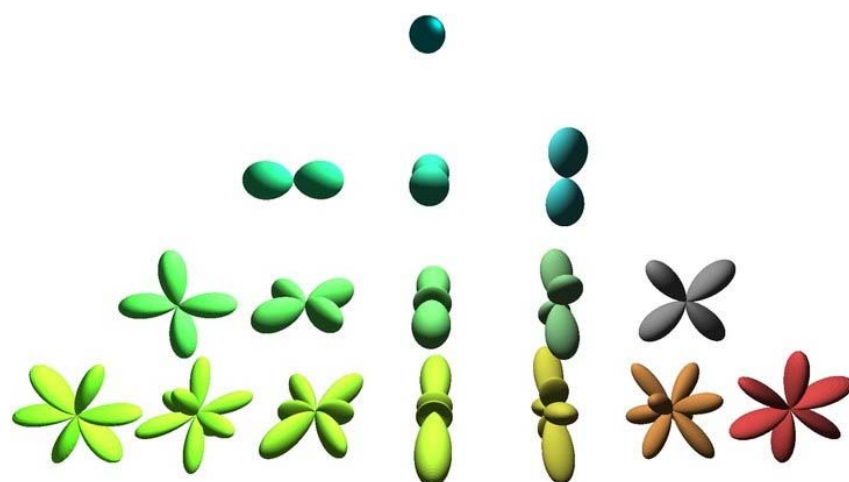
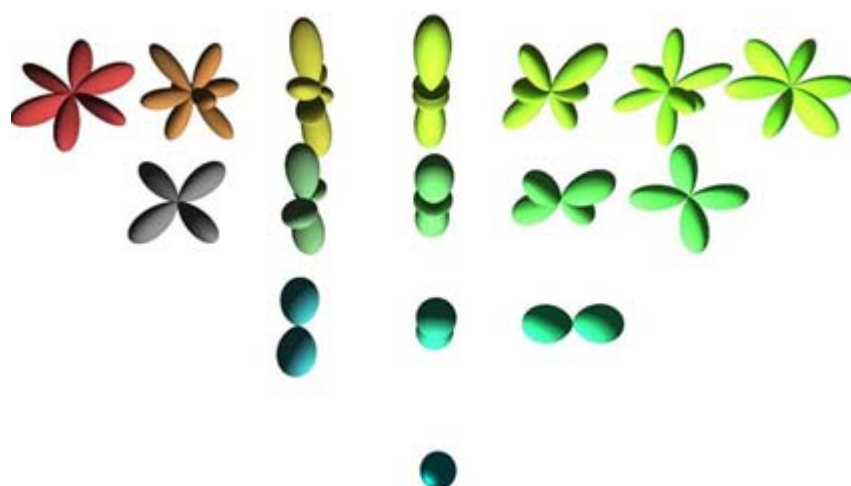


2015 – Год света  
70 лет физическому факультету СГУ



ПРОБЛЕМЫ  
ОПТИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ  
И  
БИОФОТОНИКИ  
*SFM – 2015*



Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

*Посвящается 70- летию со дня основания физического факультета  
Саратовского государственного университета*

# **«ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ SFM-2015»**

Материалы 3-го Международного симпозиума и  
19-й Международной молодежной научной школы  
Saratov Fall Meeting 2015

Под редакцией Г. В. Симоненко, В. В. Тучина

21 – 25 сентября 2015 года

Саратов



Саратов  
НОВЫЙ ВЕТЕР  
2015

**Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2015:** материалы Международного симпозиума и Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2015 / под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов : Изд - во «Новый ветер», 2015. – 212 с. : ил. ISBN 978-5-98116-191-9

В сборник вошли приглашенные лекции и доклады участников 3-го Международного симпозиума по оптике и биофотонике и 19-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике, организованной и проведенной в Саратове с 21 по 25 сентября 2015 года.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов университетов, специализирующихся в области оптики, лазерной физики, оптических технологий в биофизике и медицине, спектроскопии и оптоэлектроники.

*Международный симпозиум по оптике и биофотонике проведен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-02-20633 г)*

*Международная научная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике проведена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-32-10302)*

УДК 535(068)  
ББК 22.343.43

Научное издание

«ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ  
SFM-2015»

Материалы 3-го Международного симпозиума по оптике и биофотонике и 19-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике

Под редакцией Г. В. Симоненко, В. В. Тучина

Оригинал-макет подготовила Е. С. Букарева

Подписано в печать 01.12.2015. Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 24,68 (26,57).

Тираж 100. Заказ 12

Издательство «Новый ветер»  
410012, Саратов, Астраханская, 79.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
<b>ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ</b>	7
<i>Ткаченко Н.В., Быкова Е.В., Правдин А.Б., Наволокин Н.А., Полуконова Н.В., Бучарская А.Б.</i> СРАВНЕНИЕ МЕМБРАНОПРОТЕКТОРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛАВОНОИДОСОДЕРЖАЩИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ ПРИ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ ГЕМОЛИЗЕ	7
<i>Швачкина М.Е., Правдин А.Б.</i> О СПЕКТРЕ ПОГЛОЩЕНИЯ РИБОФЛАВИНА, ВВЕДЕННОГО В ТКАНЬ СКЛЕРЫ	11
<i>Зайцев С.М., Генина Э.А., Наволокин Н.А., Башкатов А.Н., Тучин В.В.</i> ДОСТАВКА МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В КОЖУ ЧЕРЕЗ ВОЛОСЯНЫЕ ФОЛЛИКУЛЫ EX VIVO	13
<i>Генин В.Д., Тучина Д.К., Башкатов А.Н., Генина Э.А., Тучин В.В.</i> ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ ТКАНЕЙ КОЖИ EX VIVO ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ-200	18
<b>ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА</b>	27
<i>Рябухо П.В., Савонин С.А., Гризбил Б. А., Якунин А.Н., Шапошников О.А., Рябухо В.П.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	27
<i>Савонин С.А., Рябухо В.П.</i> ЧИСЛЕННАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ ОТ МИКРОНАКЛОНОВ И ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ ДИФFUЗНО-РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	33
<i>Рябухо П.В., Максимова Л.А., Мысина Н.Ю., Рябухо В.П.</i> КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СПЕКЛОГРАММ В ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ	39
<i>Зарьков С.В., Конюхов А.И.</i> ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ГЕНЕРАЦИИ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ	47
<i>Федюкина Н.А., Кузюткина Ю.С., Романова Е.А.</i> ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ОБРАЗЦЕ СТЕКЛООБРАЗНОГО СУЛЬФИДА МЫШЬЯКА	53
<i>Паршков О. М., Кочеткова А. Е, Будяк В. В.</i> ЭФФЕКТЫ ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ КОРОТКИХ ПРОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ	59
<b>СПЕКТРОСКОПИЯ</b>	67
<i>Березин К.В., Нечаев В.В., Чернавина М. Л., Козлов О.В.</i> СТРУКТУРА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСОВ МЕТАЛЛОФОРБИДОВ С ИМИДАЗОЛОМ	67
<i>Березин К.В., Нечаев В.В., Козлов О.В., Лихтер А.М., Кочергина Д.Д., Чернавина М.Л., Бондякова А.А.</i> ТЕРМОДИНАМИКА СВЯЗЫВАНИЯ В КОМПЛИМЕНТАРНЫХ ПАРАХ ДНК И РНК	71
<i>Березин К.В., Нечаев В.В., Козлов О.В., Чернавина М.Л.</i> ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕНЗОЛА С ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ, ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ	77
<i>Березин К.В., Лихтер А.М., Чернавина М.Л., Козлов О.В., Чумаков Е.Л., Кочергина Д.Д., Егоренкова Т.А., Антонова Е.М.</i> 9,10-АНТРАХИНОН И ЕГО МОНОАЗАЗАМЕЩЕННЫЕ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ	81
<b>ФИЗИКА НАНООБЪЕКТОВ</b>	85
<i>Глухова О.Е., Колесникова А.С., Савостьянов Г. В., Слепченков М.М., Шмыгин Д.С., Зыктин А.А., Курылева А.С.</i> ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «KVAZAR» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ	85
<i>Бокарев А.Н., Пластун И.Л.</i> МЕТОДИКА ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ПОЛНОЙ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ДЛИННОЦЕПОЧЕЧНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР НА ПРИМЕРЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ	91
<i>Бокарев А.Н., Пластун И.Л.</i> ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АНСАМБЛЕЙ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫЧИСЛЕНИЯМ	96
<b>ФИЗИКА И ТЕХНИКА МАГНЕТИЗМА</b>	101
<i>Маслов А.А., Проскуряков Г.М., Игнатъев А.А.</i> АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРОВ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	101
<i>Маслов А. А., Косоручкина Е., Игнатъев А.А., Медведев Б.А.</i> МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	104
<i>Гунствин А. В., Саяпин К. А., Страхова Л. Л., Игнатъев А. А.</i> МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ	108
<i>Васильев А. В., Игнатъев А. А.</i> НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ЖИГ-РЕЗОНАТОРА	112
<i>Ретунский А.С. Спиридонов Д.М. Игнатъев А.А.</i> ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ	115
<i>Решетников Н.В., Проскуряков Г.М., Игнатъев А.А.</i> ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ	

ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IGRF МОДЕЛИ	117
<i>Игнатьев А.А., Спиридонов Д.М.</i> ОЦЕНКА ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОМЕТРА НА МАГНИТОРЕЗИСТОРАХ	119
<i>Хвалин А.Л., Воробьев А.В., Бондаренко А.С.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И СХЕМ НА ИХ ОСНОВЕ	122
<i>Медведев Б.А., Дронкин А.С., Листратова Е.С.</i> МЕТОДИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ кТ В МАГНИТОБИОЛОГИИ	125
<i>Бородина Н.А., Кудрявцева С.П.</i> ЗАВИСИМОСТЬ УРОВНЯ ЗАПИСЫВАЕМОГО СИГНАЛА ОТ ТОЛЩИНЫ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ	130
<i>Зайцева Е.С., Романченко Л.А.</i> ПОДАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОМЕХ	133
<i>Ретунский А. С., Игнатьев А. А.</i> ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ	137
<b>МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ</b>	140
<i>Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.</i> КАК ДИАГНОСТИРОВАТЬ РЕАЛЬНЫЕ КОГНИТИВНЫЕ И МОТИВАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА БУДУЩИХ МАГИСТРАНТОВ?	140
<i>Цой В.И.</i> ИМПУЛЬСЫ АБРАГАМА И МИНКОВСКОГО В ВОЛНЕ БРЮСТЕРА	142
<i>Симоненко Г. В.</i> УСЛОВИЕ АХРОМАТИЧНОСТИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА	145
<i>Усольцева Ю.В.</i> ОБРАТНАЯ КАМЕРА-ОБСКУРА	149
<i>Медведев Б. А.</i> КРУГЛЫЙ СТОЛ: ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА	150
<i>Бабков Л. М.</i> ВСПОМИНАЯ НАШИХ УЧИТЕЛЕЙ: ПРОФЕССОР МИХАИЛ АРКАДЬЕВИЧ КОВНЕР	151
<i>Горохов А. В.</i> КОГЕРЕНТНОСТЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ	152
<i>Париков О. М.</i> ВОКРУГ ФОТОНА	153
<i>Позднева С.П., Маслов Р.В.</i> ОГЮСТЕН ФРЕНЕЛЬ: СТАНОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ СВЕТА	154
<i>Роках А.Г.</i> «УМНЫЙ» ГЛАЗ СОВРЕМЕННОЙ ФОТОКАМЕРЫ	155
<i>Белов В.Н.</i> УЧЕНИЕ СВЯТИТЕЛЯ ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ О БОЖЕСТВЕННОМ СВЕТЕ	156
<i>Михель Д. В., Михель И. В.</i> СВЕТ И ТЬМА НА «УРОКЕ АНАТОМИИ» ОТ РЕМБРАНДТА	157
<i>Медведев Б.А.</i> ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В КАРТИНЕ МИРА ЭПОХИ ИТАЛЬЯНСКОГО ВОЗРОЖДЕНИЯ	158
<i>Париков О. М., Трухина А. А.</i> ЗАМЕЧАНИЯ К ЭФФЕКТУ ЭПР, ЗАПУТАННЫМ СОСТОЯНИЯМ И ФИЛОСОФИИ ФИЗИКИ	159
<i>Шимельфениг О. В.</i> СВЕТ, КАК ПРИРОДА СОЗНАНИЯ	160
<i>Федосов И. В.</i> ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ, ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЕТА	160
<i>Дуплинская Ю. М.</i> ИСКУССТВО ВИДЕТЬ: «ЧТО» ИЛИ «СКВОЗЬ ЧТО»?	161
<i>Роках А.Г.</i> МИКРОМИР ПРОТИВ МАКРОМИРА, ИЛИ НЕОБЫЧНОЕ В ПРИВЫЧНОМ	162
<i>Розен В. В.</i> ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ: ОТ ДРЕВНИХ ГРЕКОВ К СОВРЕМЕННОСТИ	163
<i>Довгаленко Н. В.</i> ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТА	164
<i>Аникин В. В.</i> НОВЫЙ СВЕТ В СИСТЕМАТИКЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ	164
<i>Медведев Б. А., Генин В. Д.</i> ВЕЛИКИЕ «ИГРОКИ В БИСЕР»: КАРТИНА МИРА В ПОЛУТОНАХ ПЕРЕЖИВАНИЙ	165
<i>Розен В. В.</i> К ЭВОЛЮЦИИ НАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА	166
<b>АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК КАК СРЕДСТВО МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ОБЩЕНИЯ</b>	168
<i>Eremina S. V., Pravdin A. B.</i> TERMINOLOGY: CONCEPT VERSUS MEANING	168
<i>Alexeeva Dina A.</i> A METAPHOR AS A TOOL AND AS AN OBSTACLE	170
<i>Koronovskiy Alexander A., Elistratov Andrew A., Eremina Svetlana V.</i> FREQUENCY OF OCCURRENCE OF DEFINITE ARTICLE IN ESP TEXTS	172
<b>ПЁТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ: ЖИЗНЬ И СВЕТ</b> <i>Аникин В.М.</i>	175

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В этом году Международный симпозиум Saratov Fall Meeting и Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике были посвящены Году света и 70-летию основания физического факультета Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

В 2015 году в рамках Международного симпозиума Saratov Fall Meeting 2015 (SFM'15) «Оптика и биофотоника - III» прошли 12 продолжающихся конференций и семинаров «Оптические технологии в биофизике и медицине XVII», «Лазерная физика и фотоника XVII», «Спектроскопия и молекулярное моделирование XVI», «Электромагнетизм микроволн, субмиллиметровых и оптических волн XV», «Нанобиофотоника XI», «Микроскопические и низкокогерентные методы в биомедицинских и других приложениях VIII», «Интернет биофотоника VIII», «Нелинейная динамика VI», «Низкоразмерные структуры V» «Биомедицинская спектроскопия II», «Передовые поляризационные технологии в биомедицине и материаловедении II» и «Компьютерная биофизика и анализ биомедицинских данных II». Совместно с SFM'15 в этом году проходил 7-ой финнско-российский симпозиум Фотоника и лазер Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS'15). Одновременно с Симпозиумом была организована XIX Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике.

