Карло). Для этого строится математическая модель установки и многократно генерируются события данной

реакции так, чтобы их вероятностные характеристики совпадали с реальными.

Экспериментальная установка

Схема спектрометра ANKE [2] приведена на рис.1.

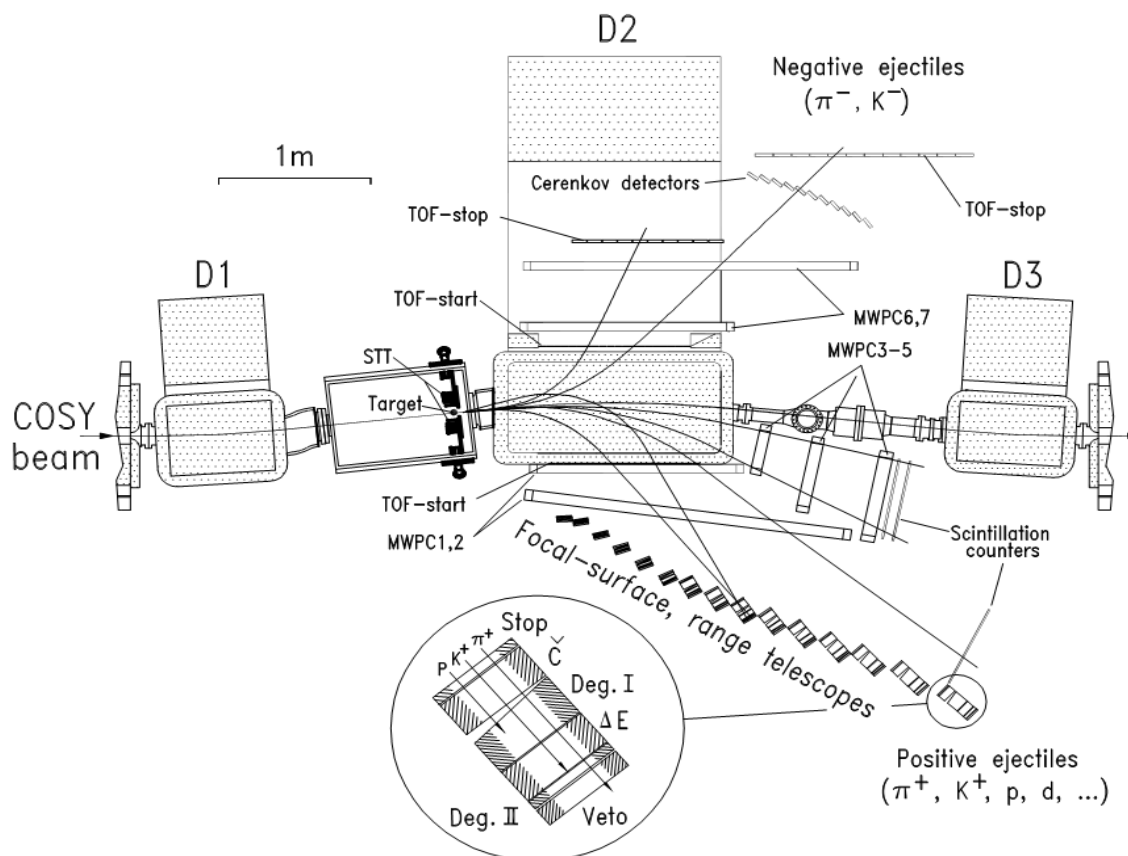


Рис.1. Спектрометр ANKE

Пучок протонов (COSY beam) движется по кольцу с импульсами 2915 или 3015 МэВ/с попеременно и многократно взаимодействует с дейтериевой кластерной мишенью (Target), при этом образуются вторичные частицы, в том числе и перечисленные выше, которые регистрируются затем различными детекторами. Спектрометр включает в себя дипольные магниты D1, D2, D3. Большой спектрометрический магнит D2 служит для измерения импульса вторичных частиц, вылетающих вперед, D1 и D3 осуществляют возврат пучка на орбиту COSY. В данной работе использовалась следующая схема восстановления события: спектаторный протон регистрируется в спектаторном детекторе

(STT), каон регистрируется в телескопах (Pd), протон регистрируется в переднем детекторе (Fd), Σ^- не регистрируется, а выделяется с помощью методики недостающей массы.

Кратко опишем перечисленные детекторные системы. Боковой детектор состоит из двух многопроволочных пропорциональных камер (MWPC1,2), сцинтиляционных телескопов (схема которых также представлена на рисунке) и дополнительных сцинтиляционных детекторов (Side Wall). Диапазон импульсов вылетающих вперёд частиц, регистрируемых в телескопах, составляет (150-600) МэВ. Side Wall используется для регистрации положительно заряженных частиц в диапазоне импульсов от 600 до 1000 МэВ/с, включает в себя два слоя по 6 сцинтиляционных счетчиков. Частицы с более высокими импульсами попадают в аксептанс переднего детектора, который состоит из двух многопроволочных пропорциональных камер и одной дрейфовой, также годоскопа сцинтиляционных и черенковских счетчиков. Он способен регистрировать частицы в широком диапазоне импульсов от 400 МэВ/с (т.е. импульсные аксептансы переднего и бокового детекторов частично перекрываются). В вакуумной камере, где располагается мишень, также был установлен полупроводниковый детектор низкоэнергетичных протонов (спектаторный детектор), состоящий из двух телескопов, каждый из которых включает в себя 3 позиционно-чувствительных кремниевых слоя.

Реализация математической модели

Первый этап моделирования заключался в генерации импульсно-угловых характеристик продуктов исследуемой реакции (p , K^+ , p_{sp} , Σ^-) в точке взаимодействия пучка и мишени. Для этих целей применялся программный пакет pluto5 [3], в который заложены необходимые алгоритмы генерации. В результате был получен файл, содержащий информацию о большом количестве событий, представляющих реакцию $pd \rightarrow p_{sp} p K^+ \Sigma^-$. Здесь стоит отметить, что сначала генерировался спектаторный протон (распределение по импульсам

было получено с помощью Боннского потенциала [4], как наиболее точно описывающего волновую функцию нуклона в ядре дейтерия, распределение по углам - изотропно), а затем уже разыгрывались характеристики продуктов реакции $pn \rightarrow pK^+\Sigma^-$.

Второй этап заключался в создании модели установки и расчете процессов регистрации продуктов реакции детекторными системами. Экспериментальная установка была описана при помощи пакета программ GEANT 4 [5]. Сначала создавалась модель области взаимодействия пучка и мишени. Затем проводилась генерация точки взаимодействия внутри этой формы согласно распределениям. В результате из полученной точки вылетали продукты реакции с импульсами, разыгранными на первом этапе. Затем проводилось трассирование частиц сквозь детекторную систему. Учитывалось столкновение со стенками камеры (при такие частицы исключались из трассировки), движение в магнитном поле D2, рассеяние на элементах конструкции и детекторах. Для описания магнитного поля использовались карты поля, составленные с помощью измерений на установке. В конечном итоге был получен файл, в котором содержалась информация о том, как провзаимодействовали частицы с детекторными системами и элементами конструкции модели, каков отклик детекторов, зафиксированы точки прохождения детекторов для каждой частицы.

Последний этап заключался в обработке смоделированных показаний детекторов так, как это делается при обработке экспериментальных данных, т.е. были учтены ограничения и критерии выделения фона, налагаемые при обработке экспериментальных данных. Например, не все сцинтилляционные счетчики были задействованы. Также были учтены пороги регистрации в спектроном детекторе. В итоге мы определили набор событий, которые можно считать зарегистрированными.

Обзор результатов

Далее было необходимо проверить, согласуются ли полученные данные моделирования с предварительными экспериментальными результатами, полученными в ходе первичной обработки. Сравнивались импульсные и угловые характеристики отобранных событий при моделировании и при обработке экспериментальных данных. Чтобы построить подобные зависимости, необходимо также заложить в модель энергетическую зависимость сечения реакции. Было сделано предположение, что сечение следует фазовому объему, и каждому событию был присвоен вес, пропорциональный фазовому объему. На рисунках 2, 3, 4 отображены распределения для протонов, каонов и спектаторных протонов. При этом сравнивалась только форма распределений (т.е. одно из них нормировалось таким образом, чтобы их площади были равны).

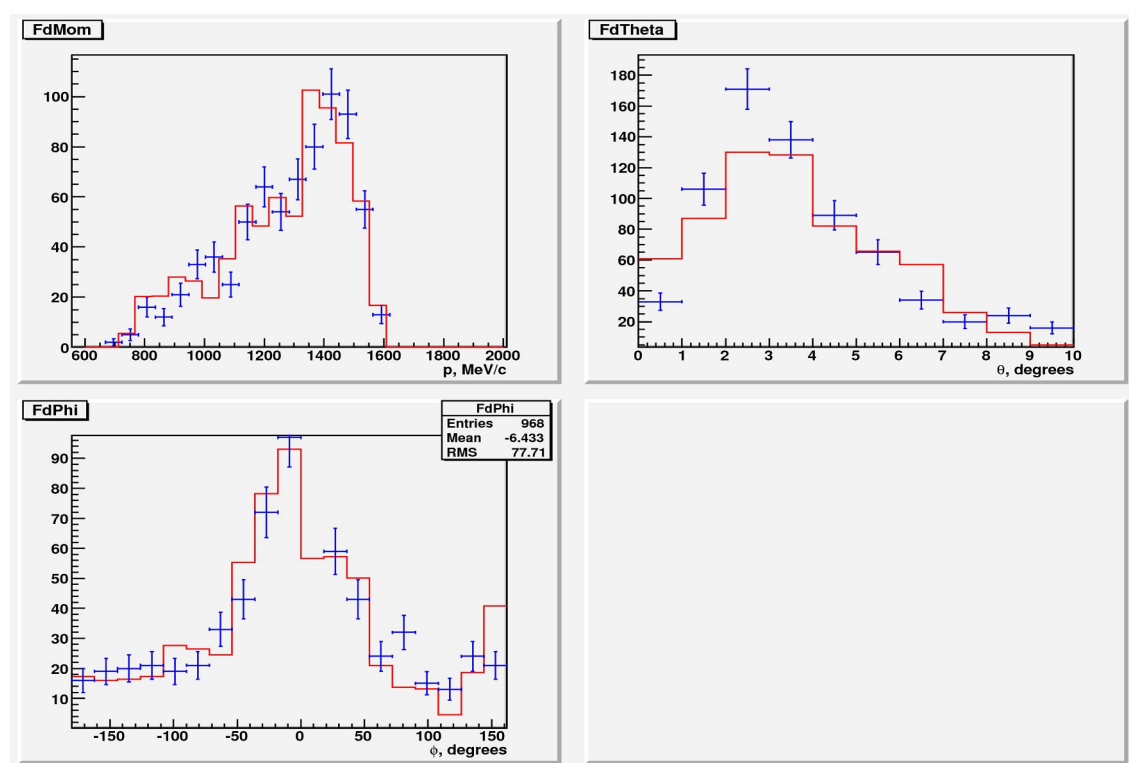


Рис. 2. Распределение событий по характеристикам протона, зарегистрированного в переднем детекторе: (верхний левый угол) импульсу; (верхний правый угол) углу θ ; (нижний левый угол) углу ϕ

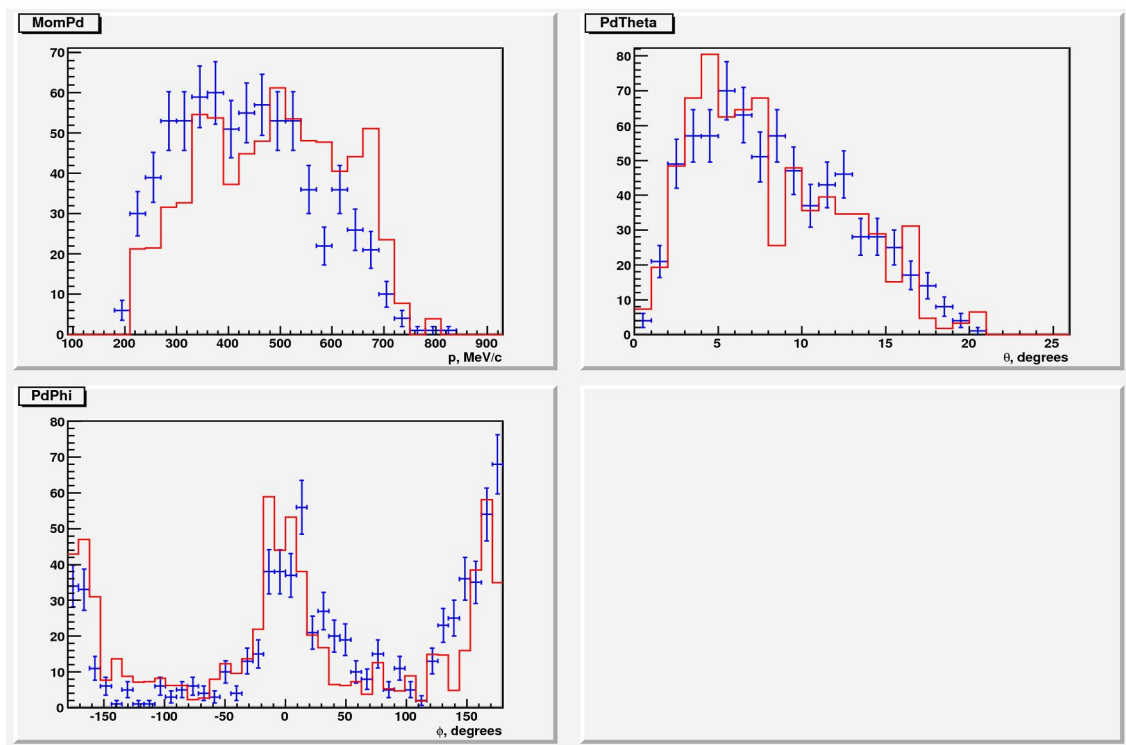


Рис. 3. Распределение событий по характеристикам каона, зарегистрированного в позитивном детекторе: (верхний левый угол) импульсу; (верхний правый угол) углу θ ; (нижний левый угол) углу φ

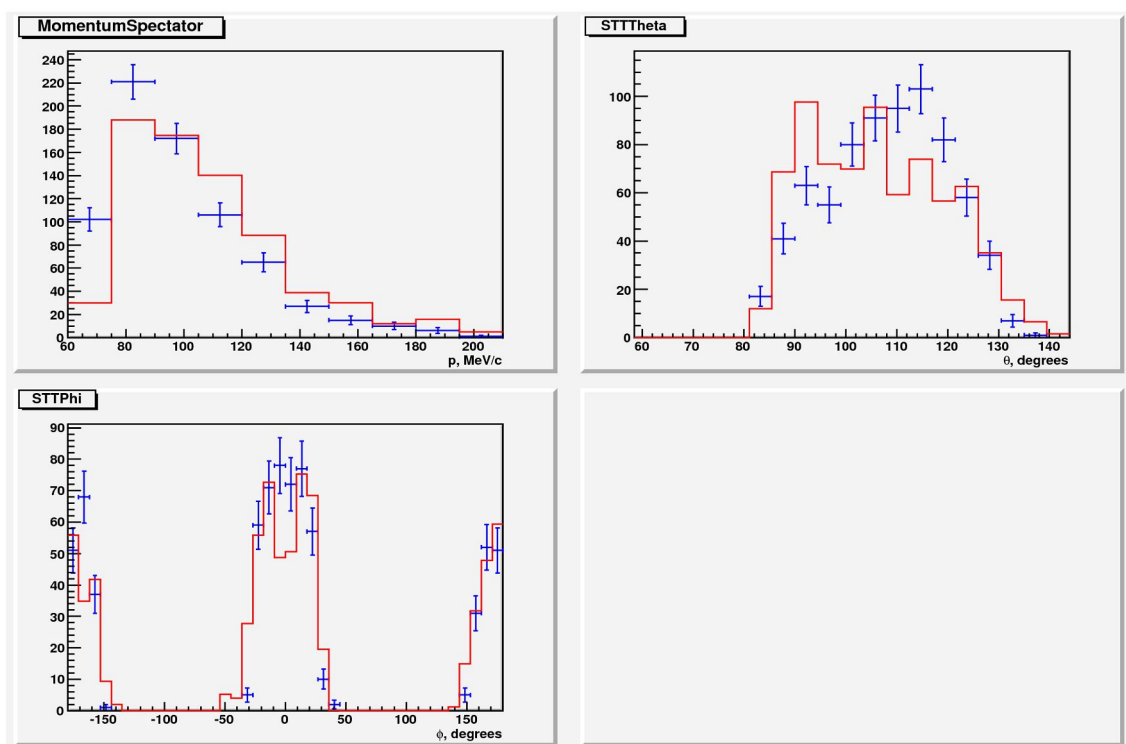


Рис. 4. Распределение событий по характеристикам низкоэнергетичного протона, зарегистрированного в спектаторном детекторе: (верхний левый угол) импульсу; (верхний правый угол) углу θ ; (нижний левый угол) углу φ

Из представленных распределений можно сделать вывод, что эксперимент и моделирование согласуются с ошибкой не более 20 %. В дальнейшем будет проводиться работа по коррекции модели установки с целью добиться лучшего согласия с экспериментом.

Акцептанс реакции

За счет внутриядерного движения нейтрона мы можем исследовать реакцию $pn \rightarrow pK^+\Sigma^-$ при разных энергиях возбуждения. В данном эксперименте этот диапазон длится от 0 до примерно 150 МэВ выше порога реакции. Диапазон был разбит на участки шириной 10 МэВ и для каждого из них был рассчитан акцептанс. Для этого было взято отношение числа событий с энергией в данном диапазоне, в которых реакция была детектирована моделью, к общему числу сгенерированных событий в данном энергетическом диапазоне. Результат представлен на рисунке 5.