Участникам Симпозиума и Школы была предоставлена возможность прослушать пленарные лекции профессоров Лондонского университета королевы Марии и Саратовского государственного университета Глеба Сухорукова (Великобритания, Россия), Института фотоники и технологии им. Лейбница Juergen Popp (Германия), Института науки и технологии Сколково и университета Аризоны Ильдара Габитова (Россия, США), Химико-технологического центра Каталонии Nicolás Pazos-Pérez (Испания), ООО Арт Фотоник и Института общей физики РАН Вячеслава Артюшенко (Германия, Россия), Физического факультета KAIST YongKeun (Paul) Park (Южная Корея), Института метагеномики и микробиологических технологий Aleš Lapanje (Словения), Университета Иллинойса в Урбана-Шампань Munir Nayfeh (США), Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН Николая Хлебцова (Россия) и Саратовского государственного университета Ольги Глуховой (Россия), а также пленарные интернет-лекции профессоров Университета Иллинойса в Урбана-Шампань и Бекмановского института передовой науки и технологии Gabriel Popescu (США) и Университета Калифорнии (Ирвин) Zhongping Chen (США). Год от года число пленарных лекций на симпозиуме увеличивается, что даёт возможность аудитории познакомиться с работами ведущих учёных мира, задать им вопросы и обсудить интересующие проблемы.

Всего на Saratov Fall Meeting 2015 было представлено 12 пленарных лекций, из которых 2 - через Интернет, 35 приглашенных лекций (из них 27 приглашенных интернет-лекций), 105 устных докладов, 207 стендовых и 51 интернет-доклад. На сайте SFM 2015 с начала публикации Call for Papers побывало 3700 человек. За это время ими было просмотрено более 82000 страниц. Всего зарегистрировано 1968 человек, из них 208 новых участников зарегистрировались в этом году. Сайт SFM в 2015 году посетили 473 зарегистрированных пользователя из более чем 30 стран (среди которых: РФ, США, Великобритания, Ирландия, Германия, Бельгия, Швеция, Дания, Финляндия, Италия, Испания, Словения, Польша, Болгария, Белоруссия, Украина, Казахстан, Турция, Китай, Индия, Австралия, Сингапур и др). Российская часть авторов докладов была представлена учеными из Московского государственного университета, Международного лазерного центра МГУ, Московского государственного технического университета им. Баумана, Института общей физики РАН, (Москва), Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (Москва), Института биохимии РАН (Москва), Института биохимии и физиологии микроорганизмов РАН (Москва), Института микробиологии РАН (Москва), Института проблем передачи информации РАН (Москва), Научного клинического центра ОАО «Российские Железные Дороги» (Москва), С.-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербургского

государственного политехнического университета, С.-Петербургского государственного медицинского университета, Объединенного Института Ядерных Исследований (Дубна), Московского института электронной техники (Зеленоград), Филиала института биоорганической химии РАН (Пушино), Института проблем лазерных и информационных технологий РАН (Троицк), Самарского национального исследовательского аэрокосмического университета, Самарского государственного университета, Самарского государственного медицинского университета, Института систем обработки изображений РАН (Самара), Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород), Нижегородского национального исследовательского университета, Нижегородской медицинской академии, Тамбовского государственного университета, Волгоградского государственного университета, Астраханского государственного университета, Орловского регионального клинического госпиталя, Южного федерального университета (Ростов-на-Дону), Ростовского научно-исследовательского института онкологии (Ростов-на-Дону), Оренбургского государственного университета, Томского национального исследовательского университета, Института лазерной физики СО РАН (Новосибирск), Института лазерных и информационных технологий СО РАН (Новосибирск), Сибирского федерального университета (Красноярск), Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института технической физики (Снежинск), Саратовского национального исследовательского университета, Саратовского государственного технического университета, Саратовского государственного медицинского университета, Саратовского государственного аграрного университета, Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (Саратов), Института точной механики и управления РАН (Саратов), НПЦ «Алмаз-Фазотрон» (Саратов) и других вузов и научных центров страны. Характерным для симпозиума, было заметное число докладов, подготовленных совместно учеными России и других стран (США, Канады, Дании, Великобритании, Финляндии, Болгарии, Украины, Белоруссии и др.). Часть устных презентаций от имени своих научных групп была сделана молодыми учеными, представляющими к защите кандидатские диссертации и нуждающимися в практике устных выступлений. В Симпозиуме и Школе приняли участие (включая слушателей) более 500 человек.

Все доклады конференций были представлены на английском языке. Обсуждения и дискуссии проводились на русском и английском. В связи с тем, что празднование Года Света, объявленного ЮНЕСКО в 2015 году, носит не только научный, но и гуманитарный характер, в рамках Школы под руководством доцента СГУ Медведева Б.А. был успешно проведен КРУГЛЫЙ СТОЛ: ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА с чрезвычайно интересными обсуждениями и дискуссиями. Не смотря на то, что редакторы сборника не разделяют некоторые философские воззрения, обсуждавшиеся на круглом столе, редакторы посчитали необходимым опубликовать все представленные участниками круглого стола материалы для суждений читателей. По материалам Симпозиума и Школы будет издан спецвыпуск журнала «Journal of Biophotonics & Engineering» (2015), а также сборники трудов конференции Proc SPIE (2016).

Учитывая важность, перспективность и методическую ценность научной тематики Симпозиума, а также быстрый рост молодых кадров и необходимость их интегрирования в международную науку, решено провести очередной Симпозиум в 2016 году.

Председатель 3-го Международного симпозиума и  
19-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,  
профессор, доктор физико-математических наук

*В. В. Тучин*

Секретарь 3-го Международного симпозиума и  
19-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,  
доцент, кандидат физико-математических наук

*Э. А. Генина*

Председатель организационного комитета  
19-й Международной междисциплинарной молодежной научной школы,  
доцент, доктор физико-математических наук

*Г. В. Симоненко*

## ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

СРАВНЕНИЕ МЕМБРАНОПРОТЕКТОРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФЛАВОНОИДОСОДЕРЖАЩИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСТРАКТОВ ПРИ ФОТОДИНАМИЧЕСКОМ  
ГЕМОЛИЗЕ

Ткаченко Н.В.<sup>1</sup>, Быкова Е.В.<sup>1</sup>, Правдин А.Б.<sup>1</sup>, Наволокин Н.А.<sup>2</sup>, Полуконова Н.В.<sup>2</sup>, Бучарская А.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

В работе показано, что высокие концентрации растительных флавоноидосодержащих экстрактов *Helichrysum arenarium* (L.) Moench и *Zea mays* снижают эффективность мембранопротекторного (антиоксидантного) действия при фотодинамическом действии. Наиболее эффективно мембранопротекторное действие экстракта *Helichrysum arenarium* (L.) Moench, который показывает более выраженное антиоксидантное действие.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин повреждения мембран эритроцитов при патологических процессах в организме и неблагоприятных условиях хранения является активация в них перекисного окисления липидов (ПОЛ), которая происходит в результате образования активных форм кислорода и/или снижения активности антиоксидантных систем клеток [1, 2]. Изменения свойств мембран эритроцитов приводит к ухудшению их физиологических характеристик, в частности, реологических показателей [3, 4]. Возможным способом торможения ПОЛ в мембранах эритроцитов может быть повышение их окислительной устойчивости с сохранением функциональной активности за счет использования антиоксидантов. Антиоксиданты - соединения, способные связывать содержащие неспаренные электроны частицы с образованием менее активных или вовсе неактивных радикалов. Наиболее перспективными источниками антиоксидантов считаются растительные объекты, так как они имеют большую биосовместимость и менее затратны в плане производства. Однако, в больших концентрациях они могут оказывать цитотоксическое влияние на клетки.

Среди изучаемых в настоящее время растительных антиоксидантов можно отметить такие, как, например, экстракт из листьев Лейотрикса спирального [5], экстракт Ипомеи двулопастной [6], экстракт Спилантеса [7] и др.

Сравнивать эффективность действия антиоксидантов можно по различным параметрам и различными методами [8]. В настоящей работе рассматривалась модель фотодинамического гемолиза эритроцитов, при котором в качестве меры эффективности действия антиоксидантов служила их способность снижать скорость темновой фазы фотодинамического гемолиза, так как антиоксиданты способны перехватывать активные формы кислорода, который является одним из обязательных компонентов фотодинамического действия. Чем ниже скорость гемолиза, тем слабее лизируют эритроциты, и, следовательно, тем эффективнее действует антиоксидант.

В настоящей работе сравнивается эффективность двух флавоноидосодержащих антиоксидантов растительного происхождения: Бессмертника песчаного (*Helichrysum arenarium* (L.) Moench) и диплоидной антоциановой формы Кукурузы обыкновенной (*Zea mays*) [9, 10].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводились на крови белых лабораторных крыс согласно “Общим принципам экспериментов на животных”, которые соответствуют положениям Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей. Стабилизированная гепарином кровь крысы разбавлялась двукратным объемом физиологического раствора (NaCl 0,9%), после чего двукратно центрифугировалась при 2000 оборотов/мин в течение 5 минут. После последнего центрифугирования при помощи дозатора отбиралось со дна пробирки 0.2 мл эритроцитарной массы (100% гемокрит) и вносилось в пробирку, наполненную 1.8 мл антиоксиданта в физиологическом растворе с исследуемой концентрацией. В экспериментах использовались следующие концентрации экстракта Бессмертника песчаного (*Helichrysum arenarium* (L.) Moench): 1.6, 3.2, 6.3, 12.7 мг/мл; диплоидной антоциановой формы Кукурузы обыкновенной (*Zea mays*) – 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.1 мг/мл. После перемешивания суспензия эритроцитов помещалась на



инкубацию в воздушный термостат на 2 часа при 37°C. Контрольный образец инкубировался в чистом физиологическом растворе. После окончания процесса инкубации суспензия центрифугировалась 5 мин при 2000 об/мин, по завершении надосадочный слой снимался дозатором и вместо него заливалось 1.8 мл физ. раствора для получения 10% суспензии эритроцитов [11].

Для проведения экспериментов по фотодинамическому гемолизу из 2 мл 10% суспензии эритроцитов бралось 0.05 мл взвеси и добавлялось к 4.95 мл 0,01% раствора эритрозина В (Sigma, E-7379) в физиологическом растворе. Приготовление данного образца желательно проводить перед началом самого эксперимента т.к. эритрозин В является фотосенсибилизатором и на свету провоцирует досрочное начало процесса гемолиза.

Облучение сенсibilизированных суспензий проводилось в 3-мм кюветах из оптического стекла лампой накаливания с инфракрасными фильтрами в течение 1 минуты. В процессе облучения содержимое кювет постоянно перемешивалось для лучшей аэрации и предотвращения седиментации эритроцитов.

После облучения пропускание образцов измерялась в 3-мм кюветах в течение ~ 2 часов с 3 минутными интервалами. Все измерения проводились на однолучевом спектрофотометре СФ-26 (Россия), контролем служила кювета с суспензией, не подвергшейся облучению. В течение всего времени измерения содержимое кювет постоянно перемешивалось для предотвращения седиментации эритроцитов.

Измерения проводились на длине волны 680 нм, где минимально поглощение гемоглобина, и ослабление светового потока происходит только за счет рассеяния на эритроцитах и поглощения на фотодинамическом красителе. Концентрация эритроцитов в образцах была достаточно мала для того, чтобы рассеяние света происходило в режиме малократного рассеяния. Путем подбора толщины кюветы и концентрации эритроцитов оптическая плотность фотометрированных образцов на выбранной длине волны находилась в интервале значений, при которых ее величина была линейно связана с концентрацией эритроцитов в исследуемой суспензии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

10% суспензии эритроцитов с различными антиоксидантами инкубировались в течение 2 часов. Затем получали 0.1% суспензии на основе раствора красителя Эритрозина В в физиологическом растворе. После этого суспензии облучались в 3-мм кюветах из оптического стекла в течение 1 минуты с непрерывной аэрацией, после чего в течение 2 часов проводились измерения пропускания/оптической плотности. Эффективность фотодинамического повреждения мембран оценивалась по скорости темнового гемолиза. В качестве величины, характеризующей скорость, бралось время гемолиза 50% эритроцитов  $t_{50\text{relative}}$  [12, 13]. Эффективность мембранопротекторного (антиоксидантного) действия экстрактов устанавливалась по отношению величин  $t_{50\text{relative}}$  для эритроцитов, инкубированных с экстрактом, к  $t_{50\text{relative}}$  для эритроцитов, инкубированных с физиологическим раствором. Чем выше величина этого отношения, тем сильнее способность антиоксидантов ингибировать сенсibilизированное фотоокисление.

Рис. 1 иллюстрирует кинетические кривые темновой фазы фотодинамического гемолиза, ингибированного экстрактом Бессмертника песчаного (*Helichrysum arenarium* (L.) Moench) в различных концентрациях, на Рис. 2 представлено распределение величин  $t_{50\text{relative}}$  в зависимости от концентрации экстракта антиоксиданта.

Из полученных данных видна не линейная зависимость величины  $t_{50\text{relative}}$  от концентрации. Спад эффективности мембранопротекторного действия экстракта при концентрации 6.3 мг/мл предположительно можно объяснить имеющимся пороговым по концентрации фотоцитотоксическим (фотоиницирующим ПОЛ) действием самого экстракта Бессмертника песчаного.

На Рис. 3 – 4 представлены данные по мембранопротекторной (антиоксидантной) активности экстракта антоциановой Кукурузы обыкновенной (*Zea mays*). Экстракт из диплоидной формы антрацитовая Кукурузы обыкновенной проявляет тенденцию к мембранопротекторным (антиоксидантным) свойствам только при низких концентрациях, при высоких концентрациях он ведет себя подобно фотоинициатору. Кроме того, при низких концентрациях экстракта Кукурузы

антоциановой (0.1-0.4 мг/мл) отмечается нелинейное поведение зависимости величины  $t_{50\text{relative}}$  от концентрации. Практически на всем концентрационном интервале наблюдается увеличение скорости гемолиза по сравнению с контрольным образцом, что говорит о неэффективности использования экстракта антоциановой Кукурузы обыкновенной в качестве антиоксиданта.