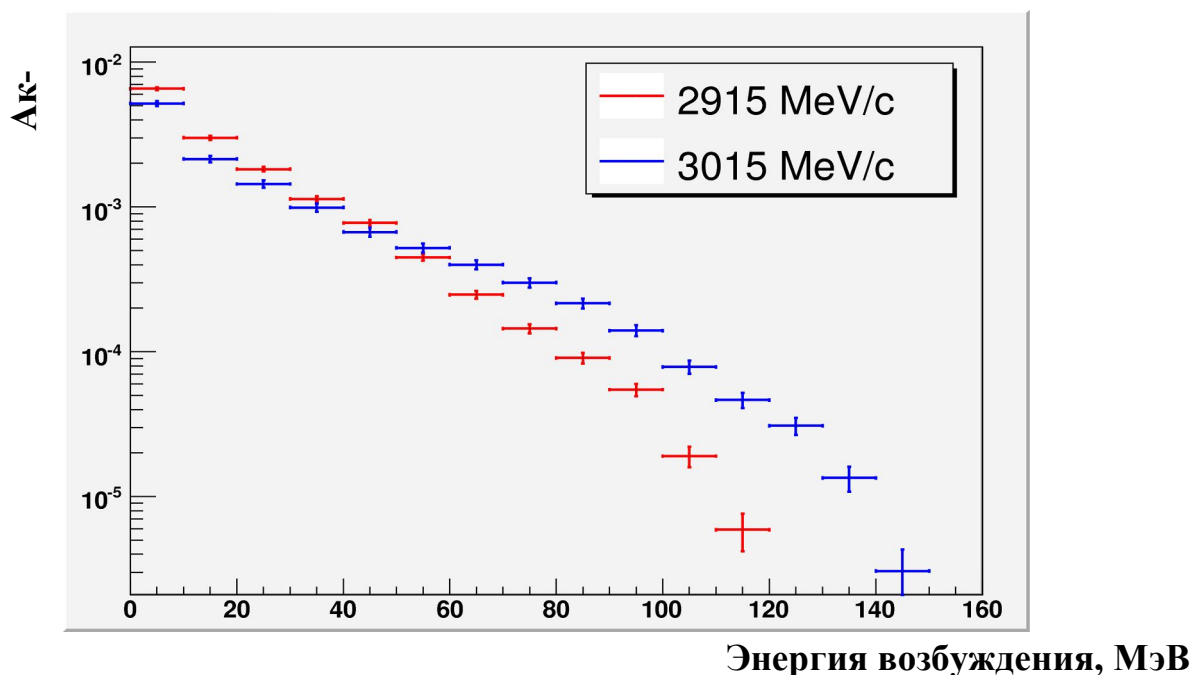


Рис. 5. Энергетическая зависимость акцептанса реакции $pn \rightarrow pK^+\Sigma^-$.

Красные точки соответствуют импульсу пучка 2915 МэВ/с, а синие - 3015 МэВ/с, представленные ошибки измерения включают в себя только статистическую погрешность

Выводы

Было выполнено моделирование сложной экспериментальной установки, показано, что результаты согласуются с экспериментальными данными. Основываясь на этом, был рассчитан акептанс реакции $pn \rightarrow pK^+\Sigma^-$ в исследуемом диапазоне энергий, что позволит впоследствии рассчитать сечение реакции.

Библиографический список

1. S. Barsov, S. Dymov et al., Near-threshold production of ω mesons in the $pn \rightarrow d\omega$ reaction, Eur.Phys.J. A 21 (2004) 521.
2. S. Barsov et al., ANKE, a New Facility for Medium Energy Hadron Physics at COSY-Jülich, NIM A, 462, 364 (2001).
3. I. Frohlich et al., Pluto: A Monte Carlo Simulation Tool for Hadronic Physics , PoS ACAT2007 (2007) 076.
4. R. Machleidt, The high-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential (CD-Bonn), Phys.Rev. C63 (2001) 024001.
5. S. Agostinelli et al., Geant4 - A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250-303.

IV. МЕТОДИКА НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ, ИНТЕЛЛУКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ВОПРОСНО-ОТВЕТНАЯ СИСТЕМА СМЫСЛОВОГО АНАЛИЗА ТЕКСТА

Богатов Н.М., Родоманов Р.Р.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Создана вопросно-ответная система (ВОС), способная обмениваться информацией между человеком и компьютерной диалоговой системой. В вопросно-ответном диалоге система активна (задает вопросы), а пользователь пассивен (отвечает). Анализатор ответов в ВОС проверяет правильность ответа обучаемого на соответствие с ожидаемым ответом. В случае неточного или неправильного ответа человека ВОС задает наводящий вопрос, который указывает на пропущенную истину или неправильно написанное слово.

Введение

Диалог между ВОС и человеком происходит на естественном языке. На естественном языке передается информация о различных явлениях, свойствах, событиях и т.д. Одна из задач ВОС – анализ ответов обучаемого [1]. Базовые принципы построения семантического интерпретатора вопросно-ответных текстов на естественном языке обсуждались в работе [2].

Смысл текста, при анализе ответа экзаменуемого, система «понимает» сопоставляя содержимое ответа и фрагменты семантической сети. Узлы семантической сети представлены множеством часто встречаемых понятий текста, слов и устойчивых словосочетаний.

Для автоматизации анализа ответов создана программа лингвистического анализа русскоязычных текстов [3], предназначенная для определения смысла предложения по смысловому значению слов.

Среди множества предложений естественного языка лишь весьма не многие являются «правильными», то есть адекватно отражают синтаксическое строение предложения. Одну и ту же мысль можно выразить разными словами. Работа ВОС основывается на анализе поступивших фраз по смыслу.

В результате анализа ответов обучаемого необходимо получить набор параметров, характеризующих степень правильности ответа.

Целью работы является создание компьютерной вопросно-ответной системы, способной выполнять смысловую проверку текста на естественном языке и оценивать знания экзаменуемого студента.

Семантическое представление вопросно-ответной системы

Для передачи и приема знаний между ВОС и человеком служит естественный язык. На естественном языке передается информация о различных явлениях, свойствах, событиях и т.д.

Знания, записанные в семантическую сеть, подразделяются на классы. Классом знаний в семантической сети является группа объектов, явлений объединенных общностью признаков. Примером могут служить следующие слова: объект, свойство и т.д. Понятие объект, разделяется на два подкласса, одушевленный и неодушевленный. К подклассу одушевленные относятся все живые существа, птицы, животные, насекомые и т.д. К подклассу неодушевленные относятся предметы, явления действительности и т.д.

В качестве основания для такой классификации выступает принцип взаимозаменяемости слов или словосочетаний, т.е. нескольких слов, объединенных подчинительной связью. При этом замена одного слова или словосочетания другим не приводит к превращению осмысленного текста в бессмысленный текст. В качестве примера рассмотрим ветвь – *вещество, металл, железо*. В

предложении *«корпус прибора выполнен из железа»*, возможно, заменить слово *«железо»*, словом *«металл»*, при этом смысл предложения останется неизменным.

Класс в семантической сети возникает при поступлении новых знаний, которые по своим признакам не могут относиться к существующим классам.

Процесс общение и понимание ВОС

Понимание некоторого языкового сообщения ВОС связано, прежде всего, с его распознаванием, или декодированием. В нашей системе распознавание происходит следующим образом. Система обработки текста выполняет морфологический и синтаксический анализ текста. Первоначально полученное сообщение расчленяется на составляющие его элементы, из которых по заранее принятым правилам строится описание данной последовательности. Далее происходит семантический анализ текста, в процессе которого результат описания сравнивается в семантической сети с эталонами и в случае совпадения их с анализируемыми знаковыми последовательностями происходит ассоциативная активация соответствующих областей семантической сети.

Понимание нельзя свести к простому запоминанию или умению пересказать полученное сообщение. Можно сохранить в памяти какое либо сообщение, более или менее точно воспроизвести его, тем не менее, упуская главное – смысл.

Ручной режим пополнения базы знаний

Пополнение базы знаний в ручном режиме происходит в следующей последовательности:

- составляется предложение несущее необходимую информацию,
- создается дерево составляющих,
- дерево составляющих переносится в семантическую сеть.

В качестве примера рассмотрим ответ на вопрос: *Что называется дифференциальной нелинейностью ЦАП?*

Смысл ответа содержится в предложении: *Дифференциальная нелинейность – это отклонение действительных ступеней квантования от их среднего значения.*

При ответе студентом предложение может быть создано с помощью других слов, возможно изменение последовательности слов в предложении, но главное, чтобы оставался смысл. Поэтому создаваемое предложение, с помощью которого загружаются знания в семантическую сеть, должно содержать только основные слова, отображаемые смысловую форму предложения.

Дерево составляющих для предложения: *((Дифференциальная нелинейность) – (это (отклонение (действительных (ступеней квантования))) (от (их (среднего значения))))).*), приведено на рис. 1.

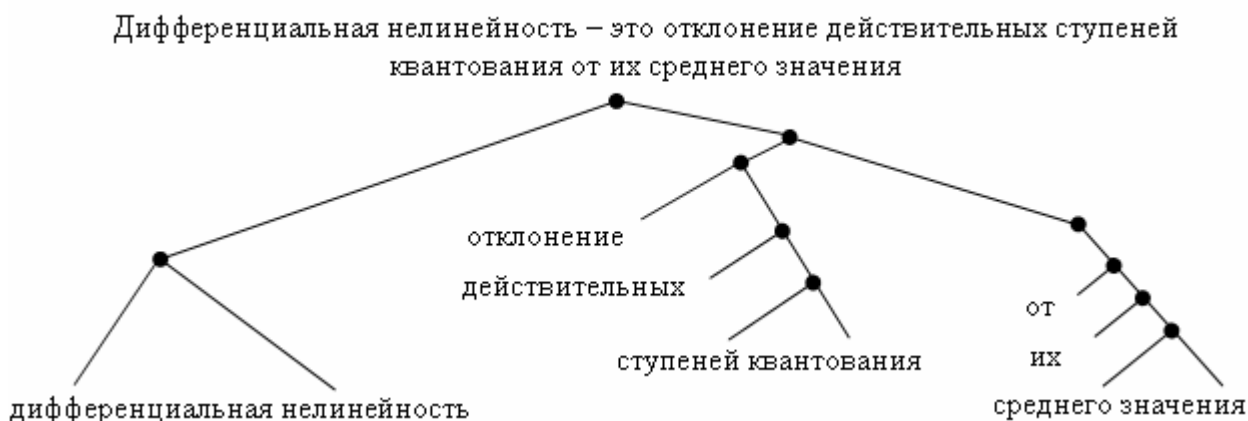


Рис. 1. Пример дерева составляющих

Построенное дерево словосочетаний указывает в предложении словосочетания разных «уровней», но не предоставляет при этом никаких различий среди словосочетаний одного уровня. «Главенствование» одного словосочетания над другим, необходимо определять интуитивно.

Этот способ достаточно надежен, так как знания заносятся человеком, но трудоемок. При большом объеме загружаемых данных человек устает и возможно проявление субъективных факторов.

Автоматический режим пополнения базы знаний

В автоматическом режиме пополнение базы знаний начинается с морфологического анализа предложения. В задачу морфологического анализа входит идентификация слов предложения с морфологическим словарем системы. В процессе морфологического анализа определяется часть речи, категория, форма слова и вопрос. Результатом морфологического анализа является таблица, приведенная на рис. 2. В таблице отображаются все возможные виды слов с различными окончаниями. Информация о категории и форме слова содержится в колонках 01h – 15h. Эти данные необходимы для синтаксического анализа, который производится после завершения морфологического.

№п/п	№слова	Слово	Код слова	Ок	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	11	12	13	14	15	Вопрос
01	0001100	Дифференциальная	1000051C	0F	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Какая?
02	0002100	нелинейность	0106012C	04	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
03	0002100	нелинейность	0106012C	01	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
04	0003100	это	B0000002	01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
05	0003100	это	37000000	0A	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Какая?
06	0003100	это	37000000	07	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Какая?
07	0004100	отклонение	0201004E	04	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
08	0004100	отклонение	0201004E	01	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
09	0005100	действительных	10000198	1B	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	О каких?
0A	0005100	действительных	10000198	17	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Каких?
0B	0006100	ступеней	0106009C	08	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Чего?
0C	0007100	квантования	020100A6	0A	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
0D	0007100	квантования	020100A6	07	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Что?
0E	0007100	квантования	020100A6	02	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Чего?
0F	0008100	от	94000001	01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Почему?
10	0008100	от	90000001	01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Откуда?
11	0009100	их	36010000	18	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	О чьих?
12	0009100	их	36010000	17	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Чьими?
13	0009100	их	36010000	16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Чьих?
14	0009100	их	36010000	15	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Чьим?
15	0009100	их	36010000	14	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Чьих?
16	0009100	их	36010000	13	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Чьи?
17	0009100	их	32030000	16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Кого?
18	0009100	их	32030000	14	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Кого?
19	000A100	среднего	10020020	09	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Какого?

Рис. 2. Таблица результата морфологического анализа

Задача синтаксического анализа – определить структуру входного предложения в соответствии с грамматикой русского языка и произвести коррекцию результатов морфологического анализа. Коррекция результатов морфологического анализа производится в соответствии со структурой предложения. При нескольких значениях слов определяется одно, наиболее сочетаемое со значениями соседних слов. В синтаксическом словаре находятся таблицы определяющие правила связи слов в предложении. Информация о синтаксическом строении предложения представляет собой набор сведений о «главенствовании» одних слов над другими. Словосочетание возникает на основе подчинительной связи. Одним из способов изображения синтаксической структуры предложения является дерево подчинения. Дерево подчинения создается на основе таблицы классов слов.

После завершения синтаксического анализа создается окно, показанное на рис. 3.

В процессе морфологического и синтаксического анализа при вводе новых текстов, возможно определение неопознанных слов и словосочетаний.

В задачу семантического анализа текста проводимую оператором, входит «обучение» вопросно-ответной системы, т.е. ввод слов и словосочетаний которые не были определены в автоматическом режиме. Словосочетания вводятся в таблицу сочетания слов расположенную в окне ввода знаний. По оси строк и столбцов таблицы располагаются все слова входящие в предложение. Поочередно происходит анализ возможности сочетания всех слов предложения. Если возможность сочетания определена, в ячейке пересечения устанавливается код сочетания. Код сочетания определяется программно. Код сочетания состоит из двух символов, первый символ определяет код класса первого слова сочетания, а второй символ определяет код второго слова сочетания. Например, сочетание слов «*дифференциальная нелинейность*» соответствует коду «0-1» - сочетание слов нулевого и первого классов, т.е. «существительное – прилагательное».

Для удобства и контроля вводимых знаний автоматически строится дерево подчинения слов, расположенное в нижней части окна ввода знаний. Связь слов в предложении довольно легко контролировать с помощью вопросов, которые определяются для каждого слова в процессе морфологического анализа.

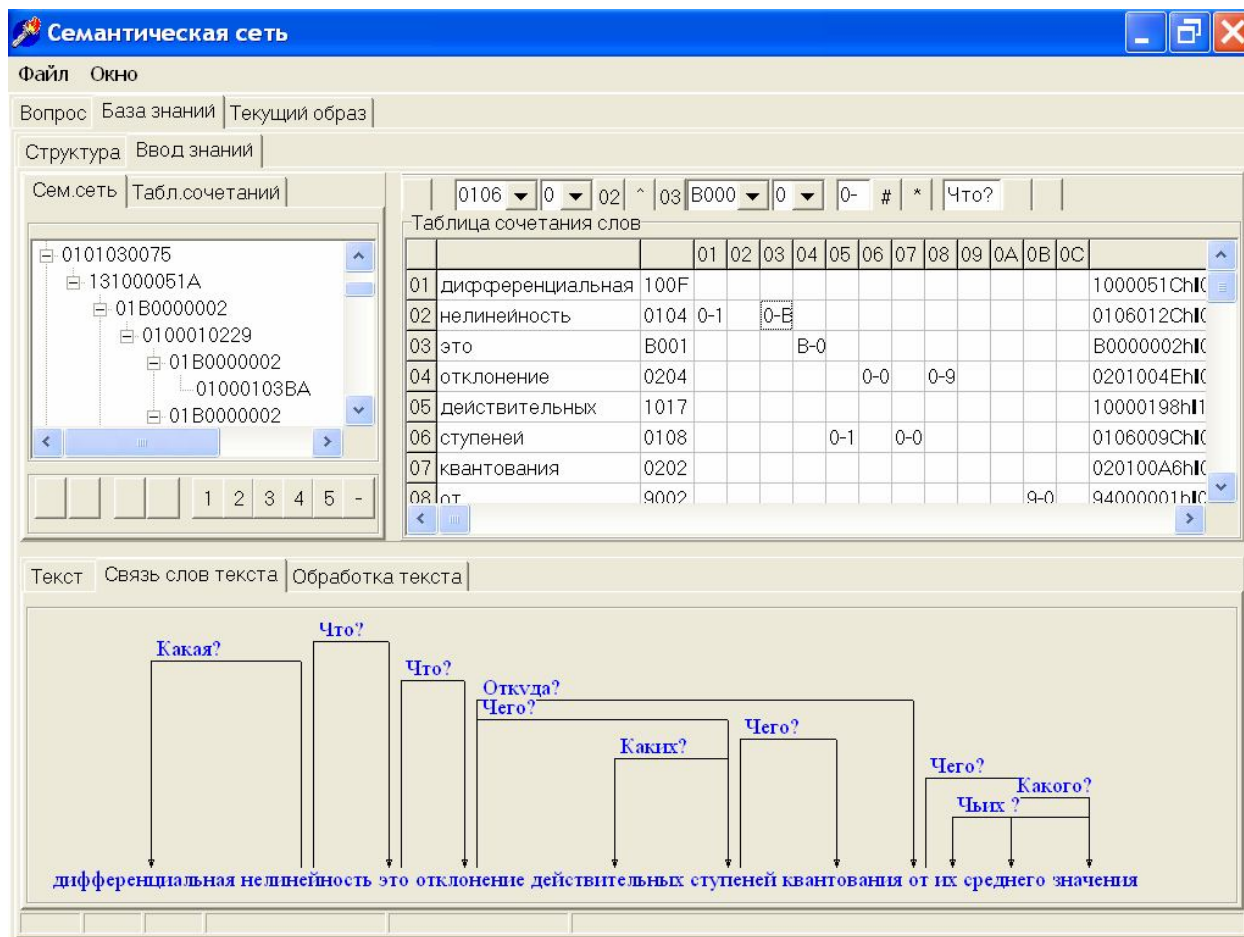


Рис. 3. Окно ввода знаний в семантическую сеть

Ввод новых слов производится в словарь, который является основной базой данных вопросно-ответной системы из списка, который автоматически создается при морфологическом анализе текста.

Данные, поступающие в словарь сочетания слов, используются при дальнейшем синтаксическом анализе текста, как при вводе знаний, так и при анализе ответов.

Загрузка знаний, полученных в процессе семантического анализа, происходит при помощи окна иерархического дерева, позволяющего создать, удалить или изменить узел или ветвь семантической сети.

Заключение

Создана система, выполняющая смысловую обработку ответа, позволяющая вводить ответ на естественном языке. Вводимый текст ответа может быть построен с помощью различных предложений, отражающих смысл вопроса. Использование предлагаемой системы при самообучении человека, позволяет производить самоконтроль уровня знаний, уменьшить влияние человеческого фактора при тестировании.

Пополнение базы знаний системы может происходить в ручном или автоматическом режиме.

ВОС используется при аттестации студентов физико-технического факультета КубГУ. Все ответы студентов после тестирования сохраняются в базе данных, что позволяет в дальнейшем анализировать, как индивидуальные знания каждого студента, так и всей группы. Это помогает выявлять «слабые моменты» в изложенном материале. В процессе работы планируется при дальнейших тестированиях индивидуально каждому студенту повторно задавать вопросы, на которые были получены неправильные ответы, оповещать преподавателя о пробелах в знаниях студентов, указывая ему на фрагменты неувоенного студентами материала.

Библиографический список

1. Богатов Н.М., Родоманов Р.Р. Автоматизация вопросно-ответного диалога в обучающей системе. Современные наукоёмкие технологии. 2006. № 4. С. 23-25.
2. Сулейманов Дж.Ш. Исследование базовых принципов построения семантического интерпретатора вопросно-ответных текстов на естественном языке в АОС. Educational Technology & Society. 2001. 4(3). С. 178-192.
3. Родоманов Р.Р., Богатов Н.М. Программа лингвистического анализа русскоязычных текстов «ПЛАРТ». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005612382 12.09.2005.

НАУЧНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ИННОВАЦИЙ

Глушак Н.В.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского,
г. Брянск

Понятный генезис инновационного процесса позволяет считать его обоснованным и выраженным как экономическое явление. Обозначив точки инициации инновационного процесса, его природу и побудительные факторы, можно перейти к обсуждению вопроса методологии исследования – научных принципов изучения явления. Приведенное описание природы инновации приводит нас к модели Оппенлендера (рис. 1, [5]), более известной как модели «взаимодействия трех систем».

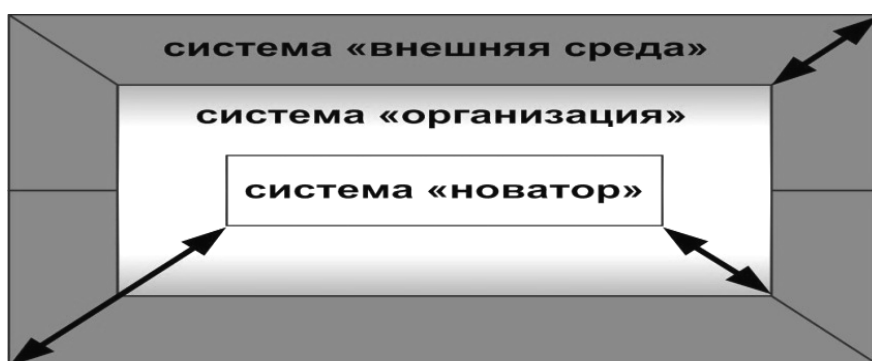


Рис. 1. Модель взаимодействия трех систем в инновационной деятельности Оппенлендера К.Х. [6]

Тройственное взаимодействие предпринимателя (у Оппенлендера - «новатора»), «организации» (субъекта принадлежности новшества) и «внешней среды» (потребителя инновации и других факторов, оказывающих влияние на принятие и распространение нововведения), выделяется в модели как предмет и объект исследования. С методологической точки зрения Оппенлендер предлагает [5] локализовать исследования инновационной деятельности на трех субъектах «новатор», «организатор», «внешняя среда» и трех взаимодействиях «но-

ватор» - «организация», «внешняя среда» и «организация» - «внешняя среда», считая остальных субъектов и взаимодействия вторичными (рис. 1).

Конечно, существуют и другие научные точки зрения на вопрос методологического базиса, предмета и объекта исследования, последовательно изложенные в работах Авербуха, Р.Н., Гусакова, М.А., Роговой, Е.М., Платонова В. В., Алексейчука Г. П., Казанцева А.К., Фирсовой С.А., Серовой Л.С. Белько С.А., Freeman С., Soete L., Kline S., Rosenberg N., Imai К. I. Nonaka, Takeuchi Н. и других. Но их анализ позволяет сделать два вывода.

Первый вывод, научно-теоретический. Взгляды на методологию инноваций, их вариативность по отношению к модели Оппенлендера, определяется исключительно акцентами и приоритетами вопросов научных исследований, ситуационными и временными рамками изложения научного подхода, а не ревью объекта и предмета изучения. Например, методологические взгляды 90-х годов (яркий пример - работы Freeman С., Soete L. [7]) на теорию инновационного менеджмента были сосредоточены на роли «внешней среды», а основной вопрос исследований – инновационная инфраструктура. С 2000 по 2004 год во главу угла ставилась «организация» и вопросы конкурентоспособности. Появление в 2002 году доктрины Porter М. об инновационном принципе современных процессов формирования конкурентоспособности (на микро, мезо и макро уровнях) вполне отвечало вопросу делового мира о новых формах обретения рыночных преимуществ. Действительно, актуальные вопросы практики инновационного менеджмента определяют и акценты совершенствования методологического базиса. В таблице 1 представлены результаты анализа интенсивности исследования вопросов инноваций в ретроспективе 2000 - 2010 года. Выделенные современной теорией инновационного менеджмента вопросы (аспекты) изучения инноваций исследованы с точки зрения ситуационной (2010 год) активности и динамики публикаций в базе данных ГРНТИ. Поле «А» (табл. 1) отражает относительную долю публикаций по вопросу в 2010 году, а поле «Д» - тенденцию изменения численности публикаций по вопросу.

Анализ проводился не только по разделу «экономические науки» - в приведенную в таблице статистику вошли все публикации с контекстом: «инновация, новшество, нововведения» в базе публикаций ГРНТИ. В частности русскоязычные и иностранные публикации по разделам «социология», «технические дисциплины» и другие были включены в оценку. Обнаружилось, что социологи активно исследуют вопросы «диффузии», а философы – «футурологию» (методы предсказания инновационных революций - creative destruction Шумпетера) и генезис новшеств. В составе публикаций по техническим дисциплинам неизбежно поднимается вопрос технико-экономической оценки, эффективности технологических инноваций. Соответственно, предложенный (табл. 1) охват автор считает полным с точки зрения современной полидисциплинарной картины интереса к отдельным вопросам инновационной теории, а выводы об актуальности вопросов исследований - корректными.

Таблица 1

Вопросы (аспекты) исследования инноваций на 2010 год (обозначения: А - степень интенсивности исследований, по относительной численности публикаций по вопросу по данным ГРНТИ на 2010 год, %; Д – динамика численности публикаций, среднегодовой прирост 2000- 2010 год, %)

Вопросы	Содержание	А, %	Д, %
Генезис, происхождение явления	Природа и причинные факторы инновационной деятельности.	17,0	-4,2
Классификация инноваций	Структура и виды новшеств, нововведений.	9,2	1,3
Факторы конкурентоспособности	Модели взаимосвязи конкурентоспособности и уровня инновационности организаций и систем.	12,5	5,6
Субъекты инновационной деятельности	Система инновационной деятельности: объекты, субъекты, инфраструктура, внешняя среда и процессы их взаимодействия.	17,4	2,2

Вопросы	Содержание	А, %	Д, %
Инновационная инфраструктура	Объекты и субъекты, обеспечивающие функционирование инновационной системы.	12,5	1,9
Инновационная политика государства	Вопросы национальной инновационной системы, закономерностей ее развития и эффективных подходов к управлению такой.	16,5	1,7
Экономика инноваций	Управление инвестиционными процессами, организационно-экономические модели реализации инновационно-инвестиционных проектов.	24,0	1,4
Экономика НИОКР	Экономика и стратегия инвестирования в НИОКР, оценка экономической эффективности НИР и ОКР.	6,3	-2,5
Эффективность технологических инноваций	Вопросы оценки влияния технологических и процессных инноваций на конкурентоспособность и себестоимость конечной потребительской продукции.	4,3	-1,2
Трансфер технологий	Процесс коммерциализации результатов НИОКР, передачи прав собственности на интеллектуальные результаты инновационной деятельности.	13,5	7,5
Инновационное развитие компаний	Принципы менеджмента организации с позиций инновационной экономики, собственно подходы к организации инновационного менеджмента в предприятии.	18,7	2,1
Инновационный процесс	Процесс последовательной трансформации инновационной идеи в коммерчески востребованный потребительский продукт.	22,9	6,4
Диффузные мо-	Процессы распространения информации о	11,9	-1,3

Вопросы	Содержание	А, %	Д, %
дели	новшестве в среде потребителей и принятия социально-экономическим сообществом инновационного продукта как объекта потребления.		
Жизненный цикл инновационного продукта	Цикл существования инновационного продукта, включающий его формирование и развитие на прединвестиционном и инвестиционном этапах, включая процесс коммерциализации на эксплуатационном этапе.	10,8	3,5

Взгляд на количественные оценки в табл. 1 приводит нас к вполне очевидному пониманию интереса науки и делового мира к процессным аспектам инновационной деятельности. Сохранение интереса к вопросам «трансфера технологий» и акцентирование проблемы организации «инновационных процессов» вполне объяснимы и наглядно проявляются как основной вопрос обсуждения на крупных международных инновационных форумах: «Международный Петербургский Экономический Форум» (2009-2010), «Петербургский инновационный Форум» (2010), «Ярославский Экономический Форум» (2010), «Инновационный Форум «World Hi-Tech Forum» (Лондон 2008-2010), «World Innovation Forum» (Нью-Йорк, США, 2007-2010).

Актуальность исследования инновационных процессов вполне объяснима и с позиций текущего состояния мировой инновационной теории и практики.

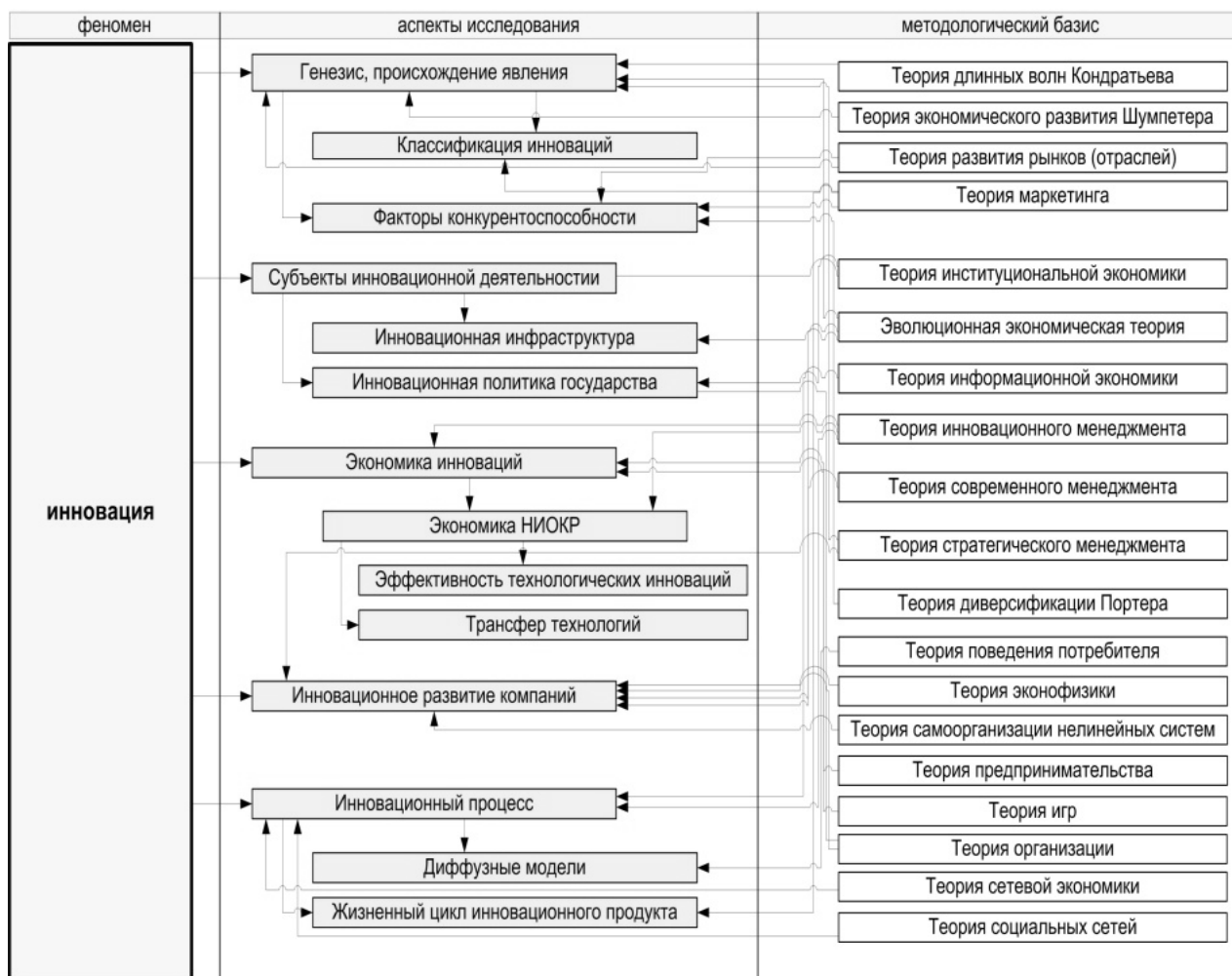
Во-первых, генезис инноваций на современном этапе развития методологии воспринимается достаточно однозначно: ревизия вопроса сводится к объяснению («старого, понятного» [2]) явления с позиций новых теоретических знаний (эволюционная экономическая теория, теория эконофизики, самоорганизации и других).

Во-вторых, анализ «структуры субъектов инновационной деятельности» не имеет самостоятельного методологического значения, только теоретическое - в исследованиях новых принципов и подходов к организации инновационных

процессов. Равно как и вопросы экономики инновационных решений в большей степени замыкаются на вопросы управления финансовой деятельностью – инвестиционные решения в условиях развивающейся институциональной организации мировой экономики. В-третьих, вопрос «инновационного развития организаций», по сути, сводится к анализу и поиску новых моделей менеджмента для инновационно ориентированных предприятий. Это направление вполне удачно развивается в рамках традиционной теории менеджмента. В-четвертых, инновационный процесс является наиболее актуальной и значимой проблемой обсуждения (поля «А», «Д», табл. 1) поскольку именно он является стержнем взаимоотношений участников инвестиционного проекта и хозяйственных принципов взаимодействия. По мнению авторов, вопрос трансфера технологий также является этапной составляющей инновационного процесса, равно как и аспекты исследования диффузий и циклов формирования новшества (рис. 2). Широта охвата научных и практических вопросов управления новшествами при исследовании «инновационных процессов» хорошо демонстрируется через одно из принимаемых в работе определений. «Инновационный процесс в узком смысле, – как внедрение результатов НИОКР в хозяйственную деятельность, в широком – динамичное и позитивно оцениваемое внедрение нового (либо не использовавшегося в данной области) знания в практическую деятельность (экономическую, социальную, экологическую и т.д.)» (Гареев Т.Ф., [1]). Обобщая вышесказанное можно утверждать: актуальным вопросом, объектом исследования определяется инновационный процесс, консолидирующий современную теоретическую и практическую проблематику изучения принципов обретения конкурентоспособности через инновационные факторы.

Второй методологический вывод автор делает относительно складывающейся тенденции развития методологического базиса изучения инноваций – совокупности теории, используемых в объяснении феномена. Содержание вывода: современное исследование инновационных процессов невозможно реализовать в рамках одной теоретической дисциплины, например «инновационного

менеджмента», необходимо реализовывать полидисциплинарный и междисциплинарный подход. Для демонстрации и обоснования предложенного вывода автором предложена компиляционная схема (рис. 2), отражающая современные научные теории, дисциплины, привлекаемые для исследования различных аспектов инновационной деятельности.



**Рис. 2. Методология исследований феномена инновации:
аспекты и теории**

В принципе, обозначенную совокупность теорий (рис. 2) можно рассматривать как современную методологию (принципы познания) исследования инноваций. Она действительно выражена как полидисциплинарный базис, и многие современные ученые соглашаются с данной точкой зрения: «...изучение актуальных вопросов современного инновационного пространства и процессов

возможно только в рамках достижений всего комплекса теоретических знаний, достижений человечества» (Chesbrough Н. [6]). Так, например, Карлик А.Е., Титов А.Б., Алексеев А.А., Полшков Д.А., Самойлов А.В. в научной работе «Инновационные аспекты развития предприятий» [4] очень удачно объясняют ряд феноменов инновационного развития, основываясь на генетических (биологических) параллелях в рамках теории эволюционной экономики, а вопросы размерности инновационных подразделений - используя методы эконофизики и фрактальной теории Мандельброта. Ma J., Plonka G. предлагают объяснение [9] процессов диффузии с позиций теории игр, а O'Sullivan D., Dooley L. [10] те же процессы рассматривают с позиций теорий информационной экономики, социальных сетей, сетевой экономики.

Вообще-то точка зрения на формирование общенаучной методологии как междисциплинарного знания достаточно популярна и не нова. Николис Г., Пригожин И., основоположники современного научного структурализма, в работе «Познание сложного» [4] предлагают в качестве принципа познания сложных систем – базовые законы физики (термодинамики). А Houston Tom R. еще в 1985 году утверждал, что все процессы в природе «аналогичны и параллельны»: «... всегда можно смоделировать любой социально-экономический процесс по аналогиям, уже описанным в естественных науках (физике, биологии)...» [8]. Это дает автору основание использовать нетрадиционные междисциплинарные теоретические подходы для обоснования отдельных выводов и заключений, сформированных в отношении объекта настоящего исследования – инновационного процесса.

Итак, автором продемонстрирован методологический базис исследования, в рамках которого сделано два общенаучных вывода: о принятии модели Оппенлендера К.Х. в качестве научного базиса в изучении инноваций и междисциплинарном характере теоретического базиса анализа инновационных процессов.