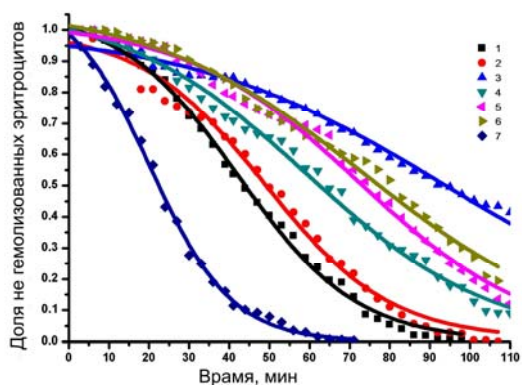


Рис. 1. Кинетические кривые темновой фазы фотодинамического гемолиза, ингибированного экстрактом *Helichrysum arenarium (L.) Moench* в различных концентрациях: 1 – 0 мг/мл (в физиологическом растворе 0.9%); 2 – 1.6 мг/мл; 3 – 3.1 мг/мл; 4 – 6.3 мг/мл; 5 – 12.7 мг/мл; 6 – 16 мг/мл; 7 – 21.2 мг/мл

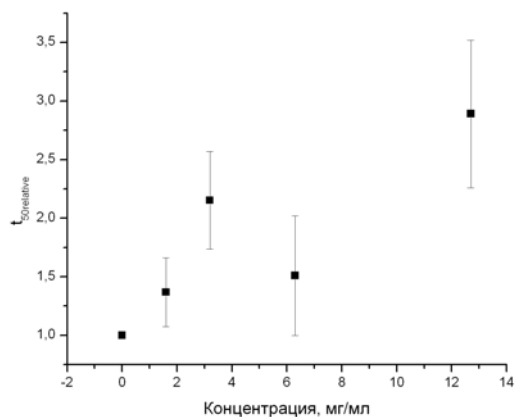


Рис. 2. Зависимость эффективности мембранопротекторного действия экстракта *Helichrysum arenarium (L.) Moench* в зависимости от его концентрации (в интервале низких концентраций)

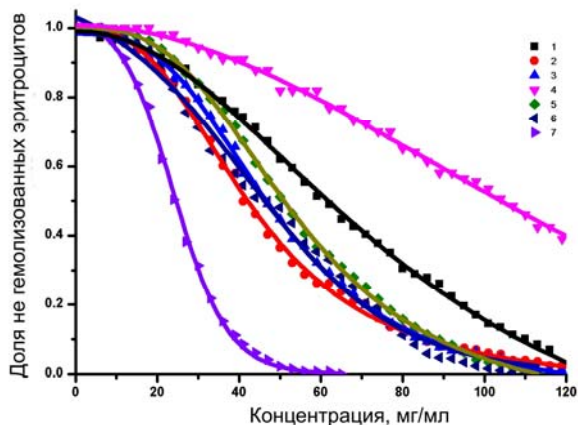


Рис. 3. Кинетические кривые темновой фазы фотодинамического гемолиза, ингибированного экстрактом *Zea Mays* в различных концентрациях: 1 – 0 мг/мл (в физиологическом растворе 0.9%); 2 – 0.1 мг/мл; 3 – 0.2 мг/мл; 4 – 0.4 мг/мл; 5 – 0.8 мг/мл; 6 – 1.6 мг/мл; 7 – 3.1 мг/мл

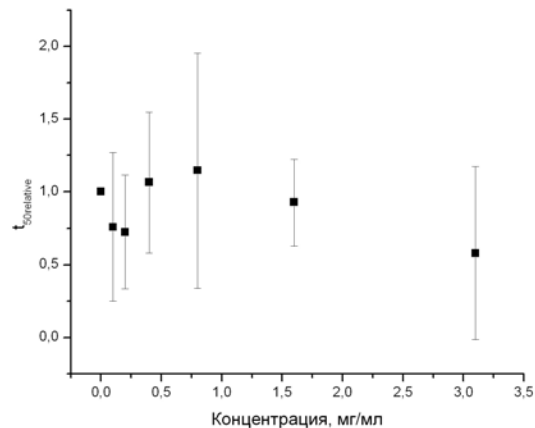


Рис. 4. Зависимость эффективности мембранопротекторного действия экстракта *Zea Mays* в зависимости от его концентрации

Было проведено сравнение эффективности гемолиза суспензий 0,01% эритроцитов в эритрозине Б, ингибированных Кукурузой антацитовой (*Zea mays*) и суспензий 0,01% эритроцитов в эритрозине Б, ингибированных Бессмертником песчаным (*Helichrysum arenarium (L.) Moench*) по величине  $t_{50\text{relative}}$  (Рис.5).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что из двух тестируемых антиоксидантов наибольшую мембранопротекторную эффективность показывает экстракт *Helichrysum arenarium* (L.) Moench, который дает максимальное значение величины  $t_{50\text{relative}}$  – 2.9 (при концентрации экстракта 12.7 мг/мл) по сравнению с контрольным образцом.

Высокие концентрации обоих антиоксидантов снижают эффективность мембранопротекторного действия (уменьшают ингибирование фотодинамического действия). Данный эффект может быть связан с уменьшением механической прочности мембран эритроцитов под воздействием компонентов экстрактов и/или фотоинициацией экстрактами ПОЛ при их высоких концентрациях.

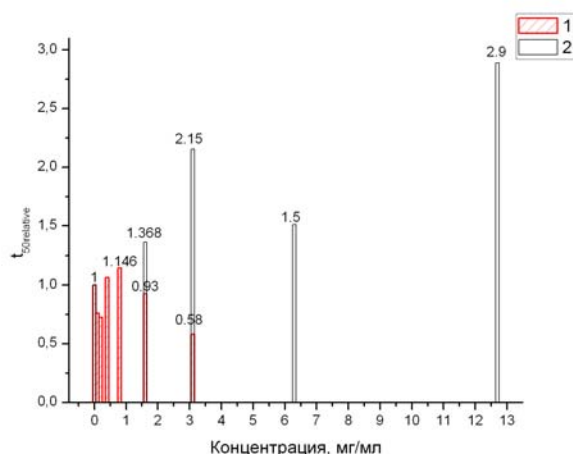


Рис. 5. Сравнение эффективности мембранопротекторной (антиоксидантной) активности экстракта *Zea mays* (1) и экстракта *Helichrysum arenarium* (L.) Moench (2) в интервале их низких концентраций

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокие концентрации растительных флавоноидосодержащих экстрактов *Helichrysum arenarium* (L.) Moench и *Zea mays* снижают эффективность мембранопротекторного (антиоксидантного) действия при фотодинамическом действии. Наиболее эффективно мембранопротекторное действие экстракта *Helichrysum arenarium* (L.) Moench, который показывает более выраженное антиоксидантное действие.

Работа была выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ 703.2014.2

## Литература

1. Мухамадияров Р.А., Кривая Е.В., Круч М.А. и др. // Современные проблемы науки и образования. 2012, №4, <http://www.science-education.ru/104-6862>.
2. Евстигнеева Р. П., Волков И. М., Чудинова В. В. // Биологические мембраны. 1998, Т.15, №2, с. 119-136.
3. Hatherill J.R., Till G.O. and Ward P.A. // Agents and Actions. 1991, Vol. 32, №3/4, p. 252-258.
4. Uyesaka N., Hasegava S., Ishioka N. et al. // Biorheology. 1992, Vol. 29, p. 217-229.
5. De Freitas M. G. Araújo, Hilário F., Vilegas W. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2012, Vol. 13, p. 9260-9277.
6. Arun Kumar, Shrabani Paul, Pingal Kumari // R. Br. extracts. IJCP, November 2014 - January 2015, Vol. 5, № 4, p. 91-109.
7. Sikder A., Rahman A., Islam R., Kaiser A. et al. // Bangladesh pharmaceutical J. 2010, Vol. 13, № 1, p. 63-67.
8. Хасанов В.В., Рыжова Г.Л., Мальцева Е.В. //Химия растительного сырья. 2004, №3, с. 63-75.
9. Скворцова В.В., Наволокин Н.А., Полуконова Н.В. и др. // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2015, Т. 78, №2, с. 30-33.
10. Наволокин Н.А., Полуконова Н.В., Маслякова Г.Н. и др. // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2013, Vol. 9, № 2, p. 213-220.
11. Tkachenko N., Pravdin A., Terentyuk G., et al. // Proc. of SPIE. 2015, Vol. 9448, p. 94480P-1 - 94480P-8.
12. Bilgin M.D., Grossweiner L.I., Fernandez J.M. // Lasers Med Sci. 1998, Vol. 13, p. 42-54.
13. Al-Akhras M-A., Aljarrah K., Albiss B., et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015, Vol. 92, p. 1-13.

## О СПЕКТРЕ ПОГЛОЩЕНИЯ РИБОФЛАВИНА, ВВЕДЕННОГО В ТКАНЬ СКЛЕРЫ

*Швачкина М.Е., Правдин А.Б.**Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Были изучены спектры поглощения и спектры возбуждения флуоресценции рибофлавина в ткани склеры. Показано, что введение рибофлавина в ткань склеры приводит к проявлению поглощения на длине волны  $\sim 350$  нм.

В последние годы развивается новый метод лечения прогрессирующей миопии [1-4], в основе которого лежит фотохимическая реакция, приводящая к образованию поперечных связей (фотосшивок) между коллагеновыми волокнами, тем самым укрепляющая склеру. В данной реакции в качестве фотосенсибилизатора было предложено использовать рибофлавин, активирование которого происходит с помощью ультрафиолетового излучения длиной волны 370 нм. Выбор длины волны излучения обусловлен наличием максимума в спектре поглощения водного раствора рибофлавина на данной длине волны. В работах [5-7] показано, что при взаимодействии рибофлавина со специальными белками-переносчиками происходит образование комплексов, пик поглощения которых смещен в коротковолновую область. Так как при фотосшивании при взаимодействии раствора рибофлавина со склерой возможно образование комплекса рибофлавина с коллагеновыми волокнами, то по спектру поглощения рибофлавина в склере можно определить наилучшие длины волн для возбуждения молекулы рибофлавина, ассоциированного с коллагеном и, следовательно, наилучшие для формирования фотосшивок.

Еще одним возможным способом определения эффективных длин волн для фотохимической реакции образования фотосшивок является изучение спектра возбуждения флуоресценции образца склеры, находящегося в растворе рибофлавина. Из кинетики образования поперечных связей в коллагене видно, что в образовании фотосшивок участвует рибофлавин в триплетном возбужденном состоянии. Это означает, что эффективность образования фотосшивок зависит от эффективности образования триплетных состояний. Известно, что триплетные состояния образуются в результате интеркомбинационных переходов электронов с синглетного уровня, то есть зависят от населенности синглетного уровня. От населенности возбужденного синглетного уровня также зависит интенсивность флуоресценции. Из предположения, что константа скорости образования триплетных состояний не зависит от длины волны возбуждающего излучения, можно, исследуя спектр возбуждения флуоресценции, оценить наилучшие длины волн для образования ковалентных связей.

В данной работе было проведено изучение спектров поглощения и спектров возбуждения флуоресценции рибофлавина в склере. В качестве экспериментальных объектов использовались образцы размороженной свиной склеры. Перед измерениями склера тщательно очищалась от сетчатки и разрезалась в сагитальном направлении на образцы размером около  $0,8 \times 1$  см.

Для определения спектра поглощения регистрировался спектр пропускания ультрафиолетового излучения через склеру в области длин волн 310-400 нм на спектрофотометре Shimadzu UV-3600. Так как склера имеет большую оптическую плотность, для измерений применялся метод оптического просветления, чтобы уменьшить рассеяние ультрафиолетового излучения в склере. В качестве просветляющего агента использовался 100% глицерин ЧДА ГОСТ 6259-75. Из-за наличия флуоресценции склеры в ультрафиолетовой области, излучение, прошедшее через склеру, регистрировалось с использованием фильтра УФС 1.

Спектры поглощения образцов склеры сравнивались со спектром поглощения 0,01% раствора рибофлавина в глицерине. Для изучения влияния времени взаимодействия рибофлавина с коллагеном на спектр поглощения были сравнены образцы склеры, инкубированные в 0,1% растворе рибофлавина 1 час и сутки, и после просветленные в 100% глицерине. Для сравнения спектральных кривых значение оптической плотности было нормировано на максимальное значение для каждого образца.

Полученные результаты для образцов склеры свиньи представлены на рисунке 1. Максимум спектра поглощения 0,01% раствора рибофлавина и глицерина наблюдается на длине волны 369 нм. Для образца склеры в рибофлавине, просветленного в 100% глицерине, наблюдается сдвиг

максимума поглощения в коротковолновую область на длину волны 362 нм. При увеличении времени взаимодействия рибофлавина со склерой наблюдается больший сдвиг на длину волны 353 нм.

Из полученных результатов видно, что спектр поглощения рибофлавина в склере смещен в коротковолновую область. То, что спектр поглощения больше смещается при увеличении времени инкубирования склеры в растворе рибофлавина, показывает, что этот сдвиг связан не столько с поглощением склеры, сколько с поглощением рибофлавина, находящегося в строме склеры, образованной сетью коллагеновых волокон.

Спектры возбуждения регистрировались на спектрофлуориметре Cary Eclipse на длине волны флуоресценции 531 нм в диапазоне длин волн 310-390 нм с использованием фильтра с областью пропускания 250-395 нм, расположенного на пути возбуждающего излучения.