Библиографический список

1. Гареев, Т.Ф. Трансфер технологий и диффузия инноваций как элементы инновационного процесса // Вестник ТИСБИ, 2005.
2. Ильенкова, С. Д., Гохберг Л. М., Ягудин С. Ю., Кузнецов В. И., Бандурин А. В., Ильенкова Н. Д., Пудич В. С., Смирнов С. А. Инновационный менеджмент. Учебник / Под ред. С. Д. Ильенковой, — М.: Юнити, 1997.
3. Карлик, А.Е., Титов, А.Б., Алексеев, А.А., Полшков, Д.А., Самойлов, А.В. Инновационные аспекты развития предприятий. - СПб., Изд-во СПбГУЭиФ, 2009.
4. Николис, Г., Пригожин, И. Познание сложного. Введение: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.
5. Олейник, А. Модель сетевого капитализма. Институциональная экономика: Учебник / Под общ. ред. А. Олейника. – М.: ИНФРА-М, 2005.
6. Chesbrough, H. Open Innovation: A New Paradigm for Understanding Industrial Innovation, in Henry Chesbrough, Wim Vanhaverbeke, and Joel West, eds., Open Innovation: Researching a New Paradigm. Oxford: Oxford University Press, pp. 1-12., 2006.
7. Freeman, C., Soete, L. The Economics of industrial innovation, 3d. ed. London: Pinter, 1997.
8. Houston, Tom R. Why Models Go Wrong, Byte, October 1985.
9. Ma, J., Plonka, G., The Curvelet Transform, SPMag (27), No. 2, 2010.
10. O'Sullivan, D., Dooley, L. Applying innovation / Thousand Oaks: Sage, 2009.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТЕКСТОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Кошкин Д.Е., Дементьев И.О.

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики, г. Москва.

В настоящей работе предлагается метод кластеризации текстов на основе выявления формальной стилистики автора с использованием искусственных нейронных сетей. Предложен подход к разрешению задачи с использованием вычислительного кластера Beowulf.

Цели кластеризации могут быть различными в зависимости от особенностей конкретной прикладной задачи:

- понять структуру множества объектов, разбив его на группы схожих объектов. Упростить дальнейшую обработку данных и принятия решений, работая с каждым кластером по отдельности (стратегия разделяй и властвуй);
- сократить объём хранимых данных в случае сверхбольшой выборки, оставив по одному наиболее типичному представителю от каждого кластера;
- выделить нетипичные объекты, которые не подходят ни к одному из кластеров. Эту задачу называют одноклассовой классификацией, обнаружением нетипичности или новизны.

В первом случае число кластеров стараются сделать поменьше. Во втором случае важнее обеспечить высокую степень сходства объектов внутри каждого кластера, а кластеров может быть сколько угодно. В третьем случае наибольший интерес представляют отдельные объекты, не вписывающиеся ни в один из кластеров.

Для электронных библиотек первый способ кластеризации наиболее приемлем.

Текст - в языкознании последовательность из нескольких (или многих) предложений, построенных согласно правилам языка, упорядоченный набор слов, предназначенный для того, чтобы выразить некий смысл. В лингвистике термин используется в широком значении, включая в себя и устную речь [1]. Большинство текстов в повседневной жизни состоит из ядра словарной системы (примерно 2 500 слов), таким образом, появление слов, не входящих в это ядро, имеет большую значимость для выявления инвариантных авторских черт. Другим параметром анализа является порядок сочетаемости слов, т.е. взаимозависимость появления в тексте двух или более различных слов в одном сочетании. Установлено, что сочетаемость слов в тексте более персонализирована, чем единичное вхождение лексемы [2]. С точки зрения данных, текст – упорядоченный набор слов-переменных, которые можно использовать в качестве его описания. Это описание сохраняет общее направление тематики текста, так как при прочтении набора-описания можно составить представление о том, что текст описывает и к какой тематике он принадлежит. Если есть возможность определить тематику текста по набору слов, входящих в него, то группы текстов можно разделять на подгруппы автоматически.

Одним из возможных путей предобработки текстов для кластеризации является представление текста в виде вектора значений (методы представления текста в виде вектора значений описаны в работе «Кластеризация текста на основе анализа слов с применением распределенных вычислений» [3]).

Для решения поставленной задачи первоначально определим нотации:

n – размерность пространства, определяемая количеством учитываемых в текстах слов. Так как нейронные сети требуют обучения, занимающего продолжительное время, то авторы считают, что ограничение в 25 000 слов, не входящих в ядро словарной системы, оправданно сокращает время обучения. Если 2 500 слов входят в ядро, используемое повсеместно, то эти слова можно исключать из вектора значений, так как они не внесут вклад в определение различий между текстами, внося помехи в работу сети. Таким образом, размер-

ность пространства разумно ограничить 27 500 осями, получив конечномерное пространство с вероятной возможностью численного решения поставленной задачи;

m – количество статей, которые требуется классифицировать по требуемому признаку. Признак (тематика/авторство) выбирается в зависимости от целей кластеризации и должен быть отражен на начальной, обучающей, выборке;

k – результирующее количество кластеров, определяемое как число, близкое к $\sqrt[3]{m}$ [3];

c – число итераций обучения сети;

$f(c)$ – стоп-функция, определяющая успех обучения нейронной сети;

N_a – число нейронов, участвующих в сети;

N_s – структура сети, переменное значение, зависящее от конкретной реализации сети;

$N_b(N_a, N_s, n)$ – число связей и, соответственно, весов в нейронной сети. Как функция, имеет переменные значения, зависящие от структуры сети, количества нейронов и размерности пространства;

$L(m)$ – функция обучения, зависящая от количества обучающих примеров;

$\tau(N_a, N_b, f(c), L(m))$ – время на проверку нейронной сети.

Построение нейронной сети во многом будет зависеть от количества кластеров, на которое будет разбиваться пространство. Для ответа на вопрос, «К каким кластерам принадлежит текст?», потребуется в последнем слое сети поставить ровно столько нейронов, сколько кластеров запланировано. Элемент подается на вход сети, на выходе будет значение, говорящее о том, к какому кластеру принадлежит элемент. Так же, от каждого конкретного случая будет зависеть структура сети при добавлении каждого следующего нейрона (Рисунок 1).

Для k кластеров и N_a нейронов количество комбинаций расположения будет выражаться значениями:

$$\begin{cases} 2^{N_a - k - 1}, & \text{при } N_a > k \\ 2^0, & \text{при } N_a = k \end{cases}$$

что важно при определении функции N_b .

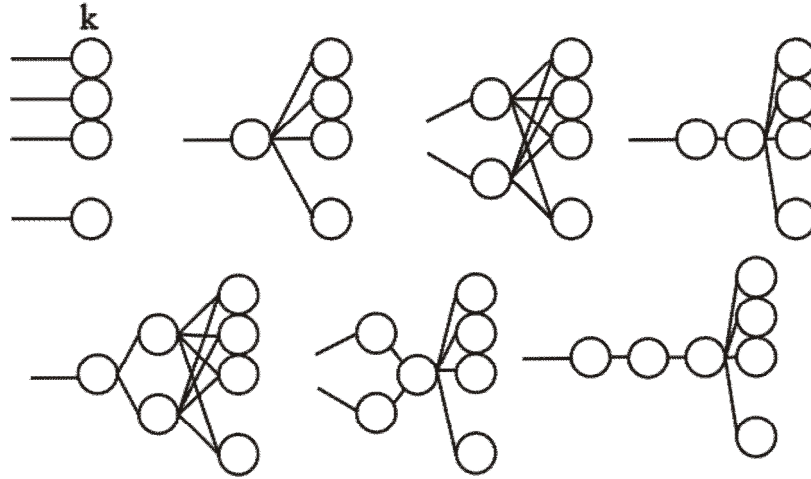


Рис. 1. Примеры нейронных сетей с 1,2,3 дополнительными нейронами ($k+1, k+2$ и $k+3$ нейрона)

Вариантов нейронных сетей возможно несколько для одинакового количества нейронов, при этом разные топологии будут работать по-разному. Прочитаем функцию «прогнозируемого количества рассчитываемых» вариантов нейронных сетей $F(k+i)$. Пусть необходимая нейронная сеть состоит из $k+i$ нейронов, тогда для ее нахождения, возможно, потребуется проверить следующее количество нейронных сетей:

$$F(k+i) = 1 + 2^{k+1-k-1} + 2^{k+2-k-1} + 2^{k+3-k-1} + \dots + 2^{k+i-k-1} = 1 + \sum_{j=0}^{i-1} 2^j$$

Для всего процесса, в общем случае, потребуется время

$$T = F(k+i) \cdot \tau(k, N_b, f(c), L(m))$$

$$T = 1 \cdot \tau(k, N_b, f(c), L(m)) + \sum_{j=0}^{i-1} 2^j \cdot \tau(k+1+j, N_b, f(c), L(m))$$

Если ввести все переменные и предположить, что $N_a = k$, то:

$$T(k, N_a, n, i, f(c), L(m)) = \tau(k, N_b(N_a, N_s, n), f(c), L(m)) + \sum_{j=0}^{i-1} 2^j \cdot \tau(k+1+j, N_b(N_a, N_s, n), f(c), L(m))$$

Подобные требовательные к времени задачи можно решать как на суперкомпьютерах, так и на вычислительных кластерах и в GRID-системах, распараллелив задачу, решение может быть достигнуто быстрее. Наиболее простым в реализации является гетерогенный вычислительный кластер типа Beowulf [5]. В работе [4] были проведены оценки прироста скорости обучения нейронных сетей.

Для организации понадобится операционная система семейства GNU/Linux, а так же один из представленных ниже пакетов:

- distcc, MPICH — специализированные средства для распараллеливания работы программ, distcc допускает параллельную компиляцию в GNU Compiler Collection.
- Linux Virtual Server, Linux-HA — узловое ПО для распределения запросов между вычислительными серверами.
- MOSIX, openMosix, Kerrighed, OpenSSI, PelicaHPC — полнофункциональные кластерные среды, встроенные в ядро, автоматически распределяющие задачи между однородными узлами. OpenSSI, openMosix и Kerrighed создают среду единой операционной системы между узлами.

Весь процесс введения в строй подобной системы начинается с установки операционной системы семейства GNU/Linux. Далее следует организовать TFTP, DHCP, SSH, DNS, NFS – сервера, и скомпилировать новое ядро, содержащее код модуля kerrighed. Скачав этот образ, узел получает все требуемые инструкции, чтобы подгружать сетевую файловую систему и драйвера. После чего главный узел определяет подключенный к нему вычислитель и по протоколу SSH организует с ним взаимодействие, миграцию процессов, данных, распараллеливание совместимых процессов и управляет всем техническим обеспечением системы-клиента.

В данной статье предложена организация нейронной сети для кластеризации текстов по тематике/автору с использованием распределенных вычислений, применяя высокопроизводительный вычислительный кластер. Разработан математический аппарат для расчета примерного времени работы алгоритма в зависимости от параметров кластеризации.

Библиографический список

1. Т. 25: Большая советская энциклопедия. [Текст]: в 30 т. /Гл. ред. А.М. Прохоров, 3-е изд. М., «Сов. энциклопедия», 1969-78., 600 стр., илл.; 30 л. илл. и карт.
2. Основы судебного речеведения: Монография / Галяшина Е.И.; под ред. проф. М. В. Горбаневского. – М.: СТЭНСИ, 2003. – 236 с.
3. Сигов А.С., Кошкин Д.Е., Дробнов С.Е., Кластеризация текста на основе анализа слов с применением распределенных вычислений. Журнал «Информатизация образования и науки», №2(10) апрель 2011, с. 74-80, - М. «Информика»
4. Дробнов С.Е., Кошкин Д.Е. Анализ ускорения обучения нейронных сетей при применении GRID-систем./Материалы IV Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Часть I, с. 85-88.
5. Beowulf: Параллельные вычисления на Linux-кластерах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.parallel.ru/computers/reviews/beowulf.html>. (по состоянию на 4.06.12)

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПО АСТРОФИЗИКЕ

Лысенко В.Е., Иванов А.Л.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет»,
физико-технический факультет, кафедра оптоэлектроники, г. Краснодар

Целью, которую поставил себе коллектив разработчиков учебно-методического инфокоммуникационного комплекса по астрофизике, является создание сетевого ресурса, обеспечивающего учебный процесс качественными материалами для практических работ по разделам школьной программы по физике, связанным с астрофизикой. Предполагается, что комплекс будет участвовать в учебном процессе учреждений региона, реализующих программы среднего (полного) общего образования, дополнительного образования.

Данный учебно-методический комплекс будет выполнять следующие функции: 1) обеспечивать доступ к материалам практических работ, консультацию по их проведению и проверку; 2) обеспечивать возможность проектной деятельности школьников и студентов.

В состав данного комплекса входят следующие компоненты: web-сайт (пока не запущен), инструкции, методические описания практических работ и необходимые материалы к ним, а также специфическое оборудование (автоматизированный телескоп MEADE диам. 300 мм, ПЗС-камера SBIG ST-8XME, управляющий компьютер с доступом в Интернет, специализированное программное обеспечение). Сайт комплекса будет размещен на сервере Кубанского государственного университета, а аппаратная часть размещена в астрофизической оптической обсерватории университета.

Режимы работы астрофизического комплекса следующие. Во-первых, комплекс работает как Интернет-ресурс. Остальные режимы интерактивные: наблюдения по представленной программе пользователя и визуальные наблюдения в реальном времени, транслируемые по Интернет (удаленный доступ).

Так как результаты наблюдений — это фотоснимки, по которым можно произвести измерения некоторых величин, то режим удаленного доступа к телескопу в режиме реального времени основным не является, но может быть реализован с помощью ПО Team Viewer 6.0 в режиме демонстрации при участии технического сотрудника обсерватории.

На данный момент разработаны четыре практические работы для школьников и учащихся центров дополнительного образования, реализацию которых и хочется обсудить с педагогическим сообществом. Охарактеризуем их в целом.

В практических работах используются инфокоммуникационные технологии, и не требуется работать ни с каким оборудованием кроме школьного или домашнего компьютера. Это хорошо, потому что работа с астрофизическим оборудованием требует овладения специфическими знаниями и навыками, на это требуется дополнительное время, это требует присутствия в обсерватории, в том числе в ночное время, при работе с реальным оборудованием следует обращать внимание на технику безопасности. Реализация практических работ с помощью инфокоммуникационных технологий создает условия для формирования специфических компетенций работы с информацией, и сводит к минимуму отвлекающие факторы (методически сложные наблюдения), так как цель практических работ — изучение собственно космического объекта или астрофизических закономерностей. Это плохо, что практические работы реализованы с помощью инфокоммуникационных технологий, ведь при этом исчезают условия для становления компетенций работы с настоящими приборами.

В практических работах активно используются электронные таблицы, которые входят в состав офисных программных пакетов. Это хорошо, так как первичные навыки обработки числовой информации нарабатываются как раз при использовании электронных таблиц — легкодоступного и мощного вычислительного средства, обладающего кроме того широким спектром возможностей графического представления данных. Компетенции, формируемые исполь-

зованием электронных таблиц, необходимы и для работы с системами управления базами данных. Возможно, плохо, что в работах не используются специализированные астрофизические и математические программные пакеты, применение которых способствовало бы формированию навыков работы со специализированным ПО, но это еще один отвлекающий фактор.

Все практические работы по методике выполнения можно условно разделить на две группы: расчетные и статистические. Расчетные работы подразумевают организацию вычислений как одной из задач и анализ их результатов. Примерами таких работ служат «Определение радиусов орбит и периодов обращения спутников планет-гигантов» и «Изучение спектра Солнца», в которых необходимо определить требуемые параметры. Статистические работы требуют правильно подставить необходимые массивы данных в заготовленную форму, в которой будет произведена их визуализация в режиме достаточно сложной диаграммы, и по виду диаграммы сделать выводы по цели работы. В данный раздел входят работы «Изучение собственных движений звезд» и «Изучение строения Галактики».

Тематически предложенные практические работы охватывают следующие темы «Строение Солнечной системы», «Солнце — ближайшая к нам звезда» и «Современные представления о происхождении и эволюции Солнца, звезд, галактик» из авторской программы по физике для 10 — 11 классов общеобразовательных учреждений В. С. Данюшенкова и О. В. Коршуновой. Рассмотрим теперь эти практические работы более подробно.

Первая практическая работа «Определение радиусов орбит и периодов обращения спутников планет». Ее цель проверить III закон Кеплера. Выполняющему работу следует решить следующие задачи: получить расстояния спутников от центра планеты в разные моменты времени по фотоснимкам; определить радиусы орбит спутников и периоды их обращения, считая орбиты круговыми для математической простоты. Расстояние центра спутника от центра диска планеты определяется в любом графическом редакторе (рекомендо-

ван Paint.Net). Работа хоть и объемная, но выполнимая, развивающая навыки работы не только с электронными таблицами, но и с графическими программами.

Для работы предназначены три строго датированных снимка системы спутников планеты-гиганта (Юпитера или Сатурна), полученных с небольшим временным промежутком. Выполняющему работу следует определить расстояние спутников от центра планеты, для чего необходимо создать расчетную таблицу, используя математическую модель, данную в описании работы. Полученные результаты следует подставить в формулу III закона Кеплера и сделать вывод о движении рассматриваемых тел.

Данная работа знакомит учащихся с законами движения тел под действием силы тяготения, способствует формированию образа Солнечной системы, формирует навыки расчетов в среде электронных таблиц.

Вторая практическая работа «Изучение спектра Солнца» имеет цель определить температуру внешних оболочек Солнца. Для достижения цели следует решить следующие задачи: идентифицировать на диаграмме солнечного спектра спектральные линии водорода, сделать вывод о химическом составе Солнца; по ширине спектральных линий определить температуру поглощающего газа хромосферы; по максимуму интенсивности спектра Солнца на основании закона Вина определить температуру излучающего газа фотосферы. Для работы используется интернет-сайт Парижской обсерватории, содержащий инфокоммуникационную версию атласа солнечного спектра доступного по адресу http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php. Для расчетов рекомендуется создать несложную таблицу. Идентификация линий серии Бальмера производится на основании расчета длин волн по формуле Бальмера. Для определения температуры по инфокоммуникационной диаграмме спектра определяется ширина линий, расчет температуры по формуле Доплера также производится в электронной таблице.

Познавательная цель этой практической работы — познакомить учащихся со строением внешних областей Солнца, методами получения информации из спектра источника излучения, формирование исследовательской компетенции.

Третья практическая работа «Изучение собственных движений звезд» принадлежит к группе статистических. Цель работы: изучить звездные сообщества по их характерным собственным движениям. Задачи, которые должны быть выполнены, следующие: в среде электронных таблиц в режиме диаграммы визуализировать собственные движения звезд в заданных областях неба; по полученным изображениям выделить звезды со сходными параметрами движения (направление и величина); сделать вывод о принадлежности найденных звезд скоплению или ассоциации, а также об условиях их образования и эволюции. В данной работе в качестве исходных данных используются фрагменты каталогов UCAC2 и UCAC3. В качестве инструмента используется документ электронных таблиц с настроенной диаграммой. Осями диаграммы являются экваториальные координаты прямое восхождение и склонение, но не в традиционных угловых единицах, а в радианах. Это несущественно для построения, но облегчает расчеты. Особенностью работы с диаграммой является самостоятельная установка свойств координатных осей в зависимости от размеров изучаемого объекта. Но для достаточно компактных объектов искажения, возникающие вследствие того, что сферическое поле нельзя без искажений отобразить на плоской диаграмме, невелики и зрительно незаметны. Еще одним недостатком является то, что звезды разного блеска отображаются маркерами одинаковых размеров, что несколько сбивает с толку при сравнении диаграммы с фотоснимком или картой, но для выполнения задачи также несущественно.

Познавательная цель третьей практической работы — знакомство учащихся с типами звездных сообществ, формирование понятия общности происхождения звезд и эволюции звездных сообществ. Работа также дает первичное представление о структуре Галактики.

Четвертая практическая работа называется «Изучение строения Галактики» и имеет цель познакомить учащихся со структурой Галактики в целом. Задачи, реализуемые в работе таковы: в среде электронных таблиц в режиме диаграммы визуализировать шаровые и рассеянные звездные скопления, планетарные и светлые туманности в галактических координатах, сделать вывод о составе галактических подсистем. Данная работа также относится к группе статистических. Учащиеся должны увидеть плоскую и сферическую подсистемы галактики, познакомиться с типами звездного населения.

В данной работе используется Новый Общий Каталог (New General Catalog — NGC) Туманностей и Звездных Скоплений Джона Дрейера. Одно из последних его изданий с современными координатами всех объектов, вышло в издательстве Sky Publishing Corporation в 1988 году под редакцией Роджера В. Синнотта под названием NGC 2000.0, который доступен в форме текстового документа на сайте Центра астрономических данных в Страсбурге. При выполнении работы развиваются навыки работы в среде электронных таблиц.

На качество образования влияет множество разнообразных факторов, важнейшими среди них являются качество целей образовательного процесса; качество средств и условий достижения целей образовательного процесса; качество конечного результата образовательного процесса.

Цели практических работ имеют как познавательный в области астрофизики, так и компетентностный характер, а материал, на котором они реализованы, формирует современное научное мировоззрение. Качество средств обучения определяется современным уровнем развития компьютерной техники и коммуникаций. По мнению авторов, ввод в эксплуатацию учебно-методического инфокоммуникационного комплекса по астрофизике позволит повысить качество образования в области физики и информатики даже в удаленных населенных пунктах региона, а также сделать еще один шаг к усилению связи школа — вуз.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Палий Н.Ю.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Успех в описании явления природы определяется удачным выбором его физической модели. Любая достаточно общая физическая теория сложна с математической точки зрения. Поэтому и при создании теории, и в дальнейшем ее развитии и применении особую роль играют простейшие предельные случаи, допускающие аналитическое или численное решение. Асимптотический подход к сложной задаче состоит в трактовке исходной сложной системы, как близкой к некоторой более простой [1]. Такой подход, соответствуя физической интуиции и способствуя ее развитию, часто приводит к формированию новых физических понятий. Как отмечал Р. Пайерлс, искусство выбора подходящего приближения, проверки его непротиворечивости и отыскания, по крайней мере, интуитивных соображений по поводу удовлетворенности данного приближения является куда более уточненным, чем искусство нахождения строгого решения уравнения.

Асимптотический подход к построению модели явления позволяет устанавливать связи между различными физическими теориями. А. Эйнштейн указывал, что лучший жребий физической теории – послужить основой для более общей теории, оставаясь в ней предельным случаем [2].

Большое значение имеет развитие у учащихся культуры и навыков математической разработки физической модели изучаемого явления. В качестве примера остановимся на выводе основного уравнения кинетической теории газов.

Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа занимает особое место в школьном курсе физики [3]. Здесь впервые строится количественная микроскопическая модель изучаемого макроскопиче-

ского объекта: рассматриваются микроскопические характеристики системы – координаты и скорости отдельных молекул, подчиняющихся законам классической механики, и делаются предсказания о поведении макроскопических характеристик системы, таких как давление и температура. Поэтому очень важно при изучении этой темы научить учащихся правильной манере рассуждений, позволяющей делать адекватные выводы о свойствах макроскопических параметров на основе рассмотрения микроскопических параметров. Здесь очень часто делается серьезная методическая ошибка, навеянная определенным жаргоном, используемым в статистической физике, которая способна заложить у учащихся совершенно неправильные представления о том, как следует проводить рассуждения при переходе от микроскопической картины явления к макроскопической. Речь идет об «усреднении» результата, который получается сначала в предположении об одинаковости скоростей всех молекул газа. Между тем, нужно не «усреднять» результат, полученный в указанном предположении, а, рассмотрев эффект, производимый одной молекулой, суммировать затем по всем молекулам, заменяя возникающие при этом суммы (в данном случае – сумму квадратов скоростей всех молекул) с помощью вводимых по определению средних характеристик (в данном случае $\langle V^2 \rangle = (V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2)/N$). У школьника должно выработаться совершенно отчетливое представление о том, что следует именно суммировать результаты действия отдельных молекул, а не «усреднять» их.

Следует также отметить, что в ряде методических пособий по физике для учителей средней школы, при изложении этого вопроса делается еще более грубая методическая ошибка, которая затем приводит к не менее грубой физической ошибке. Эта ошибка заключается в том, что указав на отсутствие в газе в состоянии термодинамического равновесия выделенных направлений движения молекул, авторы затем выбирают произвольное направление движения молекул и начинают рассуждать о том, «сколько в среднем молекул движется вдоль данного направления», получая коэффициент $1/3$. А это уже грубая физи-

ческая ошибка, ибо все направления (а не только выбранное авторами) равноправны, и в газе не хватит молекул, чтобы на каждое направление распределить по $1/3$ их полного числа. Здесь опять проводится пресловутое «усреднение», которое даже строго и не определено. Правильный окончательный результат, при таком рассуждении получается случайно, благодаря тому обстоятельству, что суммируются именно квадраты скоростей молекул. Если таким способом подсчитывать, например, среднее число ударов молекул о стенку в единицу времени, то правильный результат получить уже не удастся.

Указанная методическая ошибка очень поучительна, она вкралась даже в некоторые университетские курсы общей физики. Ее легко понять, если, провозгласив отсутствие избранных направлений в газе, не заниматься гаданием о числе молекул, движущихся вдоль какого-либо направления, а изобразить сначала распределение скоростей в какой-либо плоскости для тех молекул, модули скорости которых лежат в интервале от V до $V+\Delta V$. Только теперь можно выбирать определенное направление, и сразу видно, что все фигурирующие молекулы имеют составляющую скорости вдоль этого направления. Очевидно, что такой же результат получится и при рассмотрении распределения направлений скоростей молекул в пространстве. Отметим, что к множителю $1/3$ может привести распределение скоростей, однако, такое распределение соответствует не полной хаотичности движения молекул, а весьма высокой степени упорядоченности этого движения, чего, естественно, в действительности нет.

Корректный вывод основного уравнения кинетической теории идеального газа должен удовлетворять следующим условиям:

1. Должна быть четко оговорена используемая модель идеального газа, описан характер движения молекул и их столкновений со стенками сосуда и друг другом.
2. Следует рассмотреть результат соударений одной молекулы со стенкой и выразить передаваемый стенке импульс через индивидуальные характеристики этой молекулы.

3. «Усреднять» результаты удара одной молекулы о стенку следует путем суммирования по всем молекулам газа. Нельзя «собирать» окончательный результат, используя какие-то уже усредненные блоки. Другими словами, усреднение проводится только один раз – нельзя, например, умножить «средний» результат удара одной молекулы на «среднее число молекул, движущихся вдоль одного направления». Изложенные выше часто встречающиеся ошибки особенно неприятны потому, что они приводят к запоминанию неверных знаний и навыков рассуждений как основу представлений о статистических усреднениях, на которых построена современная статистическая физика.

Существует элементарный вывод основного уравнения кинетической теории идеального газа, при котором вообще не вводится никаких численных коэффициентов, связанных с характером движения молекул газа. Воспроизведем основные моменты такого вывода, опуская детальное описание стандартных положений, встречающихся при любом выводе уравнения. Будем считать, что газ, находится в сферическом сосуде радиусом R . Рассмотрим, сечение сосуда плоскостью, проходящей через его центр и через какую-либо прямолинейную траекторию полета выделенной молекулы между двумя последовательными соударениями со стенкой сосуда, которые считаем абсолютно упругими. Очевидно, что такое сечение представляет собой круг радиуса R . В отсутствие соударений с другими молекулами выделенная будет при своем движении описывать розетку (замкнутую или незамкнутую) с углом 2α при вершине. Изменение импульса молекулы при очередном соударении со стенкой есть

$$\Delta p = mv' - mv$$

Так как модуль скорости молекулы при упругом ударе не изменяется, то для модуля импульса, передаваемого молекулой стенке по нормали к ней при каждом соударении, имеем

$$\Delta p = 2mv \cos \alpha$$

Рассмотрим достаточно большой промежуток времени Δt , за который молекула испытает много соударений со стенкой. В пренебрежении собственными размерами молекул и их столкновениями друг с другом, число $\nu_{\Delta t}$ таких соуда-

рений за время Δt можно найти, поделив пройденный за время Δt путь на расстояние, проходимое между двумя последовательными соударениями, $s=2R\cos\alpha$:

$$v_{\Delta t} = \frac{v \Delta t}{2R \cos\alpha}$$

Для модуля импульса, переданного молекулой стенке по нормали к ней в результате $v_{\Delta t}$ ударов, очевидно, имеем

$$\Delta p v_{\Delta t} = 2mv \cos\alpha \frac{v \Delta t}{2R \cos\alpha} = \frac{m v^2}{R} \Delta t$$

Видно, что эта величина не зависит от угла α . Если заменить действие на стену отдельных ударов некоторой постоянной силой, которая за время Δt передала бы стенке такой же импульс, то для модуля этой силы справедливо

$$F = \frac{m v^2}{R}$$

Легко видеть разумность этого промежуточного результата: в предельном случае $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ молекула все время скользит вдоль стенки и действует на нее с силой, модуль которой, очевидно, равен как раз этой величине.

Теперь следует сделать предположение о полной хаотичности теплового движения молекул. В рассматриваемом случае это означает, что молекулы при своем движении «обстукивают» всю внутреннюю поверхность стенки сосуда. Для нахождения производимого ими суммарного давления на стенку следует сложить модули всех «сил» отдельных молекул и поделить результат на площадь поверхности стенки. Получим

$$p = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{m}{R} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) \quad (1)$$

Введем по определению среднее значение

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{N} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) \quad (2)$$

где N – полное число молекул в газе. Обозначим через n среднее число молекул в единице объема сосуда. Тогда

$$N = nV = n \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (3)$$

Подставляя соотношения (2) в (1), учитывая (3), получим

$$p = \frac{1}{3}nm\langle v^2 \rangle \quad (4).$$

У школьника должно выработаться совершенно отчетливое представление о том, что следует именно суммировать результаты действия отдельных молекул, а не «усреднять» их.

Следует также отметить, что в ряде методических пособий по физике для учителей средней школы при изложении этого вопроса делается еще более глубокая методическая ошибка, которая затем приводит к не менее грубой физической ошибке. Эта ошибка заключается в том, что указав на отсутствие в газе в состоянии термодинамического равновесия выделенных направлений движения молекул, авторы затем выбирают произвольное направление и начинают рассуждать о том, «сколько в среднем молекул движется вдоль данного направления», получая коэффициент $1/3$. Здесь опять проводится пресловутое «усреднение», которое даже строго и не определено. Правильный окончательный результат при таком рассуждении получается случайно, благодаря тому обстоятельству, что суммируется именно квадраты скоростей молекул. Если таким образом подсчитывать, например, среднее число ударов молекул о стенку в единицу времени, то правильный результат получить уже не удастся.

Только теперь можно выбирать определенное направление, и сразу видно, что все фигурирующие молекулы имеют составляющую скорости вдоль этого направления. Очевидно, что такой же результат получится и при рассмотрении распределения скоростей молекул в пространстве. Отметим, что к множителю $1/3$ может привести распределение скоростей, однако такое распределение соответствует не полной хаотичности движения молекул, а весьма высокой степени упорядоченности этого движения, чего, естественно, в действительности нет.

Библиографический список

1. Бордовский Г.А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д. Физические основы математического моделирования. М.: Академия, 2005. 86 с.
2. Бордовский Г.А., Горбунов И.Б., Кондратьев А.С. Персональный компьютер на занятиях по физике: Учебное пособие. Спб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 1999. 116 с.
3. Бутиков Е.И., Кондратьев А.С., Степанов В.А., Уздин В.М. Физика: В 3-х кн. кн. 3. Строение и свойства вещества, М.: Физматлит, 2004. 335 с.

О РЕЗУЛЬТАТАХ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОВЫШЕНИЮ СОЦИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ СТУДЕНТОВ ПЕРВОГО КУРСА ВУЗА СРЕДСТВАМИ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

Половодов Ю.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет» г. Краснодар

Особенности развития социальной активности студентов младших курсов ВУЗа определяются, с одной стороны, их принадлежностью к юношеству, с другой, спецификой такой социальной группы, как студенчество [1, с. 12]. В специальной литературе подчеркивается, что характерной особенностью развития социальной активности студентов как молодежной группы является возрастание уровня развития социальной активности вследствие интенсивного личного становления, перехода от юности к социальной зрелости [2, с. 26-35]. Но этот процесс осуществляется неравномерно. Эта неравномерность выражается в том, что учащиеся интенсивнее развиваются в тех сферах, в которых они принимают более активное участие и в которых концентрируется их основная деятельность.

Эксперимент проводился в обычных условиях учебно-воспитательного процесса ВУЗа с введением нового фактора, а именно – созданием специальных психолого-педагогических условий формирования подобной мотивации.

Опытно-экспериментальная работа осуществлялась с 2009 по 2010 год. В проведении педагогического эксперимента приняли участие студенты Южного института менеджмента, обучающиеся по специальности 080801 «Прикладная информатика в экономике». Разными формами исследования было охвачено 65 человек.

У студентов социальная активность проявляется и как участие в общественной жизни вуза, группы, участие в мероприятиях, проводимых как внутри, так и за пределами ВУЗа, и как познавательная активность, проявляющаяся в выявлении информации, выходящей за рамки учебных программ. Немаловаж-

ное значение имеет коммуникативная активность, выражающаяся в установлении множественных межличностных контактов в сфере общения, речевой коммуникации. Включенность в коммуникативный процесс определяется количеством межличностных контактов субъекта, благодаря которым возможно становление личности в конкретном социуме [3, с. 45].

Но это общие критерии социальной активности. Применительно к дисциплине «Физическая культура» нужны были более конкретные критерии, позволяющие формировать это личностное качество и перевести его в количественные показатели. Поэтому, учитывая специфику физической культуры, обсуждение уровня социальной активности студентов было проведено по таким критериям, как посещаемость занятий, старательность в выполнении заданий, дисциплина (самодисциплина), двигательная активность, общее физическое состояние и активность в общественной деятельности.

Как показало исследование, интерес к физической культуре у студентов практически выражен слабо. Формирующий эксперимент проходил в 2 этапа в естественных условиях образовательного процесса по типу вариативного, для которого характерно целенаправленное варьирование в различных группах с выровненными начальными условиями отдельных параметров, подвергающихся исследованию, и сравнение конечных результатов. На этапе формирующего эксперимента были сформированы 2 контрольных и 2 экспериментальных группы из студентов второго курса общим количеством участников – 65 человек.

Цель формирующего этапа эксперимента заключалась в разработке и проверке таких мероприятий учебного характера, которые бы, во-первых, способствовали переходу учащихся с I типом активности с низлежащих на более высокие уровни; учащихся со II типом активности – переводу с индивидуалистской ориентации на коллективистскую, с III типом активности – обретению цели и развитию мотивации социальной направленности; с IV типом активности – выравниванию дисфункционального поведения, переводу его в позитивное

русло; во-вторых, способствовали развитию мотивации к занятиям физической культурой, пониманию ее важности и значимости для укрепления здоровья и общего физического состояния [4, с. 20-82].

Применялись две методики формирования социальной активности студентов колледжа средствами физической культуры [5]. Одна условно названа традиционным методом с усилением направленности занятий на развитие соревновательности с целью повысить активность. Вторая – инновационной с применением балльно-рейтинговой оценки результатов учебной деятельности.

На формирующем этапе эксперимента студенты контрольных групп (К-1 и К-2) (35 чел.) обучались по стандартным программам и традиционной методике. При этом формирование социальной активности не было целенаправленным процессом и являлось косвенным продуктом при формировании знаний, умений и навыков и общего укрепления общего физического состояния. В экспериментальных группах (Э-1 и Э-2) (30 чел) у студентов происходило целенаправленное развитие базисных компонентов и их интеграция посредством реализации определенных нами ранее психолого-педагогических условий.

В одной из экспериментальных групп обучение проводилось по методике усиления целенаправленности занятий на развитие соревновательности (Э-1). Во второй экспериментальной группе (Э-2) был применен балльно-рейтинговый метод оценки учебной деятельности. В процессе проведения эксперимента отслеживалась общая тенденция формирования совокупных изменений отдельных компонентов. На каждом этапе эксперимента фиксировались изменения в активности студентов и выявлялись ее взаимосвязь с мотивационно-ценностным, деятельностно-практическим и рефлексивно-оценочным компонентами, определялась самостоятельность и инициативность студентов в процессе поиска и нахождения новых приемов в решении задач, мотивационная направленность и самооценка [1, с. 79].

Результаты, полученные на констатирующем этапе эксперимента, показали, что уровень социальной активности студентов был недостаточен (40% - допустимый уровень социальной активности и 12% инициативный).

На заключительном этапе опытно-экспериментальной работы была проведена диагностика уровней развития социальной активности во всех группах [2, с. 78, 84]. Результаты показали положительную динамику сформированности исследуемого явления, о чем свидетельствует абсолютный прирост уровней развития социальной активности студентов. Достижения студентов в области физической культуры сравнивались с одной стороны, с планируемым результатом, с другой – с успехами самого студента. В первом случае выявлялось и оценивалось качество обучения, т.е. соответствие подготовки студентов требованиям образовательного стандарта, во втором случае – качество учебно-воспитательного процесса, обеспечивающего развитие личности каждого студента. Для этого проводился мониторинг – наблюдение, выявление и оценка знаний и умений студентов. По косвенным признакам уровень социальной активности студентов был определен с учетом таких критериев, как посещаемость занятий, дисциплина, двигательная активность, общее физическое состояние и активность в общественной деятельности.