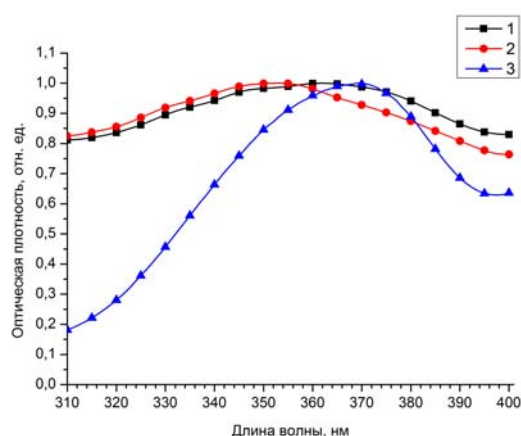


Рис. 1. Нормированные спектры поглощения 1 – образца склеры свиной, находящегося в 0,1% растворе рибофлавина 1 час, после в 100% глицерине 1 час, 2 – образца склеры свиной, находящегося в 0,1% растворе рибофлавина сутки, после в 100% глицерине 1 час, 3 – 0,01% раствора рибофлавина и глицерина

Были сравнены спектры возбуждения 0,001% раствора рибофлавина в физиологическом растворе и образца склеры свиной, инкубированного в 0,1% растворе рибофлавина. Также для сравнения был снят спектр возбуждения образца склеры в физиологическом растворе. Для сравнения форм спектров кривые возбуждения флуоресценции были нормированы на максимальное значение для каждого образца. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

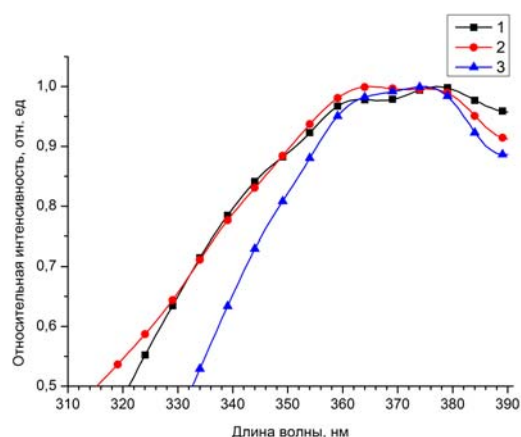


Рис. 2. Нормированные спектры возбуждения флуоресценции на длине волны флуоресценции 531нм 1 – образца свиной склеры, находящийся в 0,1% растворе рибофлавина 1 час, 2 – образца свиной склеры в физиологическом растворе, 3 – 0,001% раствора рибофлавина

Из рисунка 2 видно, что спектр возбуждения флуоресценции склеры, инкубированной с раствором рибофлавина (кривая 1), заметно уширен в коротковолновую область по сравнению со спектром возбуждения раствора рибофлавина (кривая 3). Такое уширение может быть связано с возбуждением флуоресценции (на 531нм) самой склеры (коллагена) (кривая 2). Однако, в спектре возбуждения флуоресценции образца склеры в рибофлавине видно и проявление пика в интервале длин волн 340-350 нм. И если уширение в коротковолновую область и увеличение “интенсивности”

на длине волны 360 нм в спектре возбуждения флуоресценции рибофлавина в склере можно обосновать суперпозицией спектров возбуждения флуоресценции водного раствора рибофлавина и склеральной ткани (такой расчетный эксперимент был проделан), то к появлению вышеупомянутого пика такая суперпозиция не приводит. Это дает основание предположить, что данный пик в спектре возбуждения рибофлавина в склере не связан с флуоресценцией склеры и может быть обоснован поглощением (с последующей флуоресценцией) ультрафиолетового излучения рибофлавином, связанным со склеральной тканью.

В данной работе было установлено, что и в спектрах поглощения, и в спектрах возбуждения флуоресценции рибофлавина в склере видно появление полосы поглощения-возбуждения в диапазоне длин волн 340-350 нм, что возможно связано с образованием неких комплексов рибофлавина и коллагеновых волокон ткани. Таким образом, можно ожидать, что при реализации метода укрепления склеры путем формирования рибофлавин/УФ фотосшивок использование ультрафиолетового облучения на длине волны 340-350 нм будет более эффективным.

#### Литература

1. Wollensak G., Spoerl E. //Journal of Cataract & Refractive Surgery. 2004, Vol. 30, № 3, p. 689-695.
2. Wollensak G., Iomdina E. //Acta ophthalmologica. 2009, Vol. 87, № 2, p. 193-198.
3. Zhang Y., Li Z., Liu L., et al. // BioMed research international. 2014, Vol., 2014.
4. Wollensak G., Iomdina E., Dittert D. D., et al.//Acta Ophthalmologica Scandinavica. 2005, Vol. 83, № 4, p. 477-482.
5. List N. H., Pimenta F. M., Holmegaard L., et al. //Physical Chemistry Chemical Physics. 2014, Vol. 16, № 21, p. 9950-9959.
6. Pimenta F. M., Jensen R. L., Breitenbach T., et al. //Photochemistry and photobiology. 2013, Vol. 89, № 5, p. 1116-1126.
7. Duurkens R. H., Tol M. B., Geertsma E. R., et al. //Journal of Biological Chemistry. 2007, Vol. 282, № 14, p.10380-10386.

## ДОСТАВКА МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ В КОЖУ ЧЕРЕЗ ВОЛОСЯНЫЕ ФОЛЛИКУЛЫ *EX VIVO*

Зайцев С.М.<sup>1</sup>, Генина Э.А.<sup>1,2</sup>, Наволокин Н.А.<sup>3</sup>, Баикатов А.Н.<sup>1,2</sup>, Тучин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Томский государственный университет

<sup>3</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

В работе представлены результаты экспериментального исследования доставки суспензии нано- и микрочастиц в кожу через волосяные фолликулы. Эксперименты проводились на коже белых лабораторных крыс *ex vivo*. В качестве исследуемых частиц использовались частицы диоксида титана (TiO<sub>2</sub>) диаметром: 25 нм, 100 нм и 5 мкм. В качестве основы суспензии использовался полиэтиленгликоль 300. Подготовленные суспензии наносились на различные участки кожи крысы и подвергались воздействию ультразвука частотой 1 МГц и мощностью 1 Вт. ОКТ-мониторинг исследуемых областей кожи крысы позволил выявить зависимость глубины проникновения микро- и наночастиц в кожу от диаметра самих частиц. Наибольшая глубина проникновения внутрь фолликула (194±62 мкм) и средняя скорость (39.4 мкм/мин) наблюдалась для частиц диаметром 25 нм. Данные частицы наблюдались как в живом эпидермисе, так и в дермальных слоях кожи. Частицы диаметром 100 нм показали глубину 154±80 мкм и среднюю скорость проникновения 25.5 мкм/мин, а частицы 5 мкм проникли на глубину 160±51 мкм со средней скоростью 20.0 мкм/мин. Их пути проникновения ограничивались каналами волосяных фолликулов.

## ВВЕДЕНИЕ

В результате многолетних исследований возможности использования наночастиц в качестве наноконтейнеров для доставки лекарственных препаратов было установлено, что они способны доставлять лекарства через кожный барьер [1-4]. Авторами работ [2-4] было показано, что функционализация микро- и наночастиц лекарственными препаратами и их трансфолликулярная доставка в дерму кожи является перспективным методом для локализованной доставки лекарственных препаратов (рисунок 1).

Волосяной фолликул представляет собой корень волоса вместе с окружающим его корневым влагалищем. В нижней части фолликула находится довольно большое образование — волосяной сосочек, образованный главным образом из соединительной ткани и сетки кровеносных сосудов. Сосочек контролирует состояние и рост волоса. Другими компонентами волосяного фолликула

являются сальные (их обычно 2-3) железы, секрет которых образует на поверхности кожи защитную плёнку. Чуть ниже сальной железы к фолликулу прикреплена мышца, поднимающая волос, состоящая из гладкой мускулатуры. Корневое влагалище состоит из трёх слоев: внешнего, среднего и кутикулы. Клетки внутреннего корневого влагалища ороговевают и участвуют в образовании и росте волоса. Воронкообразное углубление кожи в месте, где корень волоса переходит в стержень, называется волосяной воронкой [5,6]. Окруженные густой сетью капилляров, волосяные фолликулы являются интересными целевыми структурами. Они также содержат стволовые клетки, которые играют важную роль в регенеративной медицине, и дендритные клетки, которые важны для иммуномодуляции.

В зависимости от размера частиц, трансфолликулярный транспорт может позволить выбирать целью различные структуры, такие как стволовые клетки, клетки иммунной системы или кровеносные сосуды, находящиеся в непосредственной близости от волосяных фолликулов [1]. В частности, в работе [7] было показано, что наночастицы размером от ~100 до ~900 нм в диаметре достаточно хорошо проникают в волосяные фолликулы, где они могут оставаться в течение нескольких дней, причём максимальной глубины (~1200 мкм) достигали частицы размером 643 нм. В работе [8] была проанализирована проницаемость фолликулов для микросфер различного диаметра, и было показано, что микросферы диаметром более 10 мкм не проникали ни в фолликулярные отверстия, ни в роговой слой, в то время как частицы диаметром 9 и 10 мкм наблюдались вокруг фолликулярного устья без дальнейшего проникновения. Микросферы диаметром 7 мкм часто наблюдались в глубине фолликулярного канала, но редко проникали в роговой слой, в то время как микросферы диаметром 5 мкм показали высокую концентрацию в фолликулярных протоках, но не проникали через роговой слой, а самые маленькие микросферы (менее 3 мкм) проникли в придатки кожи, наблюдались в поверхностных слоях рогового слоя, но никогда не наблюдались в живом эпидермисе.

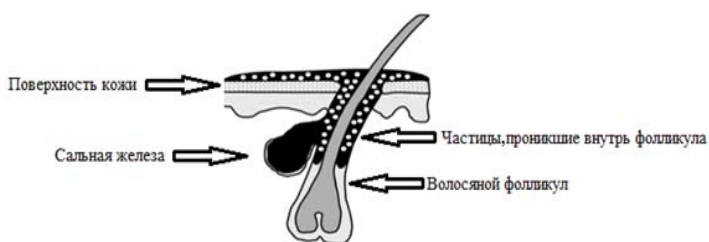


Рис. 1. Схематичное изображение фолликула с наночастицами, проникшими внутрь [2].

В настоящее время оптическая когерентная томография (ОКТ) является эффективным прижизненным методом неинвазивного исследования структуры кожи, приближающимся по информативности к методу традиционной биопсии [9]. В работе [10] было предложено использовать наночастицы диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) для повышения контраста ОКТ-изображений. Рассеяние излучения в биотканях обусловлено пространственным распределением показателя преломления и зависит от особенностей строения биоткани. Изменяя распределение показателя преломления внутри биоткани можно управлять ее оптическими характеристиками [11]. Показано, что проникая в ткань, частицы диоксида титана, обладающие более изотропным рассеянием по сравнению с рассеивающими элементами кожи, повышают обратное рассеяние зондирующего излучения. Увеличение обратного рассеяния от структурных элементов, содержащих более высокую, по сравнению с окружающими тканями, концентрацию наночастиц приводит к повышению контраста на ОКТ-изображениях объекта исследований [10, 12].

Целью данной работы является исследование глубины и скорости проникновения частиц  $\text{TiO}_2$  разного размера в кожу и волосяные фолликулы с помощью ОКТ.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве исследуемых частиц использовались частицы диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) (Sigma-Aldrich, США) трех видов, диаметром: 25 нм, 100 нм и 5 мкм. Для лучшей доставки частиц внутрь

волосяного фолликула были приготовлены суспензии этих частиц, на основе полиэтиленгликоля с молекулярным весом 300 Да (ПЭГ-300) (Sigma-Aldrich, США). Концентрация частиц диоксида титана в суспензии - 0.5 г/мл.

Для исследования глубины проникновения каждого типа частиц в качестве экспериментальных объектов использовались 3 белых лабораторных крысы *ex vivo*. На спине каждой крысы выделялись три области для внедрения суспензий частиц разного диаметра. Предварительно с поверхности тела крыс с помощью крема-депилятора «Veet» (Reckitt Benckiser, Франция) тщательно удалялся волосяной покров. Подготовленные суспензии наносились на участки кожи крысы и подвергались воздействию ультразвука (УЗ) частотой 1 МГц, мощностью 1 Вт с постоянной цикличностью в течении 1 минуты с помощью терапевтического УЗ устройства Dinatron 125 (Dinatronics, США). Затем проводилось ОКТ-сканирование обрабатываемого участка, и процедура повторялась. Общая продолжительность УЗ обработки составляла 8 минут.

Для визуализации кожи использовался спектральный оптический когерентный томограф Thorlabs OCP930SR. Параметры сканирования представлены в таблице 1:

Таблица 1- Параметры ОКТ-сканирования

Центральная длина волны излучения	930 нм
Ширина спектра излучения	100 нм
Область сканирования	2 мм
Продольное разрешение	6.2 мкм
Поперечное разрешение	9.6 мкм

Полученные ОКТ-изображения были обработаны с помощью специально разработанной программы, которая позволяет выделять участок на В-скане для усреднения нескольких А-сканов и получения распределения интенсивности ОКТ-сигнала по глубине биоткани. На рисунке 2 представлены примеры ОКТ-изображения кожи с выделенной областью, на которой видно изображение фолликула, и график зависимости интенсивности усреднённого ОКТ-сигнала от глубины кожи в этой области. С помощью данной зависимости определялась разность координат двух пиков на графике: соответствующего поверхности рогового слоя кожи и соответствующего сигналу от частиц, проникших внутрь волосяного фолликула. Эта разность определяла глубину проникновения частиц.

После завершения экспериментов соответствующие образцы кожи вырезались для последующего гистологического исследования. Гистологические срезы готовились по стандартной методике и окрашивались гематоксилином и эозином.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Томограмма кожи в начальный момент времени изображена на рисунке 2(а), томограмма кожи через 8 минут эксперимента (внедрение частиц диаметром 100 нм) изображена на рисунке 2(б). При сравнении рисунков 2(а) и 2(б) отчетливо заметно повышение контраста изображения волосяного фолликула с проникшими внутрь него частицами. На основе полученных данных были вычислены среднее значение глубины проникновения частиц и среднеквадратичное отклонение (таблица 2). Для сравнения средних значений глубины проникновения частиц в фолликулы кожи крысы за разные промежутки времени была построена гистограмма (рисунок 3). Как показывает гистограмма, в нулевой момент времени исследуемые частицы находятся на некоторой глубине. Это обусловлено механическим воздействием при нанесении суспензии частиц и её проникновением в устья фолликулов. Результаты, представленные на гистограмме, позволяют судить о проникающей способности каждого типа частиц. Наибольшую глубину проникновения на каждом этапе измерений показали частицы диаметром 25 нм. Их преимущество перед двумя другими типами частиц в их сравнительно малом диаметре, что позволяет им легко проникать вдоль волосяного фолликула по сальному секрету. Максимальная глубина проникновения данных частиц составила  $197 \pm 47$  мкм в течение 5 мин, что позволяет оценить среднюю скорость движения частиц вдоль фолликула как 39.4 мкм/мин. Аналогично можно оценить средние скорости движения частиц с диаметрами 100 нм и 5 мкм как соответственно 25.5 мкм/мин и 20.0 мкм/мин. Частицы диаметром 100 нм и 5 мкм хоть и



значительно различаются в диаметре, но показали приблизительно похожие результаты. Это обусловлено тем, что частицы при обработке исследуемой области ультразвуком создали «эффект наждачной бумаги», который заключается в разрушении рогового слоя эпидермиса и частичном разрушении блестящего слоя, что позволило частицам такого крупного диаметра проникнуть на глубину, сравнимую с глубиной проникновения частиц меньшего размера. Большой разброс значений глубины проникновения частиц связан с тем, что в различные моменты времени регистрировались ОСТ-изображения различных участков в пределах некоторой площади воздействия, поэтому измерения проводились для разных фолликулов, находящихся в различных стадиях развития.

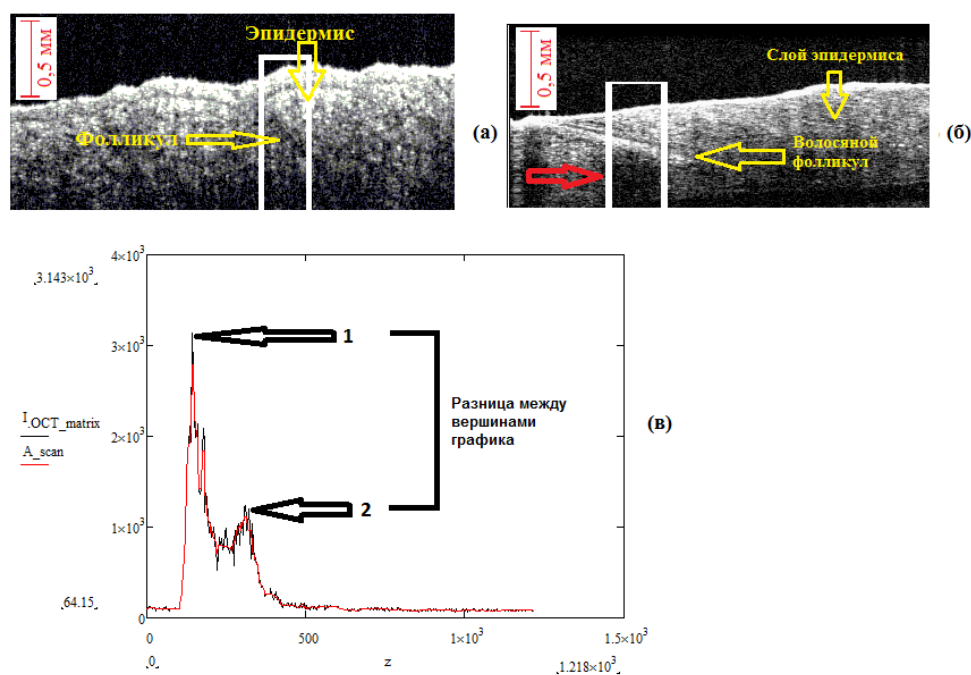


Рис. 2. Изображения кожи (а) с волосным фолликулом без частиц, (б) с заполненным частицами фолликулом, полученные с помощью ОКТ (прямоугольником и красной стрелкой обозначена граница исследуемой области), (в) график зависимости интенсивности ОКТ-сигнала от глубины кожи ( $z$ , мкм) в исследуемой области: 1 – пик, соответствующий поверхности рогового слоя кожи, 2 – пик, соответствующий локализации частиц внутри волосного фолликула.

Таблица 2. Средние значения глубины проникновения частиц  $TiO_2$  в кожу и их среднеквадратичные отклонения при различном времени воздействия низкочастотного ультразвука.

Время (мин)	Диаметр частиц					
	25 нм		100 нм		5 мкм	
	среднее значение глубины (мкм)	среднеквадратичное отклонение (мкм)	среднее значение глубины (мкм)	среднеквадратичное отклонение (мкм)	среднее значение глубины (мкм)	среднеквадратичное отклонение (мкм)
0	62	30	48	9	58	28
1	62	28	57	28	85	34
2	99	21	62	14	80	69
3	144	95	103	38	86	45
4	171	49	90	45	87	29
5	197	47	115	83	116	64
6	152	51	153	107	131	63
7	186	60	106	71	155	63
8	194	62	154	80	160	51

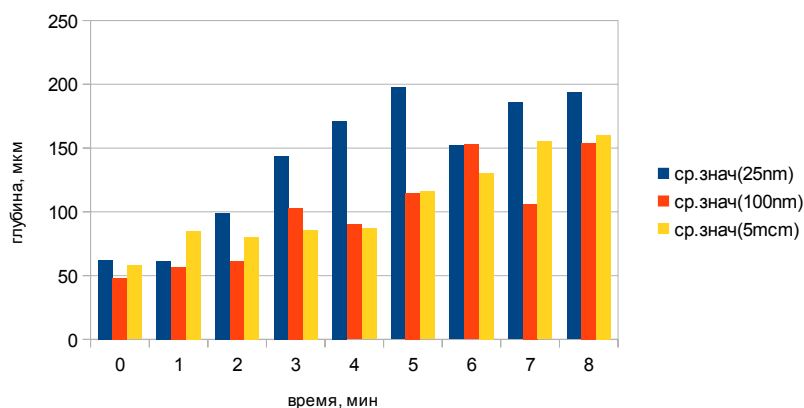


Рис. 3. Временная зависимость глубины проникновения частиц  $TiO_2$  различного диаметра в кожу крысы *ex vivo* под действием низкочастотного ультразвука

На рисунке 4 (гистологический срез кожи) показано проявление «эффекта наждачной бумаги», которое заключается в разрушении рогового слоя микрочастицами диаметром 5 мкм. Однако хорошо видно, что данные частицы не проникают в живой эпидермис и дерму кожи. Аналогичный результат наблюдался и для частиц диаметром 100 нм.

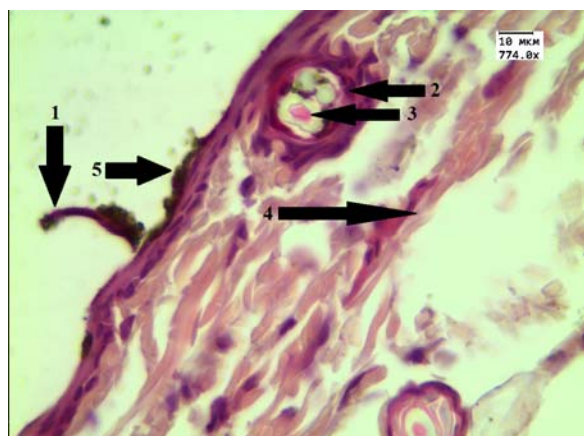


Рис. 4. 5 мкм частицы, проникшие внутрь фолликула и разрушенный роговой слой кожи: 1) участок роговой слой эпидермиса; 2) волосяной фолликул с микрочастицами; 3) старый волос и два формирующихся молодых волоса; 4) дерма; 5) микрочастицы

На рисунке 5 (гистологический срез кожи) показаны частицы диаметром 25 нм, проникнувшие глубоко в слои эпидермиса. На рисунке 5, соответствующем 8 минуте измерений, отчетливо видно, что частицы диаметром 25 нм проникли на глубину примерно 150 – 200 мкм и, попав в волосяные фолликулы, образовали агрегаты. Некоторая часть частиц, преодолев роговой слой, находилась в живом эпидермисе и дермальных слоях. На большей глубине также видны частицы, но они попали туда из-за механического переноса при проведении гистологического исследования.

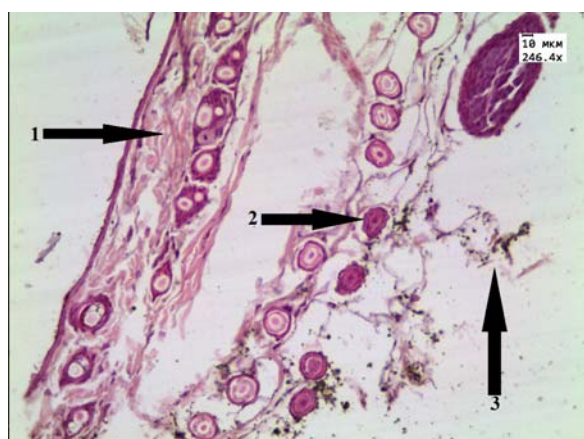


Рис. 5. 25 нм частицы, проникшие внутрь фолликула: 1) эпидермис; 2) волосяной фолликул с микрочастицами; 3) частицы диоксида титана, собравшиеся в агрегаты

В работе [7] А. Patzelt и соавторы сравнивали глубины проникновения наночастиц различного диаметра в диапазоне от 122 нм до 860 нм. Согласно данной работе частицы диаметром 122 нм проникали на глубину около 450 мкм. Эти частицы по диаметру сравнимы с используемыми в нашей работе 100-нм частицами, которые показали глубину проникновения 150 мкм. Отличия в результатах обусловлены различными объектами исследования (в работе [7] использовались образцы свиной кожи, которые имеют больший диаметр фолликулов, чем кожа крысы) и способами визуализации экспериментальных данных (в работе [7] оценка проводилась по гистологическим срезам). В работе [8] микросферы диаметром 5 мкм показали высокую концентрацию в фолликулярных протоках, но не проникали через роговой слой в живой эпидермис. Таким образом, результаты, полученные в настоящей работе, в целом соответствуют литературным данным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований было экспериментально установлено, что наибольшая средняя глубина проникновения была достигнута частицами диаметром 25 нм (увеличилась с 62 мкм до 194 мкм), при этом частицы обнаруживались не только в фолликулах, но и в живом эпидермисе. Частицы с диаметром 100 нм показали меньшую глубину проникновения (глубина увеличилась с 48 мкм до 154 мкм), что сравнимо с глубиной проникновения 5-мкм частиц (глубина увеличилась с 58 мкм до 160 мкм). Для обоих типов частиц пути проникновения ограничивались каналами волосяных фолликулов. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что частицы меньшего диаметра легче проникают через роговой слой и другие слои эпидермиса и проникают глубже внутрь волосяного фолликула, а частицы сравнительно больших размеров (>100 нм) проникают по волосяным фолликулам на глубину не более 150-160 мкм.

### Литература

1. Cevc G., Vierl U. // Journal of Controlled Release. 2010, Vol. 141, p. 277-299.
2. Lademann J., Knorr F., Richter H., et al. // Journal of Innovative Optical Health Sciences. 2015, Vol. 8, p. 1-7.
3. Mak W. C., Patzelt A., Richter H., et al. // Journal of Controlled Release. 2012, Vol. 160(3), p. 509–514.
4. Mahe B., Vogt A., Liard C., et al. // J. Invest. Dermatol. 2009, Vol. 129(5), p. 1156–1164.
5. Самусев Р. П., Липченко В. Я. Атлас анатомии человека / Москва: Оникс 21 век: Мир и образование, 2002.
6. Генина Э.А. Исследование оптической иммерсии и окрашивания биологических тканей *in vivo* для целей оптической диагностики и лазерной терапии : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Саратов: Сарат. гос. ун-т, 2002, С.29-37.
7. Patzelt A., Richter H., Knorr F., et al. // Journal of Controlled Release. 2011, Vol. 150(1), p. 45–48.
8. Toll R., Jacobi U., Richter H., et al. // J. Invest. Dermatol. 2004, Vol. 123(1), p. 168–176.
9. Гладкова Н. Д., Шахова Н. М. Руководство по оптической когерентной томографии / Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
10. Kirillin M., Shirmanova M., Sirotkina M., et al. // Journal of Biomedical Optics. 2009, Vol. 14(2), p. 021017.
11. Тучин В. В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
12. Genina E. A., Bashkatov A. N., Dolotov L. E., et al. // Journal of Biomedical Optics. 2013, Vol. 18(11), p. 111406.

## ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ ТКАНЕЙ КОЖИ *EX VIVO* ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ-200

Генин В.Д., Тучина Д.К., Башкатов А.Н., Генина Э.А., Тучин В.В.

ФГБОУ ВПО Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

В работе экспериментально исследовано изменение оптических и структурных (веса, толщины и площади) параметров кожи под действием полиэтиленгликоля с молекулярным весом 200 дальтон (ПЭГ-200). В качестве объекта исследования использовались *ex vivo* образцы кожи белых лабораторных крыс. Измерение коллимированного пропускания было выполнено в диапазоне длин волн 500-900 нм. Результатом воздействия является увеличение коэффициента коллимированного пропускания, а также уменьшение веса, толщины и площади образцов кожи. Анализ кинетики изменения измеренных параметров позволил оценить коэффициент диффузии ПЭГ-200 в коже:  $(9.85 \pm 9.33) \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с. Полученные результаты могут быть использованы для развития существующих и разработки новых методов неинвазивной диагностики и терапии подкожных заболеваний.

## ВВЕДЕНИЕ

Относительно низкая себестоимость оптических методов диагностики и терапии различных заболеваний, а также их безопасность для здоровья пациентов привели к тому, что эти методы сегодня активно используются в медицине [1-3]. В тоже время одной из основных задач современной лазерной медицины остается доставка зондирующего излучения сквозь поверхность биотканей на необходимую глубину. Сложность решения данной задачи связана с тем, что пространственное разрешение и глубина зондирования излучением в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах сильно ограничены рассеивающей способностью биотканей [4]. Одним из способов решения данной проблемы может быть снижение светорассеяния за счет замещения внутритканевой жидкости иммерсионным агентом, т.е. использование так называемой техники "оптического просветления" биотканей [5-7].

Как известно, одной из основных причин рассеяния оптического излучения в биотканях является различие показателей преломления структурных компонентов биотканей и внутритканевой среды или внутриклеточных органелл и клеточной цитоплазмы [4]. Метод «оптического просветления» биотканей заключается в выравнивании показателей преломления путем частичного замещения внутритканевой жидкости оптическим просветляющим агентом (ОПА) - биосовместимым иммерсионным веществом [4-7]. В настоящее время считается, что снижение светорассеяния биотканей под влиянием ОПА связано с тремя процессами: осмотической дегидратацией биоткани, заменой агентом внутритканевой жидкости и структурной модификацией или диссоциацией коллагена биоткани [8-11].

Два первых процесса обычно проявляются одновременно. Степень вклада каждого из них в эффект просветления определяется типом ОПА и свойствами биоткани. Влияние третьего процесса становится заметным только при длительном воздействии ОПА на биоткань [8-11].

Благодаря своей эффективности, доступности и биосовместимости, полиэтиленгликоль может быть успешно применен в качестве ОПА [12-17]. Полиэтиленгликоль (сокращенно - ПЭГ, химическая формула:  $C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$ ) - полимер этиленгликоля ( $C_2H_6O_2$ ), принадлежащего к классу двухатомных спиртов. В зависимости от молекулярного веса полиэтиленгликоль может быть вязкой жидкостью, гелеобразным или твердым веществом. ПЭГ-200 - это прозрачная вязкая бесцветная жидкость с молекулярным весом 200 дальтон, обладающая сильными гигроскопическими свойствами [18, 19]. Полиэтиленгликоль активно применяется в медицине и косметологии как основа для мазей, зарегистрирован в качестве пищевой добавки E1521, используется как растворитель, экстрагент, консервант, а также сильный осмотик [18].