Первый критерий мог быть оценен объективно путем анализа и количественного подсчета пропусков занятий студентами, два других определены на основе субъективных мнений педагогов, работающих в группах и участвующих в педагогическом эксперименте.

Применение балльно-рейтингового метода оценки результатов учебной деятельности в группе Э-2 позволило существенно повысить уровень посещаемости занятий, старательности в выполнении заданий, дисциплины. Пропуски занятий по неуважительным причинам значительно сократились (на 21%), а фактов появления и, соответственно, начисления дисциплинарных баллов за появление в нетрезвом виде было всего два, что на фоне официальной статистики весьма незначительно.

Уровень старательности и уровень дисциплины (т.е. адекватной реакции учащихся на указания педагога) в группе Э-2 также повысились. Количество плюсов, выявленных педагогами по оставшимся критериям, увеличилось на 12%.

Такие критерии, как развитие двигательной активности и укрепление общего физического состояния студентов, не могут быть оценены подобным образом. Для того чтобы проследить изменения в характере развития социальной активности как следствие планомерно создаваемых педагогических ситуаций нами велись наблюдения, результаты которых фиксировались в индивидуальных листах каждого студента из групп Э-1 и Э-2. Записи велись по результатам командных игр, поведению студентов во время соревнований, фиксировались сложности выполняемых учебных заданий и эмоциональная реакция на успех (или неудачу).

Фиксировались физические параметры и результаты формирования двигательных умений и навыков в изучаемых видах спорта, уровень устойчивости к утомлению, выносливость, координационные способности и т.д.

В течение 2-х лет наблюдений можно отметить некоторую динамику в сторону развития двигательной активности и укрепления общего физического состояния студентов. Так же установлено, что взаимосвязь между двигательной (физической) и социальной активностью способствует упрочению последней.

Но следует отметить, что два года применения данной методики принесли интересные и обнадеживающие результаты в плане развития массового спорта и пропаганды здорового образа жизни в студенческой среде. Так за время проведения эксперимента были созданы три команды из студентов отделения, вовлеченного в эксперимент: мужские команды по минифутболу и баскетболу, женская команда по волейболу. Общее количество вовлеченных в эти команды студентов составляет 52 человека и 19% от численности групп, участвующих в эксперименте [4, с.124].

Таким образом, в исследовании показывается, что занятия физической культурой создают благоприятные условия для развития и формирования у студентов целеустремленности, трудолюбия, дисциплинированности, организованности, настойчивости, укрепления общего физического состояния. Но по косвенным признакам невозможно оценить, насколько изменения коснулись внутреннего мира студентов. Для этого был проведен повторный опрос с целью определить динамику самооценки, мотиваций студентов, их отношения к учебе и внеучебной деятельности.

Проведенный срез результатов эксперимента выявил, прежде всего, значительную динамику ценностных ориентаций студентов. Первое место устойчиво принадлежит учебе. На втором месте – отношение к себе в связи с профессиональным самоопределением. Это говорит о том, что укрепилась позиция «Я» в процессе профессиональной подготовки. Возросло число студентов, начавших рассматривать свои возможности и само профессиональное самоопределение как главные ценности. Третье место принадлежит таким ценностям, как труд и творчество. Это означает, что ценности труда, профессии, творчества, образования и личности стали формироваться у студентов в гармоническом единстве.

В тоже время мотивация к занятиям физической культурой изменилась лишь в группе Э-1. Балльно-рейтинговый метод существенным образом не повлиял на изменение отношений студентов к дисциплине. Более того, в ответах на вопросы, касающиеся отношения студентов к различным видам физических упражнений, спортивным соревнованиям, меры их участия и т.д., студенты продемонстрировали большой процент нейтральных и даже негативных оценок. В тоже время, в экспериментальной группе, в которой обучение студентов осуществлялось по традиционной методике, но с усилением в сторону развития соревновательности, мотивация к занятиям физической культурой несколько усилилась. Студентов объединяли командные игры, установка на успех, общие победы и поражения, что сплачивало группу, делало ее единым целым.

На основе изученного материала можно резюмировать, что установка на самореализацию формируется в процессе активной деятельности, направленной на приобретение социального опыта. Сопоставляя результаты, полученные в начале и в конце эксперимента в контрольных и экспериментальных группах, мы заметили некоторые изменения в развитии социальной активности.

В контрольных группах произошли некоторые изменения в соотношении уровней и типов активности по сравнению с результатами констатирующего этапа. Увеличился процент студентов с I типом активности с 24,6% до 26%. Процент студентов со II типом активности увеличился с 33,8% до 35,3%, а с III типом – с 32,3% до 35,4 %. Значительно снизился процент студентов с IV типом активности с 9,3% до 3,1% [4, с. 140].

Одновременно произошли изменения в распределении студентов по уровням активности. Если процент студентов с высшим уровнем активности почти не изменился, то значительные изменения коснулись студентов низшего и среднего уровней. Процент студентов низшего уровня уменьшился с 35,2% до 29,0%, а среднего увеличился с 43,1% до 48,8%. Эти изменения, по-видимому, обусловлены естественным взрослением студентов, их адаптации к учебному процессу, привыканием к условиям и требованиям ВУЗа, некоторым укреплению общего физического состояния [4, с. 144].

Результаты, полученные после проведения формирующего эксперимента в экспериментальной группе Э-1, позволяют констатировать также изменения в процентном соотношении студентов, относимых к разным типам активности по сравнению с данными констатирующего этапа. Произошло общее увеличение процента студентов с I типом социальной активности с 24,6% до 32,6%, уменьшение студентов со II типом с 33,8% до 29,2%, на одном уровне осталось число студентов с III типом, и снизилось число с I типом с 9,3% до 5,9%. По уровням развития социальной активности также произошли позитивные изменения. Высший уровень в группе Э-1 составляет 23,2% против 21,7% средний 49,1 против 43,1%, а низший уменьшился с 35,2% до 27,7% [4, с. 147].

Но в сравнении с данными, полученными в контрольных группах, эти успехи не столь впечатляющи и вполне могут объясняться общим укреплением физического состояния, взрослением и адаптацией к условиям учебной среды.

Экспериментальная группа Э-2 показала более выраженные результаты по сравнению с данными констатирующего этапа эксперимента, а также данными контрольных групп и группы Э-1.

Значительно выросло количество студентов, проявляющих социальную активность, но прежде всего активность II типа – 41,6%, выросло и число студентов, демонстрирующих активность высшего и среднего уровня.

Разница в поведении экспериментальных групп может быть объяснена педагогическими условиями, которые были искусственно воссозданы для стимулирования социальной активности студентов в первом случае – коллективистской направленности, во втором случае – для достижения индивидуально значимого результата. Разница в поведении студентов экспериментальных групп может рассматриваться как разные модели самореализации, для первой из которых на первый план выступает общение и взаимодействие, а для второй – самоизменение и самосовершенствование. В контрольных группах четкого разделения указанных тенденций не наблюдается.

В целом, анализ уровня сформированности социальной активности в экспериментальных группах позволяет отметить более высокую предметную успешность по дисциплине, рост организованности, дисциплины в экспериментальных группах по сравнению с контрольными. Это позволило подтвердить эффективность разработанных и внедренных в учебный процесс педагогических условий.

При этом в экспериментальных группах изменения имеют более выраженный поступательный характер, в то время как в контрольных группах также произошли сдвиги в сторону улучшения качественных характеристик, но они не так ярко выражены, как в экспериментальных.

В связи с этим необходимо было проанализировать изменения микроклимата в группах. По результатам повторного социометрического обследования групп как контрольных, так и экспериментальных, изменения произошли во всех. Это связано с теми неизбежными структурными изменениями, которые происходят в студенческих группах в процессе их становления. В динамике группа испытывает многочисленные трудности, связанные с созданием и распадом группировок по интересам, борьбой неформальных лидеров за сферы влияния, проверкой на зрелость взаимоотношений и т.д. Но наиболее кардинальные изменения в структуре отношений произошли в экспериментальной группе Э-2, в которой применялся балльно-рейтинговый метод оценки результатов учебной деятельности. В этой группе распалось больше взаимоотношений, чем в других группах, значительно увеличился уровень неприязни к более успешным студентам при снижении неприязни к лицам, занимающим низкие места в рейтинге. Успешные студенты характеризуются одной-двумя связями и оказываются в эмоциональной изоляции. Чувство коллективизма и целостности группы оказывается под угрозой. Группа не в состоянии слаженно решать коллективные задачи.

Это позволяет прийти к следующим выводам: балльно-рейтинговый метод оценки результатов учебной деятельности, с одной стороны, весьма эффективен в плане формирования установки на успех, активно-деятельностной позиции, повышения предметной успеваемости. Но одновременно он провоцирует индивидуалистские тенденции, дисфункциональные формы социальной активности.

Традиционный метод с усилением направленности занятий на развитие соревновательности обладает меньшей результативностью, требует больших временных затрат, но в то же время он оказывается полезным в плане развития коллективистских навыков, взаимопомощи, позитивной социальной активности и интереса к физической культуре [4, с. 120 - 127].

Это позволяет утверждать, что указанные пути формирования социальной активности средствами физической культуры невозможно развивать по отдельности. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, которые взаимно компенсируются. Сравнение результатов исследования с контрольными группами позволяет утверждать, что развитие социальной активности у студентов в рамках разработанной нами методики идет более успешно в группе, где реализованы все педагогические условия, т.е. эффективность использования комплекса условий выше, чем их использование по отдельности.

К общим итогам нами отнесены следующие положения:

- реализация предложенной модели подготовки студентов, а также использование технологий современных методов диагностики по отслеживанию динамики достижений студентов должны позволить добиться позитивных результатов;

- созданная система развития и самореализации студентов является управляемой, поскольку все субъекты имеют свои функциональные обязанности, одновременно сохраняются все функции управления, такие как контроль, анализ, коррекция [4, с. 129];

- данная модель подготовки студентов создает комфортную обстановку в учебном процессе, исключает стрессовые ситуации, способствует социальной адаптации студентов;

- позволяет перейти от внешней мотивации к обучению и внутренней нравственно-волевой регуляции с акцентом на личностно ориентированный подход в обучении [4, с. 133].

Мониторинг динамики изменений в экспериментальных и контрольных группах свидетельствует о том, что предложенные технологические подходы к формированию социальной активности студентов являются более эффективными, чем общепринятые. Результаты проведенного исследования по апробации и практической реализации разработанных моделей позволяют констатиро-

вать более позитивные сдвиги, произошедшие в структурных компонентах в экспериментальных группах по сравнению с контрольными.

Анализ теоретического и экспериментального материала в основном подтверждает выдвинутое предположение и дает основание утверждать, что предложенные подходы являются более эффективными и способствуют формированию высокого уровня социальной активности студентов колледжа, полученные результаты доказали справедливость теоретической концепции исследования и подтвердили выдвинутую гипотезу. Одновременно они высветили ряд перспективных проблем, которые ждут своего решения. В частности, в более детальном изучении нуждается специфика и динамика форм социальной активности среди разных специальностей, требуется детальная разработка с позиций аксиологии теоретических положений о ценности физической культуры, их месте в общей ценностной структуре, определенный интерес представляет изучение условий и факторов, отрицательно влияющих на процесс формирования мотиваций к физической культуре. Требуется разработка индивидуализированной системы мер для развития мотивации к физической культуре в рамках технических групп.

Библиографический список

1. Столяров, В.И. Социология физической культуры и спорта: (введение в проблематику и новая концепция): Науч-метод. пособие для вузов физ. культуры: доп. Умо по образованию в обл. физ.культуры и спорта [Текст]/ В.И. Столяров.; Проблем. Совет РАО по физ. культуре и спорту, Рос. Гос. акад. Физ. культуры, Гуманитар. Центр «СпАрт». - М., 2002. - 346с.
2. Гребенюк, О.С. Общие основы педагогики: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 031000 «Педагогика и психология»: доп. М-вом образования РФ [Текст]/ О.С. Гребенюк, М.И. Рожков. - М.: Владос Пресс, 2004. - 160с.: табл.
3. Бальсевич, В.К. Физическая активность человека [Текст]/В.К. Бальсевич, В.А. Запорожанов. - Киев: Здоров'я, 1987. - 226с.
4. Половодов, Ю.А. Формирование социальной активности студентов колледжа средствами физической культуры, Дис.... канд. пед. наук [Текст]/ Ю.А. Половодов - Краснодар, 2010. - 154с.
5. Богданов, В.М. Сотвори себя сам: Учеб. пособие [Текст]/ В.М. Богданов, В.С. Пономарев, А.В. Соловьев. - Самара: СГАУ, 2001. - 150с.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА УРОКАХ ФИЗИКИ

Сартюкова А.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Введение

В век развития информационных технологий у учителя появилось самое эффективное из всех существовавших до сих пор технических средств обучения - компьютер, а информационные технологии, являясь современным средством обучения, открывают поистине необозримые возможности для решения широкого круга задач.

Компьютеры в обучении позволяют упростить разработку, тиражирование и использование дидактических и научных материалов, повышают качество образования и соответствуют реалиям сегодняшнего дня. Несомненно, что грамотное и комплексное использование информационных компьютерных технологий предоставляет обучающимся, преподавателям, научным работникам возможность эффективнее распределять свое время, реализовывать творческий потенциал [1].

Применение компьютерных технологий обучения позволяет видоизменить весь процесс обучения, реализовать модель личностно-ориентированного обучения. Современные средства обучения (компьютеры, телекоммуникационные системы связи, необходимое программное и методическое обеспечение), интенсификации занятий разных форм обучения имеют наибольшее значение для организации самоподготовки обучающихся в роли методического и организационного обеспечения самостоятельной работы. Обучающие программы должны характеризоваться определенностью, результативностью [2].

Современный урок невозможен без использования информационных и телекоммуникационных технологий. Особенно это касается предметов естественно - научного цикла, т.к. именно они формируют единую картину мира.

При использовании информационных технологий на уроках физики повышается интерес к изучению предмета, развиваются творческие способности, формируется умение учащихся получать знания самостоятельно, работая с обучающими программами на компьютере. Пришедший на помощь персональный компьютер позволяет проводить лабораторные работы, натурное проведение которых в рамках школы затруднено или невозможно. В них ученик может по своему усмотрению изменять исходные параметры опытов, наблюдать, как изменяется в результате само явление, анализировать увиденное, делать соответствующие выводы.

Применения информационно-коммуникационных технологий на уроках физики

Рассмотрим некоторые методы применения информационно-коммуникационных технологий на уроках физики:

- компьютерные демонстрации;
- компьютерное моделирование;
- компьютерное тестирование
- лабораторно – компьютерный практикум;
- решение задач в MicrosoftExcel;

Компьютерные демонстрации

Основным достоинством этой технологии является то, что она может органично вписаться в любой урок и эффективно помочь учителю и ученику. Другим немаловажным обстоятельством является то, что существуют такие физические процессы или явления, которые невозможно наблюдать визуально в лабораторных условиях, например, движение спутника вокруг Земли. В данном случае компьютерные демонстрации имеют неоценимое значение, так как позволяют «сжать» временные и пространственные рамки и в то же время получать выводы и следствия, адекватные реальности. С другой стороны достоинство этой технологии заключается в том, что она не требует большого числа ком-

пьютеров. Достаточно одного компьютера, видеопроектора, или комплекса - компьютер плюс телевизор, чтобы начать работать по этой технологии [3].

Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование является мощным научным направлением, которое разрабатывается уже десятки лет. Применение этой компьютерной технологии в школе, особенно в специализированных классах, имеет большое будущее, так как компьютерное моделирование является мощным инструментом познания мира. Применяется как индивидуальная, так и групповая форма создания компьютерных моделей учащимися [4].

Компьютерное тестирование

В учебном процессе тестирование в той или иной форме используется давно. В традиционной форме тестирование - это чрезвычайно трудоемкий процесс, который требует больших временных вложений. Использование компьютеров делает процесс тестирования настолько технологичным, что в ближайшем будущем, возможно, он станет основным элементом контроля уровня знаний учащихся [5].

Лабораторно-компьютерный практикум

Эта технология более трудоемка для учителя и требует специальной подготовки. Необходимо наличие компьютерного класса и деление класса на подгруппы. Так как изначально в технологии заложена активная роль ученика, этот вид занятий необычайно эффективен для его творческого развития. Компьютер здесь рассматривается как средство для решения тех или иных задач физики. Но, применяя компьютерный практикум, учителю не следует отказываться и от традиционной формы проведения лабораторной работы, а лучше умело сочетать эти формы на практических уроках.

Решение задач в MicrosoftExcel

Программа MicrosoftExcel очень эффективна в плане экономии учебного времени (быстрота расчетов), а также удобна для графического представления физических процессов, для анализа и сравнения полученных графиков. Такая

методика повышает познавательный интерес учащихся, так как, даже те дети, которые не любят решать задачи, в данном случае охотно откликаются на предложенные варианты использования Excel на уроках физики, что в конечном итоге повышает результативность обучения [6].

Применение электронных таблиц Microsoft Excel при решении физических задач

В современных условиях остро стоит вопрос о повышении качества и результативности обучения. В данном разделе приведен пример использования электронных таблиц при подготовке к решению задач ЕГЭ по физике. «Слабым местом» учащихся средней школы является решение задач, связанных с исследованием функций с помощью построения графиков. Таких задач достаточно много, хотя в школьном курсе часто им уделяется недостаточное внимание. Инструментом массового обучения школьников технологии решения подобных задач могут стать системы вычислительной математики, включая наиболее доступную и распространенную – электронные таблицы Excel [7].

Рассмотрим задачу, приведенную в [8].

При исследовании зависимости силы трения от силы давления были получены результаты, представленные на рисунке графиком (рис.1). Наиболее точно отражает результаты эксперимента зависимость:

$$1) F_{\text{тр}} = 0,3 F_{\text{д}}; 2) F_{\text{тр}} = 0,2 F_{\text{д}}; 3) F_{\text{тр}} = 0,1 F_{\text{д}}; 4) F_{\text{тр}} = 0,4 F_{\text{д}} .$$

Чтобы лучше понять специфику задачи, построим указанный график, используя электронные таблицы Excel. Для этого занесем экспериментальные данные в соответствующую таблицу, построим график по экспериментальным точкам (опция Диаграмма|Точечная) и добавим график, соответствующий, например, значению $k=F_{\text{тр}}/F_{\text{д}}$, равному 0,2 (рис.2).