Знание коэффициентов диффузии и процессов, протекающих при взаимодействии ОПА с биотканями, необходимо для разработки новых и оптимизации уже существующих методов оптического просветления биотканей. Однако, несмотря на достаточно широкое применение ПЭГ как в косметологии, так и в качестве просветляющего агента, анализ доступной нам литературы показывает, что диффузия ПЭГ-200 в тканях кожи исследована недостаточно [14, 20-24].

Целью работы является исследование временной зависимости изменения оптических, весовых и геометрических параметров кожи крысы *ex vivo* при воздействии на нее ПЭГ-200, и измерение коэффициента диффузии ПЭГ-200 в коже.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования кинетики изменения каждого из параметров в качестве экспериментальных объектов использовалось по 10 образцов кожи белых лабораторных крыс *ex vivo*. Предварительно с поверхности тела крыс с помощью крема-депилятора «Veet» (Reckitt Benckiser, Франция) тщательно удалялся шерстяной покров. При помощи хирургических ножниц вырезались участки кожи размером приблизительно  $10 \times 15$  мм<sup>2</sup>. Подкожный жировой слой, являющийся препятствием для проникновения гидрофильных веществ в дерму, тщательно удалялся.

Весовые измерения проводились на электронных весах (SCIENTECH, SA210, USA) с точностью  $\pm 1$  мг.

Толщина образцов измерялась микрометром с точностью  $\pm 5$  мкм: каждый образец помещался между двумя предметными стеклами, после чего толщина измерялась в пяти точках; результаты усреднялись.

Для вычисления площади образца его помещали на тест-объект с масштабной линейкой и фотографировали с помощью цифровой камеры. С помощью масштабной линейки вычислялся коэффициент перехода от линейных размеров в пикселях к линейным размерам в миллиметрах и определялся размер всего изображения. Из полноцветного изображения (рис. 1(а)) выделялась синяя компонента как наиболее контрастная (рис. 1(б)), которая для устранения шумов и бликов обрабатывалась медианным фильтром (рис. 1(в)). Поскольку яркость пикселей фона (при анализе синей компоненты изображения) выше, чем яркость пикселей образца кожи, то всем пикселям с определенной пороговой яркостью (в нашем случае лежащей в диапазоне 190-200 ед.) присваивалось значение 255 (рис. 1(г)). Число пикселей, занимаемых образцом (со значениями, отличными от 255), подсчитывалось и переводилось в квадратные миллиметры с помощью уравнения:

$$S = \frac{F(H_s)}{\text{cols}(H_s) \cdot \text{rows}(H_s)} \cdot \frac{\text{rows}(H) \cdot z^2}{\text{cols}(H)},$$

где  $F$  – число пикселей занимаемых образцом,  $\text{cols}$  – количество колонок,  $\text{rows}$  – количество строк,  $H_s$  – изображение образца на белом фоне,  $H$  – исходное изображение,  $z$  – ширина изображения.

Для измерения кинетики изменения толщины, площади и веса образцы кожи помещались в чашку Петри с ОПА. Измерения каждого параметра проводились до помещения образцов в ОПА, а затем каждые 5-10 мин после помещения их в ОПА в течение 1-2 часов иммерсирования.

В качестве ОПА использовались полиэтиленгликоль-200 (ПЭГ-200, молекулярный вес 200 дальтон) (ООО "Завод синтанолов", г. Дзержинск, Россия). Показатели преломления ПЭГ-200, измеренные с помощью рефрактометра Аббе DR-M2/1550 (АТАГО, Япония) в диапазоне длин волн 480-1550 нм, представлены в таблице 1.

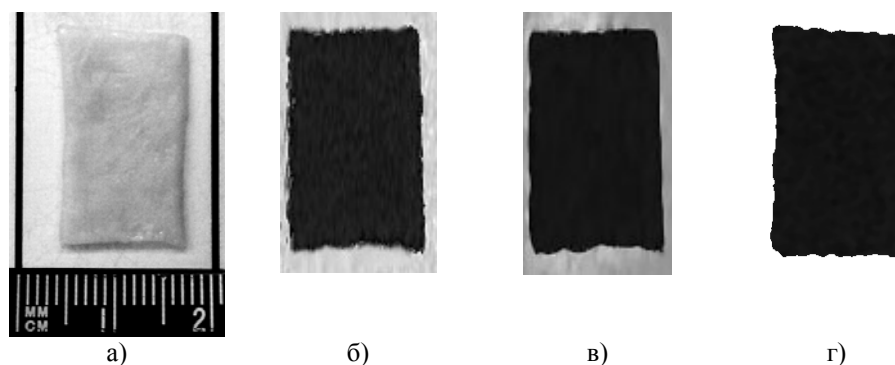


Рис. 1. Изображение образца биоткани на тест-объекте (а), синяя компонента изображения образца кожи (б), изображение после обработки медианным фильтром (в), результат цифровой обработки изображения (г)

Таблица 1. Показатели преломления ПЭГ-200 в диапазоне длин волн 480-1550 нм

Длина волны, нм	Показатель преломления
480	1.4651
486	1.4646
546	1.4607
589	1.4586
644	1.4569
656	1.4565
680	1.4555
930	1.4512
1100	1.4491
1300	1.4443
1550	1.4405

Для измерения коллимированного пропускания использовалась установка, состоящая из источника излучения – галогенной лампы HL-2000 (Ocean Optics, США), волоконно-оптических кабелей QP400-1-VIS-NIR (Ocean Optics, США), подводящих излучение к образцу биоткани и собирающих излучение, прошедшее через образец, кюветы с образцом, спектрометра USB4000-Vis-NIR (Ocean Optics, USA) и компьютера. Схема установки представлена на рисунке 2. Для измерения коллимированного пропускания образцы биоткани закреплялись на пластиковом держателе размером 38×17 мм<sup>2</sup> с отверстием 8×8 мм<sup>2</sup> и помещались в стеклянную кювету объемом 5 мл между двумя волоконно-оптическими кабелями с внутренним диаметром 400 мкм. Одно волокно служило для доставки излучения к образцу, а другое – для сбора прямо прошедшего излучения. Для обеспечения коллимированности пучка на торцах волокон с помощью стандартных разъемов SMA-905 закреплялись коллиматоры 74-ACR (Ocean Optics, США).

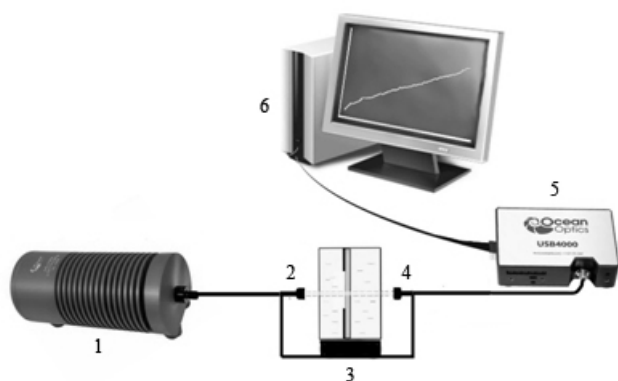


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения коллимированного пропускания образца кожи.

1 - источник света HL-2000; 2, 4 - оптическое волокно с коллиматором QP400-1-VIS-NIR; 3 - кювета с зафиксированным в держателе образцом; 5 - спектрометр USB-4000-Vis-NIR; 6 - персональный компьютер

Кинетика изменения коллимированного пропускания регистрировалась путем последовательной записи спектров коллимированного пропускания в диапазоне 500-900 нм каждые 3-5 минут в течение 1-2 часов. Перед началом измерений регистрировался сигнал сравнения от кюветы, заполненной ОПА, с держателем без образца кожи. Все измерения проводились при комнатной температуре (~ 20°C).

При исследовании взаимодействия ПЭГ-200 с образцами кожи предполагалось, что в результате этого взаимодействия изменяется только показатель преломления внутритканевой жидкости образца, вследствие диффузии в биоткань иммерсионной жидкости и осмотического оттока воды из биоткани. При диффузии внутрь биоткани вещества с показателем преломления большим, чем у внутритканевой жидкости, и оттока воды из биоткани происходит согласование показателей преломления рассеивателей и внутритканевой жидкости, что приводит к уменьшению коэффициента рассеяния биоткани. Исследование кинетики данного процесса позволяет оценить коэффициент диффузии как меру средней скорости обменного потока осмотической жидкости в биоткань и воды из биоткани.

Метод оценки коэффициентов диффузии иммерсионных жидкостей в биоткани основан на анализе кинетики изменения коллимированного пропускания образцов биоткани, помещенных в ОПА, которое меняется в результате осмотического действия ОПА и его диффузии в биологическую ткань [25, 26]. Коэффициент диффузии в данном случае представляет собой среднюю скорость обменного потока ОПА в биоткань и воды из биоткани.

Процесс транспорта иммерсионных жидкостей в фиброзных тканях может быть описан в рамках модели свободной диффузии. Геометрически образец биоткани представляется в виде плоскопараллельной пластины конечной толщины  $l$ , см, состоящей из рассеивающих диэлектрических цилиндров (коллагеновых и эластиновых волокон). Одномерное уравнение диффузии имеет вид [25, 26]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $C(x,t)$  – концентрация ПА в коже, г/мл;  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/сек;  $t$  – время диффузии, сек; и  $x$  – пространственная координата по толщине образца кожи, см.

Поскольку объем ПА (~5000 мм<sup>3</sup>) в кювете значительно превышает объем образца кожи (~100-150 мм<sup>3</sup>), то можно считать, что проникновение ПЭГ в образец кожи не приводит к изменению концентрации ОПА в кювете. Проникновение ОПА в кожу происходит преимущественно со стороны дермы, что объясняется защитными свойствами эпидермиса, препятствующего проникновению молекул ОПА в кожу. Для односторонней диффузии граничные условия имеют вид:

$$C(0,t) = C_0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial C(l,t)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $C_0$  – концентрация ПЭГ в кювете, г/мл. Второе граничное условие отражает тот факт, что диффузия иммерсионной жидкости внутрь образца кожи происходит только с одной стороны образца, т.е. со стороны дермы.

Начальные условия отражают отсутствие ОПА во всех внутренних точках образца биоткани до его помещения в раствор:

$$C(x,0) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) учетом граничных (2) и начальных (3) условий имеет вид:

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{4}{\pi(2i+1)} \sin\left(\frac{(2i+1)\pi x}{2l}\right) \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 D \pi^2 t}{4l^2}\right) \right).$$

Средняя концентрация ОПА в образце кожи  $C(t)$  в каждый момент времени определяется выражением:

$$C(t) = C_0 \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left(-\frac{(2i+1)^2 t \pi^2 D}{4l^2}\right) \right). \quad (4)$$

В первом приближении уравнение (4) может быть представлено в виде:

$$C(t) \approx C_0 (1 - \exp(-t/\tau_D)), \quad (5)$$

где

$$\tau_D = \frac{4l^2}{\pi^2 D}, \quad (6)$$

$\tau_D$  – характеристическое время диффузии, сек.

По мере проникновения иммерсионной жидкости в кожу происходит увеличение показателя преломления  $n_1(t)$  внутритканевой жидкости. Оценка величины показателя преломления внутритканевой жидкости в зависимости от времени может быть выполнена на основе закона Гладстона-Дала [27], в случае двухкомпонентных растворов имеющего вид:

$$n_1(\lambda, t) = n_{10}(\lambda) \cdot (1 - C(t)) + n_{PEG}(\lambda) \cdot C(t), \quad (7)$$

где  $\lambda$  – длина волны, нм;  $n_{10}(\lambda)$  – показатель преломления внутритканевой жидкости кожи в начальный момент времени, зависящий от длины волны [24]:

$$n_{10}(\lambda) = 1.351 + \frac{2134.2}{\lambda^2} + \frac{5.79 \times 10^8}{\lambda^4} - \frac{8.15 \times 10^{13}}{\lambda^6}, \quad (8)$$

$n_{PEG}(\lambda)$  – спектральная зависимость показателя преломления ПЭГ.

Так как толщина дермы является доминирующей по отношению к толщине других слоев кожи, то оптические характеристики кожи определяются в основном оптическими свойствами дермы. Спектральная зависимость показателя преломления коллагеновых волокон имеет вид [28]:

$$n_s(\lambda) = 1.439 + \frac{15880.4}{\lambda^2} - \frac{1.48 \times 10^9}{\lambda^4} + \frac{4.39 \times 10^{13}}{\lambda^6}. \quad (9)$$

Для количественной оценки изменения коэффициента рассеяния кожи использовалось уравнение [25, 26, 29]:

$$\mu_s(\lambda, t) = \frac{\varphi_s(t)}{\pi a^2} \cdot \sigma_s(\lambda, t) \cdot \frac{(1 - \varphi_s(t))^3}{1 + \varphi_s(t)}, \quad (10)$$

где  $\varphi_s(t)$  – объемная доля рассеивателей, зависящая от времени;  $a$  – радиус рассеивателей;  $\sigma_s(\lambda, t)$  – поперечное сечение рассеяния, зависящее от времени [30]:

$$\sigma_s(\lambda, t) = \frac{\pi^2 a \cdot x^3(\lambda, t)}{8} (m^2(\lambda, t) - 1)^2 \left( 1 + \frac{2}{(m^2(\lambda, t) + 1)^2} \right), \quad (11)$$

где  $m(\lambda, t) = n_s(\lambda) / n_1(\lambda, t)$  – относительный показатель преломления рассеивающих частиц, определяемый с использованием уравнений (7) и (9);  $x(\lambda, t) = 2\pi a n_1(\lambda, t) / \lambda$  – относительный размер рассеивателей.

Значение объемной доли рассеивателей  $\varphi_{s0}$  в начальный момент времени было получено из начального веса и объема исследуемых образцов с использованием соотношения:

$$\begin{cases} W_s + W_{ICF} = W_0 \\ V_s + V_{ICF} = V_0 \end{cases} = \begin{cases} V_s \rho_s + V_{ICF} \rho_{ICF} = W_0 \\ V_s + V_{ICF} = V_0 \end{cases}, \quad (12)$$

где  $W_s$  – вес рассеивателей кожи,  $W_{ICF}$  – вес внутритканевой жидкости кожи,  $V_s$  – объем занимаемый рассеивателями кожи,  $V_{ICF}$  – объем занимаемый внутритканевой жидкостью кожи,  $W_0$  и  $V_0$  – вес и объем образца, измеренные при  $t = 0$ ,  $\rho_s = 1.41$  [31, 32] и  $\rho_{ICF} \approx 1$  – плотность рассеивателей и внутритканевой жидкости кожи. Из уравнения (12) следует, что  $V_s = V_0 - \frac{V_0 \rho_s - W_0}{\rho_s - \rho_{ICF}}$  и  $\varphi_{s0} = V_s / V_0$ .