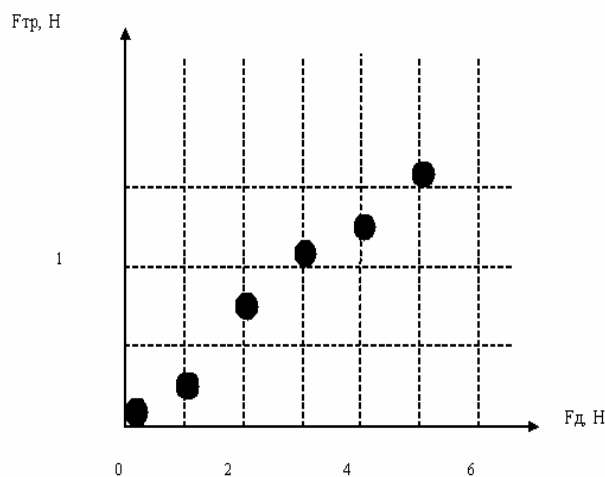


Рис. 7. Зависимость силы трения от силы давления

Из полученного рисунка видно, что практически все экспериментальные точки лежат над кривой теоретической зависимости, что говорит о «плохом» значении параметра k .

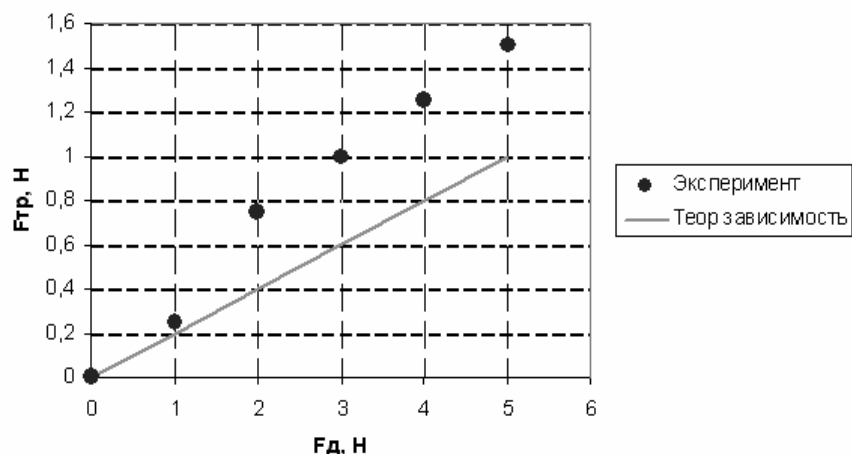


Рис. 8. График, соответствующий значению $k=0,2$

Изменяя значения k , получаем, что наилучший график соответствует $k=0,3$ (рис.3).

Таким образом, в процессе обучения школьники не только осваивают методику решения подобных задач, но и приобретают первоначальные навыки работы с электронными таблицами в объёме, достаточном для дальнейшего изучения и практического применения при дальнейшем обучении в ВУЗе.

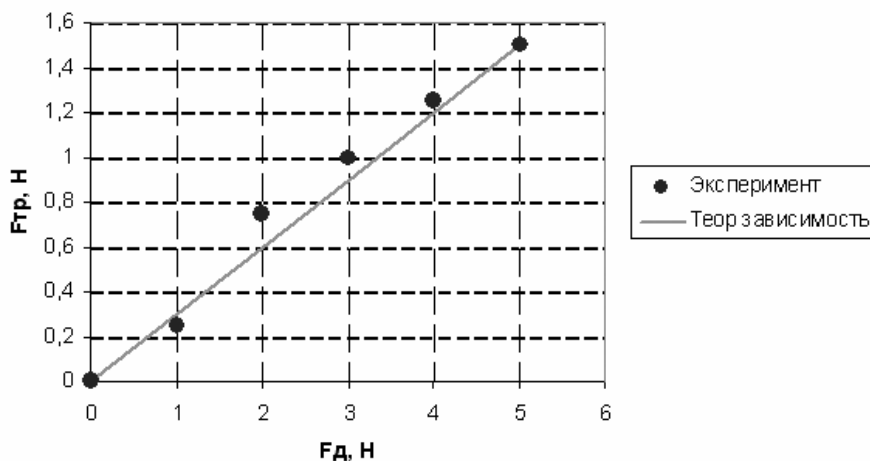


Рис. 9. График, соответствующий значению $k=0,3$

Библиографический список

1. Журнал "Успехи современного естествознания" № 9 - 2008 год, стр. 46-48.
2. Журнал "Успехи современного естествознания" № 5 - 2007 год, стр. 41-44.
3. Львовский М. Б., Львовская Г. Ф. Преподавание физики с использованием компьютера. // Информатика и образование — М.1999, № 5.
4. Кавтрев А. Ф., Опыт использования компьютерных моделей на уроках физики в школе. «Дипломат», Сб. РГПУ им. А. И. Герцена «Физика в школе и вузе», Санкт-Петербург, Образование, 1998.
5. Плотникова И.А. Методика тестового контроля в старших классах// Информатика и образование- М.: 2000- №1.
6. Львовский М. Б., Львовская Г. Ф. Преподавание физики с использованием компьютера. // Информатика и образование — М.1999, № 5.
7. <http://rudocs.exdat.com>
8. Единый государственный экзамен: Физика: Контр. измерит. материалы/Под ред. Г.С.Ковалевой. – М.: Просвещение, 2003. с.30.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОДЕЛИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ

Черненко С.А., Омельченко А.Н., Добро Л.Ф., Парфенова И.А.

ФБГОУ ВПО «Кубанский Государственный университет» г. Краснодар

Современный процесс обучения требует использования не только лабораторного, но и виртуального практикума. Каждый из них имеет неоспоримые преимущества, и полное понимание тех или иных процессов достигается тогда, когда эти методы дополняют друг друга. Виртуальный практикум полезен для подготовки студентов к выполнению физического практикума и необходим для решения задач, которые невозможно выполнить в рамках физического практикума. На основе полученного виртуального представления о каком-либо процессе лучше всего усваиваются теоретические знания об изучаемом явлении и легче вырабатываются практические, исследовательские навыки. В процессе изучения оптики использование информационных технологий обеспечивает реализацию принципа наглядности исследуемых явлений, что является одним из необходимых условий для изучения этой дисциплины.

Лабораторный практикум по курсу «Оптика» представляет собой математическое обобщение наблюдений, практического опыта и эксперимента. Он органически связан со многими областями современного естествознания и служит научной основой решения многих прикладных технических задач. Формирование навыков выполнения физического эксперимента – необходимый элемент физико-технического образования. Анализ экспериментальных данных позволяет убедиться в соответствии выводов теории результатам опытов. В ходе исследования устанавливаются количественные зависимости между различными явлениями, которые определяются в результате измерений. Вследствие различных причин никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно, поэтому необходимо не только определять саму величину, но и оценивать погрешность измерений.

На кафедре физики и информационных систем физико-технического факультета силами студентов и преподавателей разрабатывается программный комплекс моделирования систем. Комплекс включает в себя как программы моделирования отдельных различных физических явлений и процессов, так и виртуальные лабораторные работы. За основу берутся такие принципы как: доступность, наглядность, соответствие физическим законам. Доступность виртуального практикума позволяет не только ознакомиться с теоретическим материалом к данной лабораторной работе, но и провести контрольные измерения, проверить результат, полученный на практике.

Важнейшим параметром виртуального практикума является его полное соответствие физическим законам. А использование вычислительной техники позволяет в разы увеличить точность измерений, производить расчеты с необходимой погрешностью. Кроме того, использования программного комплекса моделирования оптических систем, является возможность работы с идеальными системами, которую нельзя осуществить в рамках лабораторного практикума.

Один из реализованных виртуальных практикумов – «Определение преломляющего угла бипризмы Френеля». Он является виртуальным аналогом соответствующей лабораторной работы.

Разработкой виртуальной лабораторной работы по изучению бипризмы Френеля занимались многие коллективы разработчиков. В интернете можно найти и воспользоваться для целей самообразования и подготовке к реальной лабораторной работе множество различных разработок. Приведем анализ некоторых из них.

– Московский государственный институт электроники и математики и Центр современных информационных технологий и Математическое образование (www.distudy.ru/demo/Physica/lab/lab41/).

Ресурс содержит:

информацию о разработчиках,

теорию к лабораторной работе «Бипризма Френеля» (Определение длины световой волны интерференционным методом),

задания:

1. Определение расстояния между полосами интерференции;
2. Определение расстояния между изображениями когерентных источников;
3. Определение расстояния от линзы до фокальной плоскости объектива микроскопа;
4. Определение длины световой волны), эксперимент (скрипт на Java), отчет (требования к оформлению отчета в Word и список из четырех контрольных вопросов).

Ресурс сетевой, для выполнения работы требуется выход в интернет, кроме того, на компьютере должно быть установлено программное обеспечение для запуска Java-приложения.

– Новосибирский государственный технический университет, кафедра прикладной и теоретической физики (<http://pitf.ftf.nstu.ru/resources/walterfendt/refraction>). Java-приложение «**Отражение и преломление света**». Луч света, идущий слева и сверху падает на границу раздела двух сред (можно выбрать вещества в обоих списках). Реализована возможность изменять падающий луч при нажатой кнопки мыши. Апплет покажет отраженный и преломленный лучи и рассчитает соответствующие углы: падения, отражения, преломления. Практически полностью отсутствует теоретический материал, нет заданий, контрольных вопросов.

– Кафедра экспериментальной физики Физико-механического факультета СПбГПУ (<http://physics.spbstu.ru/forstudents/labpractice/technics>). Здесь другая крайность – только теория (на 8 листах), никакой интерактивности, электронная версия в . pdf .

– Московский государственный университет геодезии и картографии (http://miigaik.ru/f.miigaik.ru/metodicheskaja_1/20111114193504-7681.pdf). Еще

больше теории с картинками – 64 листа, никакой интерактивности, электронная версия в . pdf .

– Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Отчет по лабораторной работе №1 Бипризма Френеля). Электронный вариант отчета студента о проделанной работе.

– Кафедра общей физики Южного федерального университета. Виртуальный тренажер по общефизическому практикуму «Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля», созданный коллективом разработчиков в 2009 году, предназначен, согласно аннотации, для подготовки к выполнению лабораторной работы по изучению дифракции света на бипризме Френеля. Авторы указывают, что монохроматичность света обеспечивается использованием светофильтра, в результате работы определяется длина световой волны в красной части спектра, тренажер может быть использован в качестве виртуальной лабораторной работы.

Виртуальный тренажер по общефизическому практикуму скачивается в виде архива, содержащего собственно приложение Macromedia Flash Player 8.0 r22 и аннотацию к нему. Программа позволяет выполнять 2 упражнения, изменяя параметры, и автоматически заполняя данные эксперимента в таблицу. Есть краткая теория и описание хода выполнения работы. Хорошая красочная виртуальная лаборатория с интуитивно понятным интерфейсом. К недостаткам разработки следует отнести отсутствие возможности сохранять результаты эксперимента.

– Факультет естественных и инженерных наук (ФЕИН) университета «Дубна» предлагает посетителям сайта экскурсию по помещениям, а лабораторная работа по изучению интерференции красного лазерного света полупроводникового лазера (интерференционная картина получается с помощью бипризмы Френеля, по интерференционной картине и по отклонению луча лазера бипризмой находят параметр бипризмы Френеля – преломляющий угол) представлена описанием в формате pdf и разнообразие привнесено лишь фотографией лабо-

раторной установки. Как указано, в настоящий момент лаборатория располагает 11-ью лабораторными работами. Но все они подобно описанной выше не могут быть названы «виртуальными». От коллектива учебно-научного центра ОИЯИ, расположенного на территории Объединенного Института Ядерных Реакций хотелось бы ожидать более «продвинутого» учебного лабораторного практикума по оптике.

– Виртуальный фонд естественнонаучных и научно-технических эффектов «Эффективная физика», не смотря на заявленное громкое название, содержит лишь анимацию оптического интерференционного устройства, образованного двумя плоскими зеркалами, или равнобедренной преломляющей тупоугольной призмой. Отсутствует возможность управления экспериментом. Имеется статичные картинки, описание, ряд формул.

Примеры можно продолжать приводить, но тенденция ясна. Хороших профессионально выполненных работ практически нет, либо управление в программе очень сложное. Кроме того, разработка студентами элементов виртуальной физической лаборатории преследует цели повышения их познавательного интереса к изучаемым явлениям и способствует профессиональному становлению (информационные технологии в настоящее время применяются во всех областях человеческой деятельности и в любом случае опыт разработки пригодится будущему выпускнику-физику).

Указанные выше причины обуславливают необходимость разработки силами студентов и преподавателей кафедр физико-технического факультета в рамках изучения различных учебных дисциплин всевозможных программных продуктов для создания виртуальной лаборатории факультета.

Подход изучения дает результаты, о которых уже сейчас можно говорить: регистрируются программы и комплексы программ в реестре в Реестре программ для ЭВМ («Интерактивная анимационная модель колебаний физического оборотного маятника», «Интерактивная анимационная модель колебаний математического маятника», «Интерактивная анимационная модель колебаний фи-

зического маятника в виде тонкого прямого стержня», «Интерактивная анимационная модель колебаний маятника Максвелла», «Практикум по квантовой механике», «Планировщик локальной сети», Компьютерный эксперимент «Проверка формулы Резерфорда», «Интерактивная виртуальная лаборатория механических колебаний» и др.). Студенты учатся, создавая и сами программы для изучения различных процессов, объектов, явлений.

Алгоритм создания виртуальной модели работы «Определение преломляющего угла бипризмы Френеля» включает 5 пунктов:

1. Сбор информации. В этом пункте студент изучает теоретический материал лабораторной работы, а именно интерференция света и опыт Юнга.
2. Постановка задачи. Основной задачей создания разрабатываемой виртуальной модели является измерение угла бипризмы с большой точностью.
3. Обоснование основных допущений. В работе рассматривается идеализированная система: линза идеально чистая, не учитывается погрешность линейки и глаза.
4. Создание моделей исследования. Для создания и воспроизведения моделей используется Adobe Flash (SWF-файлы можно просматривать с помощью свободных плееров Gnash или swfdec). Adobe Flash позволяет работать с векторной, растровой и ограниченно с трёхмерной графикой, а также поддерживает двунаправленную потоковую трансляцию аудио и видео.
5. Проверка адекватности модели реального объекта. Реализована возможность оценить полученные данные и, при необходимости, повторить эксперимент.

Завершает работу список контрольных вопросов, который позволяет закрепить материал, проверить полученные знания, оценить свой уровень знаний, подготовиться к сдаче зачета по лабораторной работе.

Результатом проведенной исследовательской работы является создание программного комплекса моделирования оптических систем, который может быть

использован в качестве теоретического материала по лабораторной работе, для подготовки к выполнению эксперимента. Разработанный комплекс позволяет произвести полноценное выполнение смоделированной лабораторной работы.

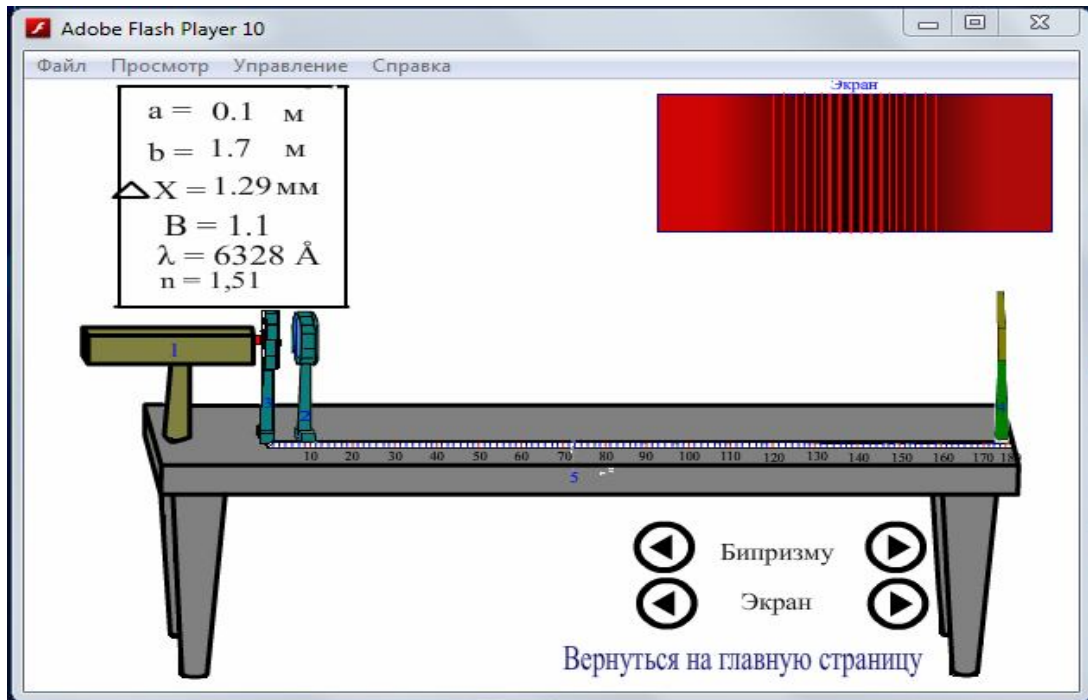


Рисунок 10. Модель лабораторного стенда

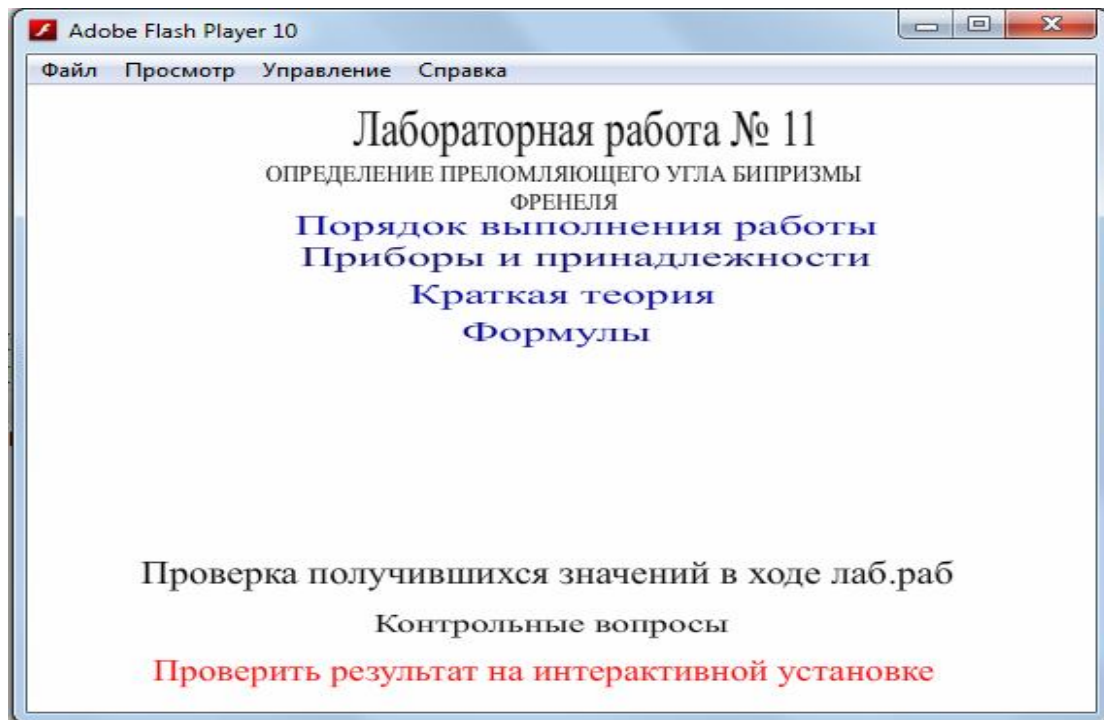


Рисунок 11. Главная страница модели

Сравнительный анализ традиционных методов научного исследования и методов с применением информационных технологий к процессу обучения оптике показывает весомое преимущество последних. Значительно расширяется круг исследовательских задач. Кроме того, привлечение студентов к разработке используемого в процессе обучения программного обеспечения позволяет повысить уровень активных методов обучения.

Библиографический список

1. Богатов Н.М., Добро Л.Ф., Матвеекин М.П., Митина О.Е. Оптика: Лабораторный практикум. Часть 1. Кубанский государственный университет. Краснодар. 2004.
2. Богатов Н.М., Добро Л.Ф., Матвеекин М.П., Митина О.Е. Оптика: Лабораторный практикум. Часть 2. Кубанский государственный университет. Краснодар. 2003.
3. Добро Л.Ф., Парфенова И.А. Активизация познавательной деятельности в профессиональном образовании на основе новых информационных технологий // Всероссийская научно-практическая конференция «Научно-исследовательская работа студентов в системе профессионального образования». Краснодар. 2004. С. 137-139
4. Добро Л.Ф. , Парфенова И.А. Информационное обеспечение принципа наглядности // Журнал «Современные проблемы науки и образования» №1, 2006 год. С. 47
5. Покатилов С.А., Добро Л.Ф. , Парфенова И.А. Информационные технологии в физических исследованиях биологических процессов // Материалы VIII научно-практической конференции молодых ученых и студентов юга России «Медицинская наука и здравоохранение». Анапа. 2010. С.180-183
6. Добро Л.Ф., Парфенова И.А. Использование компьютерных технологий при решении задач по оптике // Физика в школе и вузе. Международный сборник научных статей. Выпуск 12. Санкт-Петербург, 2010. С. 8-12
7. Добро Л.Ф., Парфенова И.А. Визуализация и анализ физических процессов при решении задач по оптике // Физика в школе и вузе. Международный сборник научных статей. Выпуск 12. Санкт-Петербург, 2010. С. 12-15

ИННОВАЦИОННЫЕ ДИДАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОВРЕМЕННЫМ ПРОБЛЕМАМ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Щеколдин Г.А.

ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар

Современное образование немислимо без естественнонаучной составляющей, причем не «декоративной» (каковой её делают сейчас в России), а ведущей, определяющей. Стержнем, базисом естественнонаучного образования по праву является физика. Это и глубина постижения тайн природы, строгость и точность логических построений, жесткая постоянная проверка на реальность, правдивость выдвинутых гипотез, теоретических положений. Именно физике отдают пальму первенства многие корифеи человечества в формировании особого мышления, отличающегося всесторонним подходом к рассмотрению природных и социальных явлений, того пласта знаний, который и делает современного человека по-настоящему культурным.

Руководители всех уровней органов управления образованием понимают и реализуют в рамках своих должностных обязанностей гуманизацию как «нафарширование» учебного процесса всё большим числом гуманитарных дисциплин. Совершается это посредством дробления одной учебной дисциплины на несколько смежных с увеличением количества учебных часов на формализованный понятийный аппарат. Происходит это за счёт перераспределения учебных часов, которые изымаются из естественнонаучного цикла.

Лавинообразное увеличение количества учебных предметов в школе (с восьмидесятых годов прошлого века их число увеличилось вдвое) приводит к формированию у школьников «мозаичных», фрагментарных знаний. Современные лицеисты, гимназисты уступают своим предшественникам -ученикам 60-х и 70-х годов прошлого века – в аналитичности, системности мышления. Боль-

шое количество учебных предметов, их узость приводят к информационным перегрузкам школьников, так как «нагружается» в основном зрительная память.

С другой стороны, за последние годы происходит стремительное уменьшение количества учебных часов, отводимых на естественнонаучные дисциплины. Так в Советском Союзе на изучение второго концентратора по физике, который и создаёт фундамент естественнонаучного образования, отводилось на 9-й, 10-й и 11-й классы – минимум 11 учебных часов в неделю, а в России с 2005 года на физику во втором концентре (10-й и 11-й классы) отводится 4 часа. Одновременно в школах Российской Федерации исчезает учебная дисциплина «Астрономия». Это происходит в то время, когда исследования в этой области науки поражают все мировое сообщество. Таким образом, «модернизируется» естественнонаучное образование в нашей стране; базовый двухчасовой курс физики – это просто «глиссирование», а не обучение. Ранее такое количество часов по физике планировалось только для классов с **гуманитарным профилем** (хореографические, музыкальные училища и т. д.). Естественно, ни о какой сдаче ЕГЭ по физике для этого профиля не могло быть и речи, так как для них вообще не предусматривается решение задач, что составляет структуру ЕГЭ по физике.

На протяжении двух десятков лет нововведения в образовательный процесс приводят к ухудшению естественнонаучной подготовки учащихся в школах и, как следствие, к резкому снижению качества фундаментальной подготовки будущих инженеров в вузах. Достаточно привести пример с КубГТУ, который около десяти лет на инженерные факультеты осуществлял прием абитуриентов без проведения официальных испытаний по физике. При тестировании усвоения основных физических понятий абитуриентов КубГАУ в 2005 году установлено, что 75% от числа абитуриентов инженерных специальностей не опознают 90% понятий из курса физики в школе.

Единственное структурное подразделение в **системе образовательных учреждений современной России**, способное изменить сложившуюся ситуа-

цию с естественнонаучной подготовкой будущих инженеров, - подготовительное отделение вуза, которое позволяет **оперативно** реагировать и вносить изменения в содержание, структуру, формы и методы обучения для адаптации школьного курса физики к вузовскому.

Научное обоснование способов конструирования педагогического процесса и осуществления учебной деятельности реализуется в конечном итоге в выборе **содержания, методов, форм, технологий обучения**, что способствует мотивации обучаемых в совместной деятельности с преподавателем, устанавливается творческая обстановка, подавляется страшный недуг современного образования – формализация знаний.

Важнейшая дидактическая задача – определение содержания учебной дисциплины на современном этапе – раскрыта в исследовании, анализирующем **системные, качественные и даже количественные изменения содержания** в программах курса физики за последнее столетие от Российской империи до Российской Федерации [1].

Значительный временной интервал исследования позволил получить тщательную и объективную палитру образовательных устремлений и концепций в естественнонаучной области, выявить деструктивные изменения, происходящие в последние годы в образовательном поле России.

Анализ программ по физике для школ и вузов показал существенные различия в содержании учебной дисциплины. По результатам была создана **оригинальная двухуровневая программа по физике** для подготовительного отделения со следующей концепцией: 1) в отличие от школьной программа является линейной, т.е. соблюдается строгая последовательность изложения, 2) стержневой частью ее является естественнонаучная часть образовательного стандарта РФ, 3) программа имеет инженерную направленность (значительно усилены 17 тем, идущих на профессиональную подготовку, что является пропедевтическим курсом для специальных инженерных дисциплин), 4) в содержании заложена проблемность и расширительность, что позволило при изло-

жении математических моделей не ограничиваться первым приближением, вводя понятия о явлениях, не вписывающихся в модель. Двухуровневая структура программы позволяет не только выделить **основные разделы и темы** в соответствии с аксиоматикой компетентностного подхода в образовательном процессе, но и показать причинно-следственные связи явлений, процессов, системность, логичность, последовательность и особенности содержательного поля программы, что позволяет добиться осознанной ориентированности учащегося в процессе обучения.

Программа по физике для подготовительного отделения является результатом десятилетней адаптации с соответствующими корректировкой и дополнениями содержания и рассчитана на минимум 300 учебных часов, в том числе лекционных - 100.

Особенность деятельности подготовительного отделения проявляется в сочетании классно-урочной и лекционно-семинарской дидактической системы организации процесса обучения.

Классно-урочная и лекционно-семинарская системы организации процесса обучения сменили индивидуальную, а затем индивидуально-групповую формы организации обучения, уходящие своими корнями в древность вплоть до первобытного общества. Тем не менее, сложившийся опыт индивидуального обучения сохранился до наших дней в дидактическом принципе учета индивидуальных особенностей учащихся и индивидуализации обучения, что вполне оправдано.

Классно-урочная и лекционно-семинарская системы организации занятий выдержали конкуренцию, оказались ценным завоеванием педагогической мысли и передовой практики обучения и располагают потенциальными возможностями для дальнейшего совершенствования и развития.

Изучение курса физики на подготовительном отделении вызывает необходимость организации теоретических знаний, обобщающих значительный учебный материал. Реализовать указанную необходимость возможно в форме

лекций, которые занимают значительный объем (не менее трети) учебной работы на подготовительном отделении.

Лекция может проводиться одним из четырех методов: объяснительно-иллюстративным, проблемного изложения, частично-поисковым, исследовательским, а также сочетанием нескольких или всех методов обучения. Применение того или иного метода, их сочетание зависит от содержания учебного материала в лекции, уровня подготовки слушателей и поставленной цели. Повторное изучение отдельных вопросов профилирующего курса физики может организовываться путем заданий для самостоятельной работы, тестовых заданий, проведением консультаций и другими формами.

Программа должна органично входить базовым определяющим фактором в **учебно-методический комплекс**, включающий в себя **системные тестовые задания** и **индивидуальные контрольные работы** [2]. Такая структура современного учебного пособия при качественном согласовании всех составляющих позволяет добиваться активной обратной связи в процессе обучения и в результате достигать достаточного уровня усвоения учебной дисциплины - физики.

Системные тестовые задания призваны, с одной стороны, обеспечить надлежащий уровень изложения содержания программы **преподавателем**, а с другой - достаточный уровень усвоения понятий, законов, явлений **слушателями**.

Разработанное содержание курса физики подготовительного отделения университета позволяет углубленно раскрыть школьный курс физики и обеспечить преемственность вузовского курса физики. Содержание обучения через форму его организации может реализовываться в процессе репродуктивной и продуктивной учебной деятельности или сочетанием этих двух видов. Такой подход исходит из положения философии о том, что в социальном развитии особое значение имеет деление деятельности на **репродуктивную**, направленную на получение уже известного результата известными средствами, и **продуктивную** (творческую), связанную с выработкой новых идей и соответствующих им средств или с достижением известных целей с помощью новых средств.

К репродуктивным методам относятся объяснительно-иллюстративный и репродуктивный. Объяснительно-иллюстративный метод связан с объяснением учебного материала и иллюстрацией средствами обучения наиболее сложных вопросов содержания образования и обеспечивает усвоение слушателями изложенного учебного материала. Объяснительно-иллюстративный метод и вызываемая им репродуктивная деятельность наиболее экономная по затратам учебного времени и уже поэтому является существенной частью процесса обучения. Выработка умений и навыков в процессе выполнения лабораторных и практических работ традиционного характера осуществляется репродуктивным методом (по инструктивным, технологическим картам, методическим указаниям).

Продуктивная учебная деятельность осуществляется частично-поисковым и исследовательским методами обучения. Частично-поисковый метод предназначен для решения отдельных этапов проблемы, ее видения, самостоятельного построения найденного доказательства, формулировки выводов и вскрытых фактов, предположения и построения плана доказательства, расчленения сложной задачи на серию доступных, облегчающих решение основной задачи, воспроизводства знаний и применения их в новой ситуации. Исследовательский метод обучения призван обеспечить творческое применение знаний, овладение методами научного познания и является условием формирования интереса, потребностей и познания в приобретении новых знаний. Исследовательский метод обучения дает полноценные, хорошо осознанные, оперативно и гибко используемые научные знания, поэтому его можно определить как способ организации поисковой, творческой деятельности слушателей при решении новых для них проблем.

Углубление и расширение содержания курса физики на подготовительном отделении создает условия, и даже необходимость, наряду с коллективным обучением, для всемерного развития его индивидуализации. Слушатели подготовительного отделения обладают разными уровнями подготовки, различными

интересами и способностями, разным уровнем отношения к учебной деятельности. Необходимо не только учитывать эти особенности, но и использовать их для основательного овладения знаниями и умениями по курсу физики и успешного обучения в высшей школе.

Индивидуализация обучения на подготовительном отделении настоятельно требует обеспечивать сочетание обобщающего изложения учебного материала с персональными учебными заданиями каждому обучающемуся и индивидуальной проверкой, оценкой и учетом знаний и умений. С этой целью желательно применять индивидуальные тесты, карточки - задания, индивидуальный подбор задач, внедрять тематический учет знаний и умений. В такие тесты, карточки - задания, подобранные задачи должно закладываться общее содержание обучения, дополнительные сведения, приобретенные в процессе самостоятельной работы, учитываться уровень подготовки.

Индивидуализация обучения при едином его содержании настоятельно требует организации специальных форм обучения и научно-методического обеспечения этих форм обучения.

Такой формой является тестирование (от английского слова test - проба, испытание), которое впервые было разработано и использовано в 80-х годах XIX века английским психологом Ф. Голтоном. С 1892 г. Голтон и Дж. Салли стали применять тесты в педагогических целях. В России их последователем становится А.М.Шуберт. В 20-х годах прошлого века тесты широко используются в школе как метод психотехники и педологии.

Тестирование в педагогических целях характеризуется простотой процедуры и оборудования, непосредственной фиксацией результатов, возможностью индивидуального использования, удобством математической обработки, кратковременностью, наличием установленных образцов.

Педагогическое тестирование не требует прогнозов развития личности, не допускает произвольности и предвзятости в толковании результатов. Системные тестовые задания призваны, с одной стороны, обеспечить надлежащий

уровень изложения содержания программы **преподавателем**, а с другой - достаточный уровень усвоения понятий, законов, явлений **слушателями**.

Для проверки качества усвоения знаний по физике разработаны и внедрены системные тесты по основным разделам курса. Каждый тест состоит из 6 - 10 заданий, представляющих из себя графические, ситуационные, качественные, типовые задачи. Необходимо отметить, что часть заданий являются **вариативными**, не имеют однозначного ответа и требуют описания различных ситуаций. Однозначный ответ на такое задание считается неполным.

Каждый тест рассчитан на два академических часа. Тест №1 выровнен по сложности вариантов, а что касается последующих, то сложность варианта убывает с увеличением его порядкового номера.

Индивидуальные контрольные работы представляют собой классическую форму контроля знаний и также рассчитаны на два академических часа. Следует отметить, что индивидуальные контрольные работы (варианты без звездочки) выровнены по сложности. Ответы к задачам должны быть даны в соответствии с методом приближенных вычислений.

В последние годы усиливаются тенденции реформирования и кардинального изменения вступительных испытаний в высшие учебные заведения. Не вдаваясь в подробные оценки нововведений (большинство из которых, по нашему мнению, не выдерживают критериев объективности и не создают равных условий для испытуемых), авторы посчитали своим долгом оказать методическую помощь абитуриентам, которые собираются поступать в другие высшие учебные заведения страны. С этой целью в контрольные работы включены варианты со звёздочкой, составленные из задач, предлагавшихся на вступительных экзаменах в различных вузах страны в предшествующие годы.

В этих вариантах представлены задачи-модели, описывающие реальные явления в упрощённом виде в объёме школьных знаний и позволяющие расширить образовательный горизонт абитуриента.

Многовариантность тестов и контрольных работ позволяет преподавателю проводить повторный (тренинговый) контроль знаний с изменением варианта и предварительным разбором теста. Естественно, это снижает усвоение до репродуктивного уровня.

Критерии оценки знаний абитуриента – одна из самых болезненных проблем педагогических измерений. Складывается ощущение, что в области образования сознательно создаётся обстановка хаоса для протаскивания самых одиозных проектов. И это несмотря на то, что в течение последних двадцати лет было предложено множество математических критериев усвоения в учебной деятельности студентов.

Одним из наиболее удачных параметров качества обучения можно считать коэффициент усвоения на соответствующем уровне α :

$$K_{\alpha} = \frac{a}{p},$$

где a - количество правильно выполненных действий (существенных операций);
 p - общее число существенных операций [3].

Под существенными операциями понимаются элементарные логические и математические действия. Между оценками пятибалльной системы и коэффициентом усвоения K_{α} существует связь, определяемая следующим образом:

$$\begin{aligned} 0,9 \leq K_{\alpha} \leq 1 & \text{ – оценка 5,} \\ 0,8 \leq K_{\alpha} < 0,9 & \text{ – оценка 4,} \\ 0,7 \leq K_{\alpha} < 0,8 & \text{ – оценка 3,} \\ K_{\alpha} < 0,7 & \text{ – оценка 2.} \end{aligned}$$

Использование вышеуказанных критериев для оценки знаний обучающихся на подготовительном отделении показало хорошую достоверность оценки по избранной методике.

Библиографический список

1. Щеколдин, Г.А. Ретроспективный анализ содержания школьного курса физики за сто лет (1890 -1990): монография. Краснодар, 2010. 364 с.
2. Щеколдин Г.А., Щеколдин Д.Г., Щеколдина Е.В. Физика для инженерных специальностей; учебное пособие. Краснодар, 2011. 245 с.
3. Окунева С. И. Использование системы ориентированных задач в процессе формирования знаний учащихся. Проблемы развития современных педагогических систем. (Межвузовский сборник научных трудов). Москва. 1980 г.

Коллективная монография

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ, БИОФИЗИКИ
И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Компьютерная верстка Богатов Н.М.

Подписано в печать 25.10.2012 г.	Формат 60x84/16
Бумага офсетная	Печать офсетная
Печ. л. 25	тираж 500 экз.
Цена договорная	Заказ № 7

Издательство: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ

«Российское энергетическое агентство»

Типография: Краснодарский ЦНТИ