Измеренные значения  $\varphi_{s0}$  лежат в пределах от 0.2 до 0.25.

Изменение толщины  $l(t)$  и площади  $S(t)$  образцов кожи было использовано для учета изменения, в процессе просветления, объемной доли рассеивателей  $\varphi_s(t)$ :  $\varphi_s(t) = \varphi_{s0} V_0 / V(t)$ , где  $V_0 = S_0 \cdot l_0$  и  $V(t) = S(t) \cdot l(t)$ .

Оценка эффективных размеров рассеивателей кожи выполнялась на основе измерений коллимированного пропускания  $T(t = 0)$  в начальный момент времени. Поскольку

$$\mu_{s0} = -\frac{\ln(T(t = 0))}{l_0} - \mu_{a0}, \quad (13)$$

где  $\mu_{a0}$  – коэффициент поглощения нативной кожи [33],  $\mu_{s0}$  – коэффициент рассеяния в начальный момент времени,  $l_0$  – начальная толщина образца, то средний диаметр коллагеновых волокон оценивался из начального значения коэффициента рассеяния с помощью уравнений (10) и (11). Средний диаметр  $2a$  для разных образцов составлял 80-150 нм, что хорошо согласуется со значениями диаметра коллагеновых волокон кожи человека (40-150 нм), полученных с помощью электронной микроскопии [34]. При проведении вычислений предполагалось, что под действием ПЭГ за время проведения измерений диаметр рассеивателей кожи не изменяется.

Для анализа кинетики изменения веса  $W(t)$ , толщины  $l(t)$ , площади  $S(t)$  и объема  $V(t)$  образцов кожи использовалось следующее уравнение:

$$\frac{A(t)}{A(t = 0)} = B \times \exp(-t/\tau) + B_0, \quad (14)$$

где  $A(t = 0)$  – измеренное в начальный момент времени значение толщины, площади или веса образца (объем определялся как произведение площади на толщину),  $\tau$  – характеристическое время дегидратации,  $B$  – коэффициент, характеризующий степень дегидратации, и  $B_0$  – характеризует остаточное значение веса, площади, толщины или объема образца после дегидратации.

Изменение коэффициента поглощения  $\mu_a(t)$  учитывалось с помощью уравнения:



$$\mu_a(t) = \varphi_s(t) \cdot \sigma_{a0} / \pi a^2, \quad (15)$$

где  $\sigma_{a0}$  – поперечное сечение поглощения, которое определялось из значений  $\mu_{a0}$  и  $\varphi_{S0}$ .

Зависимость от времени коэффициента коллимированного пропускания образца кожи, помещенного в ОПА, имеет вид:

$$T_c(t) = \exp[-(\mu_a(t) + \mu_s(t))l(t)]. \quad (16)$$

Уравнения (1)-(16) формируют прямую задачу, т.е. определяют зависимость коэффициента коллимированного пропускания от концентрации раствора ОПА внутри образца кожи. Обратная задача заключается в восстановлении значения коэффициента диффузии по временной зависимости коллимированного пропускания. Решение задачи требует минимизации целевого функционала:

$$f(D) = \sum_{i=1}^{N_t} (T_c(D, t_i) - T_c^*(t_i))^2,$$

где  $N_t$  – общее количество экспериментальных точек, полученное при регистрации временной зависимости коллимированного пропускания на фиксированной длине волны;  $T_c(D, t)$  – значение коэффициента пропускания, рассчитанное с помощью уравнения (16) в момент времени  $t$  при заданном значении  $D$ ;  $T_c^*(t)$  – экспериментально измеренное значение коэффициента пропускания в момент времени  $t$ . Минимизация выполнялась с помощью симплекс-метода, подробно описанного в работе [35].

Отметим, что в уравнении (16) коэффициенты поглощения и рассеяния принимаются пространственно однородными для каждого момента времени. Это допущение справедливо, поскольку в ходе измерений коэффициент ослабления автоматически усредняется вдоль коллимированного пучка света, пересекающего образец. Таким образом, измеренная кинетика описывает поведение пространственно усредненного коэффициента ослабления с преобладанием в нем коэффициента рассеяния ( $\mu_a \ll \mu_s$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов была измерена кинетика изменения коллимированного пропускания кожи под действием ПЭГ-200 в диапазоне 500-900 нм, а также кинетика изменения веса, толщины и площади каждого из образцов.

На рисунке 3 представлены типичные спектры и кинетика изменения коллимированного пропускания образца кожи в течение 90 минут. На рисунке 4 показаны усредненные по 10 исследуемым образцам и нормированные временные зависимости веса, площади и толщины образцов под действием ПЭГ-200. Из рисунка 3 видно, что в начальный момент времени кожа представляет собой практически непрозрачную среду для видимого и ближнего ИК излучений. По мере проникновения ОПА во внутритканевую жидкость наблюдается уменьшение рассеяния и, соответственно, увеличение коллимированного пропускания. Видно, что оптическое просветление образцов кожи происходит во всем видимом диапазоне длин волн с преобладанием в красной области спектра.

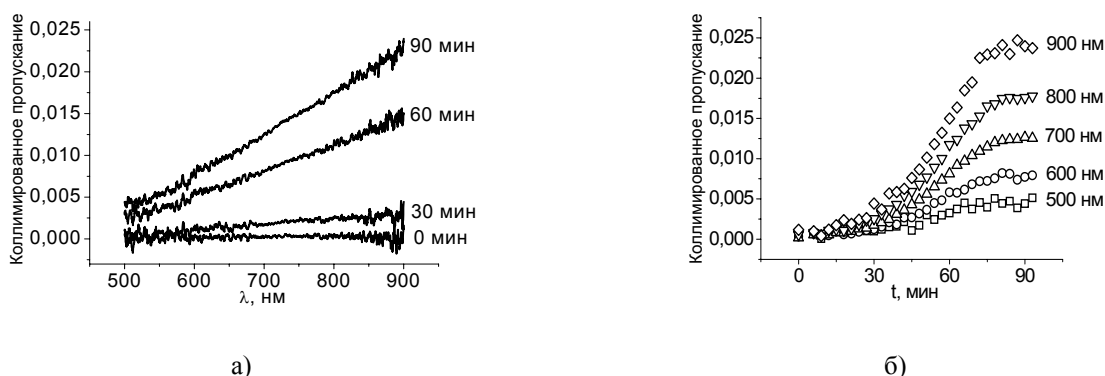


Рис. 3. Типичные спектры, измеренные в различные моменты времени (а), и типичная кинетика изменения

коэффициента коллимированного пропускания, измеренная на нескольких длинах волн (б), кожи крысы *ex vivo* под действием ПЭГ-200

На рисунке 3(б) хорошо видно, что в течение первых 70-80 минут наблюдается рост коллимированного пропускания. При этом можно предположить, что диффузия ОПА в биоткань и воды из межтканевого пространства в окружающий раствор по градиенту концентрации происходит одновременно и оба этих процесса вносят свой вклад в увеличение коэффициента коллимированного пропускания в течение начального периода просветления. С процессом дегидратации связано также уменьшение веса, площади и толщины образцов кожи в данный период наблюдения (см. рис. 4).

Из рисунка 4 следует, что под действием ПЭГ-200 вес образцов за время эксперимента уменьшился в среднем на 35%, толщина – на 20%, и площадь – на 25%.

Результаты анализа кинетики дегидратации с использованием уравнения (14) представлены в таблице 2. Из таблицы хорошо видно, что значения максимальной степени дегидратации, полученные из измерений толщины и площади образцов, практически совпадают, что свидетельствует о том, что изменение структуры биотканей под действием ПЭГ-200 практически одинаково в продольном и поперечном сечениях образца, хотя и с различной скоростью.

Оценка коэффициента диффузии ПЭГ-200 в коже была выполнена на основе анализа кинетики изменения коллимированного пропускания кожи крысы *ex vivo* с использованием алгоритма, представленного в разделе «Материалы и методы». Значение коэффициента диффузии ПЭГ-200 в коже составило  $(9.85 \pm 9.33) \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ .

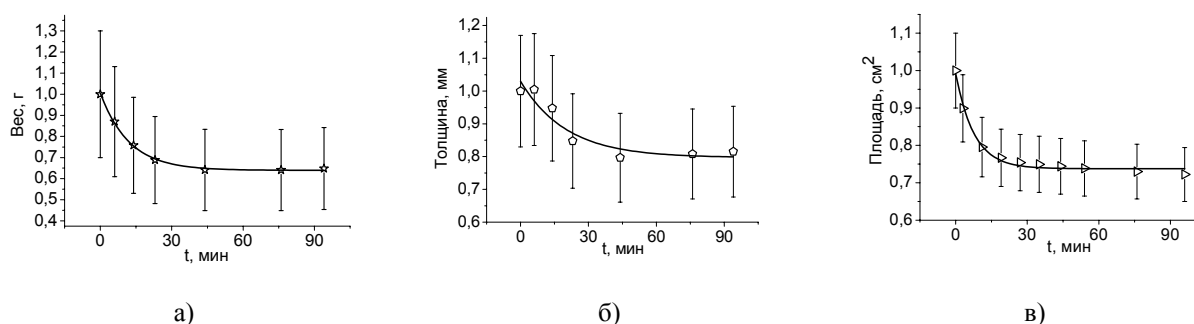


Рис. 4. Усредненные по 10 исследуемым образцам и нормированные временные зависимости веса (а), толщины (б) и площади (в) образцов кожи крысы *ex vivo* под действием ПЭГ-200

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают эффективность применения полиэтиленгликоля в качестве просветляющего агента для управления рассеивающими характеристиками кожи. В частности, наблюдается значительное увеличение коэффициента пропускания коллимированного излучения, прошедшего через кожу в спектральном диапазоне 500-900 нм, что способствует увеличению глубины проникновения оптического излучения в биоткань.

Измеренные значения коэффициентов диффузии ПЭГ-200 в коже крысы *ex vivo* составило  $(9.85 \pm 9.33) \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-15-00186.

Таблица 2. Параметры дегидратации кожи под действием ПЭГ-200

Параметр	Измеряемая величина		
	Вес	Толщина	Площадь
Максимальная степень дегидратации ( $B$ )	$0.37 \pm 0.29$	$0.23 \pm 0.17$	$0.25 \pm 0.09$
Постоянная скорости дегидратации ( $\tau$ ), мин	$12.10 \pm 19.61$	$20.25 \pm 37.08$	$7.71 \pm 6.67$
Остаточная величина после дегидратации ( $y_0$ )	$0.64 \pm 0.12$	$0.80 \pm 0.11$	$0.74 \pm 0.03$

## Литература

1. Зимняков Д.А., Тучин В.В. // Квант. Электр. 2002, Т. 32, № 10, с. 849-867.
2. Оптическая биомедицинская диагностика в 2 т. / под ред. В.В. Тучина - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
3. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
4. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012
5. Tuchin V.V. // Laser Physics. 2005, Vol. 15(8), p. 1109-1136.
6. Genina E.A., Bashkatov A.N., Tuchin V.V. // Expert Review of Medical Devices. 2010, Vol. 7(6), p. 825-842.
7. Zhu D., Larin K., Luo Q., Tuchin V.V. // Laser & Photonics Reviews. 2013, Vol. 7(5), p. 732-757.
8. Rylander C.G., Stumpp O.F., Milner T.E., et al. // J. Biomed. Opt. 2006, Vol. 11(4), p. 041117.
9. Yeh A.T., Hirshburg J. // J. Biomed. Opt. 2006, Vol. 11(1), p. 014003.
10. Wen X., Mao Z., Han Z., et al. // J. Biophotonics 2010, Vol. 3(1-2), p. 44-52.
11. Генина Э.А., Башкатов А.Н., Синичкин Ю.П. и др. // Оптика и спектроскопия 2010, Т. 109, № 2, с. 1312-1319.
12. Wang J., Ma N., Shi R., et al. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics 2014, Vol. 20(2), p.7101007.
13. Liu Y., Yang X., Zhu D., et al. // Optics Letters, 2013, Vol. 38(20), p. 4236-4239.
14. Mao Z., Zhu D., Hu Y., et al. // J. Biomed. Opt. 2008, Vol. 13(2), p. 021104.
15. Ding Y., Wang J., Fan Z., et al. // Biomedical Optics Express 2013, Vol. 4(11), p. 2518-2526.
16. Zhong H., Guo Z., Wei H., et al. // Photochemistry and Photobiology 2010, Vol. 86, p. 732-737.
17. Genina E.A., Bashkatov A.N., Kolesnikova E.A., et al. // J. Biomed. Opt. 2014. Vol. 19, № 2, p. 021109.
18. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полиэтиленгликоль>
19. Rowe R.C., Sheskey P.J., Quinn M.E. (Eds.) Handbook of pharmaceutical excipients / Pharmaceutical Press and American Pharmacists Association, 2009
20. Andanson J.M., Chan K.L.A., Kazarian S.G. // Appl. Spectroscopy 2009, Vol. 63(5), p. 512-517.
21. Gursahani H., Riggs-Sauthier J., Pfeiffer J., et al. // J. Pharmaceutical Sci. 2009, Vol. 98(8), p. 2847-2856.
22. Hamalainen K.M., Kontturi K., Auriola S., et al. // J. Controlled Release 1997, Vol. 49, p. 97-104.
23. Weng L., Liang S., Zhang L., et al. // Macromolecules 2005, Vol. 38(12), p. 5236-5242.
24. Bashkatov A.N., Genina E.A., Tuchin V.V. // Journal of Innovative Optical Health Sciences 2011, Vol. 4, № 1, p. 9-38.
25. Tuchin V.V. Optical Clearing of Tissues and Blood. PM 154, SPIE Press, Bellingham, WA, 2005, 254 p.
26. Bashkatov A.N., Genina E.A., Tuchin V.V. Measurement of glucose diffusion coefficients in human tissues / Chapter 19 in: Handbook of Optical Sensing of Glucose in Biological Fluids and Tissues, Valery V. Tuchin (editor), Taylor & Francis Group LLC, CRC Press, P. 587-621, 2009
27. Leonard D.W., Meek K.M. // Biophys. J. 1997, Vol. 72, № 3, p. 1382-1387.
28. Bashkatov A.N., Genina E.A., Sinichkin Yu.P., et al. // Biophysical J. 2003, Vol. 85, № 5, p. 3310-3318.
29. Schmitt J.M., Kumar G. // Appl. Opt. 1998, Vol. 37, № 13, p. 2788-2797.
30. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. John Willey & Sons Inc., New York, 1983, 530 p.
31. Huang Y., Meek K.M. // Biophysical J. 1999, Vol. 77, p. 1655-1665.
32. Fischer H., Polikarpov I., Craievich A.F. // Protein Science 2004, Vol. 13, p. 2825-2828.
33. Bashkatov A.N., Genina E.A., Korovina I.V., et al. // Proc. SPIE 2000, Vol. 4224, p. 300-311.
34. Linares H.A., Kischer C.W., Dobrkovsky M., et al. // J. Invest. Dermatol 1972, Vol. 59, № 4, p. 323-331.
35. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., et al. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1992, 994 p.

## ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рябухо П.В.<sup>1</sup>, Савонин С.А.<sup>1</sup>, Гризбил Б. А.<sup>1</sup>, Якунин А.Н.<sup>1,2</sup>, Шапошников О.А.<sup>3</sup>, Рябухо В.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН

<sup>3</sup> НПП «Алмаз-Фазотрон»

Представлены результаты экспериментальных исследований температурных деформаций многослойной платы электронного устройства методом лазерной цифровой голографии. Обсуждается схема экспериментальной системы, методика эксперимента и обработки цифровых голографических интерферограмм. Представлены серии изображений голографических интерферограмм, отражающих процесс тепловой деформации платы, графики деформационного прогиба платы в целом и отдельных ее элементов.

Разработка моделей и методов исследования напряженно-деформируемого состояния блоков электронных приборов, в том числе электронных плат, является актуальной задачей конструирования и отработки технологий создания электронных приборов. Электронные платы, как правило, представляют собой конструктивно и технологически сложное изделие, включающее дюралюминиевое основание, спаянное с текстолитовой многослойной пластиной с заданными топологией и профилем площадок для крепления электронных компонентов. Особый интерес представляют зоны паяного контакта текстолитовых плат с корпусом и с пластинами фильтров на поверхностно-акустических волнах (ПАВ). ПАВ-фильтры выполнены из хрупкой керамики и поэтому возникающие при термоциклах температурные смещения и изгибные деформации конструкции нередко приводят к росту термоупругих напряжений и, как следствие, к разрушению ПАВ-фильтров.

Для адекватного численного моделирования напряженно-деформированного состояния композиционных конструкций методом конечных элементов необходимым этапом служит решение задачи идентификации параметров моделей, описывающей свойства материалов конструктивных элементов блока – прежде всего, композитных плат, паяных соединений и узлов крепления. Для этих целей необходимы высокоточные и информативные экспериментальные методы и средства определения напряженно деформированного состояния конструкции. Одним из таких методов служит оптическая голографическая интерферометрия с использованием аналоговых [1-4] и цифровых [4-8] фотографических средств записи голограмм. С помощью метода голографической интерферометрии возможно определение полей деформационных микроперемещений поверхности объекта с точностью до сотых долей микрометра в диапазоне от десятых долей микрометра до нескольких десятков микрометров. Перспективными функциональными и практическими возможностями обладает метод цифровой голографической интерферометрии, в котором записываются цифровые голограммы с использованием быстродействующего и высокоразрешающего цифрового матричного фотодетектора. Главная из этих возможностей состоит в записи серии голограмм волновых полей изображений поверхности объекта в его различных деформационных состояниях с малым временным интервалом (до 100 и более кадров в секунду) и в последующем количественном восстановлении поля микроперемещений точек поверхности объекта и процесса деформации объекта.

В настоящей работе разработаны методы и схемы лазерной цифровой голографической интерферометрии, которые применены для определения полей микросмещений поверхности электронных плат в результате их тепловых деформаций в интервале изменения испытательных и эксплуатационных температур. Определены профили теплового деформационного прогиба платы, возникающего вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов конструктивных элементов платы – в основном – дюралюминиевого основания и текстолитовой подложки.

На рис.1 приведена оптическая схема для записи цифровых голограмм изображения платы и последующего наблюдения - по результатам численного преобразования серии цифровых голограмм - полей деформационных микросмещений поверхности платы посредством численной компьютерной процедуры формирования цифровых интерферограмм и их количественной обработки.

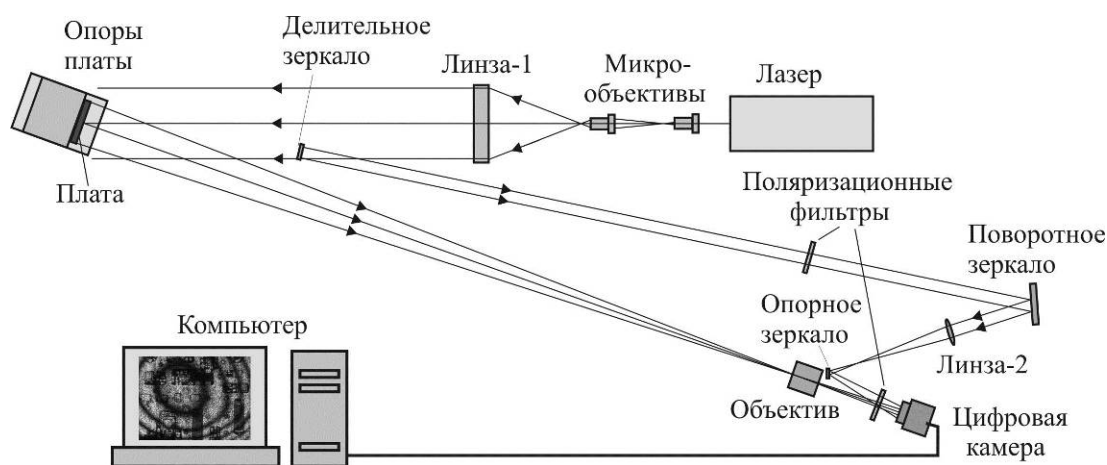


Рис. 1. Схема записи цифровых голограмм сфокусированного изображения объекта и реализации метода голографической интерферометрии деформаций электронной платы

Для освещения платы используется коллимированный пучок лазерного излучения, формируемого парой микрообъективов. Для записи голограммы необходимы две взаимно когерентные волны – объектная и опорная, которые накладываются друг на друга в области изображения объекта - в плоскости матрицы цифровой камеры. Деление исходного лазерного пучка на предметный и опорный в данной установке осуществляется по волновому фронту с помощью делительного зеркала малого размера, достаточного для формирования опорного пучка необходимой интенсивности. Квазисферическая опорная волна формируется с помощью делительного и поворотного зеркал, линзы-2 и опорного зеркала (рис.1). Расположение и фокусное расстояние линзы-2 подбираются таким образом, чтобы центр кривизны опорной волны – квазиточечный опорный источник, располагались приблизительно в плоскости выходного зрачка объектива, формирующего изображение поверхности платы на матричном фотодетекторе цифровой КМОП-камеры (THORLABS DCU223M USB2/0 1024x768). Длины оптических путей объектной и опорной волн от лазера до фотодетектора выравниваются с точностью до нескольких миллиметров (при длине когерентности излучения лазера  $\sim 15$  см) путем изменения положений опорного и поворотного зеркал. Используемый в наших экспериментах матричный фотодетектор имеет пиксельные размеры матрицы 1024x768, при периоде расположения пикселей 4.8 мкм, физические размеры матрицы 5x4 мм. Пространственный период расположения пикселей матрицы  $\Delta x_D$ , определяющий ее разрешающую способность, ограничивает угол падения опорной волны на матрицу величиной  $\theta \approx 5^\circ$ , при котором средний пространственный период интерференционных полос  $\Lambda$  записываемой голограммной структуры равен  $\Lambda \approx \lambda / \sin \theta \approx 7.2$  мкм.

Голографический эксперимент в методе цифровой голографической интерферометрии заключается в последовательной записи серии цифровых голограмм сфокусированного изображения платы при ее различных тепловых и, соответственно, деформационных состояниях. Затем цифровые голограммы подвергали численной обработке, состоящей из четырех основных операций [8]: 1 - пространственное фурье-преобразование суммы двух голограмм, соответствующих различным температурным состояниям платы, в результате которого получали суммарный пространственный спектр голограмм (рис.2); 2 - полосовая пространственная фильтрация полученного спектра с целью выделения спектральных составляющих, соответствующих объектным волновым полям (рис.2), 3 - второму (обратному) фурье-преобразованию отфильтрованной части суммарного спектра голограмм для восстановления комплексной амплитуды суммарного волнового поля изображения объекта, 4 -

формирование интерференционного изображения платы по интенсивности – квадрату модуля комплексной амплитуды суммарного поля, отражающего деформационное смещение поверхности платы при изменении ее температуры на определенную величину (рис.3).

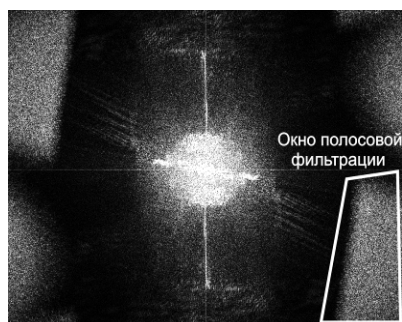
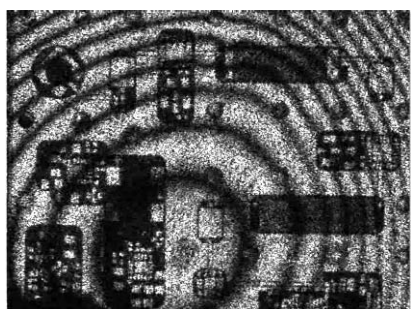


Рис.2. Изображение пространственного спектра суммы двух голограмм с обозначением окна полосовой пространственно частотной фильтрации спектра для выделения спектральных компонент суммы комплексных амплитуд объектного волнового поля



а



б

Рис. 3. Голографические интерферограммы тепловых смещений платы при изменении ее температуры на различную величину: а -  $\Delta T \approx 5^\circ C$ , б -  $\Delta T \approx 10^\circ C$

Распределение интенсивности  $I(\vec{\rho})$  в восстановленном интерференционном изображении поверхности платы в двух ее температурных состояниях можно записать в следующем виде [2-5]

$$I(\vec{\rho}) = |U_1(\vec{\rho}) + \exp(i\Delta\psi)U_2(\vec{\rho})|^2 = I_1(\vec{\rho}) + I_2(\vec{\rho}) + 2\sqrt{I_1(\vec{\rho})I_2(\vec{\rho})}\cos(\Delta\phi_{12}(\vec{\rho}) + \Delta\psi), \quad (1)$$

где  $U_1(\vec{\rho})$ ,  $U_2(\vec{\rho})$  и  $I_1(\vec{\rho})$ ,  $I_2(\vec{\rho})$  - пространственные распределения комплексных амплитуд и интенсивностей поля в плоскости изображения платы при двух ее деформационных состояниях,  $\Delta\phi_{12}(\vec{\rho})$  - разность фаз - пространственный фазовый сдвиг волновых полей, обусловленный деформационным смещением поверхности платы при изменении ее температуры,  $\Delta\psi$  - численно вводимый постоянный фазовый сдвиг по всему полю изображения. Комплексные амплитуды и интенсивности изображения платы имеют случайный пространственный характер, что обусловлено рассеянием света на микронеоднородностях поверхности объекта – платы. В результате этого рассеяния изображение приобретает пятнистый – спекл-модулированный – вид, что снижает разрешающую способность системы голографической интерферометрии. Размеры пятен – спеклов – определяются длиной волны и угловой апертурой оптической системы, формирующей изображение [3,9,10].

Пространственный фазовый сдвиг волновых полей  $\Delta\phi_{12}(\vec{\rho})$  в каждом пикселе изображения объекта зависит от величины и направления смещения  $\vec{g}(\vec{\rho})$  поверхности объекта в соответствующей точке с координатой  $\vec{\rho}(x, y)$ , а также от длины волны используемого лазерного излучения  $\lambda$  и направления  $\vec{N}_I(\vec{\rho})$  освещения поверхности объекта и направления  $\vec{N}_R(\vec{\rho})$  регистрации голограммы изображения поверхности объекта [1-3]

$$\Delta\phi_{12}(\vec{\rho}) = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{g}(\vec{\rho})[\vec{N}_I(\vec{\rho}) + \vec{N}_R(\vec{\rho})] = \frac{2\pi}{\lambda} g(\vec{\rho})[1 + \cos\alpha], \quad (2)$$

где  $\vec{N}_I(\vec{\rho})$  и  $\vec{N}_R(\vec{\rho})$  - единичные вектора направлений освещения и регистрации,  $\alpha$  - угол между этими направлениями. В (2) принято, что деформационное смещение точек поверхности объекта

$\vec{g}(\vec{\rho})$  совпадает с  $\vec{N}_R$ , а  $\vec{N}_I(\vec{\rho})$  и  $\vec{N}_R(\vec{\rho})$  имеют одинаковое направление для всех точек поверхности объекта (не зависят от  $\vec{\rho}(x, y)$ ).

Интерпретация голографических интерферограмм заключается в определении разности фаз  $\Delta\varphi_{12}(\vec{\rho})$  по интерференционному изображению – по светлым и темным интерференционным полосам, в которых  $\Delta\varphi_{12}(\vec{\rho}) = m(\vec{\rho})\pi$ , где  $m(\vec{\rho})$  - порядок интерференции - целое число. Таким образом, расчет поля микроперемещений поверхности объекта рассчитывается с использованием выражения

$$g(\vec{\rho}) = \frac{\lambda}{2(1 + \cos \alpha)} m(\vec{\rho}), \quad (3)$$

где порядок интерференции  $m(\vec{\rho})$  определяется относительно точек поверхности, в которых смещение принимается равным 0. В наших экспериментах  $\alpha \approx 20^\circ$  и использовался He-Ne лазер ( $\lambda \approx 0.6328$  мкм).

Нагрев платы до заданной температуры  $80^\circ\text{C}$  осуществлялся вне голографической установки для исключения дополнительных недеформационных смещений платы, обусловленных влиянием нагревательного устройства. Затем плата свободно устанавливалась в систему записи голограмм на специальные массивные опоры с низким коэффициентом термического расширения и высокой теплоемкостью для предотвращения микросмещения платы как целого (повороты, наклоны) в результате нагрева опорных поверхностей. Плата устанавливалась почти вертикально и свободно опиралась нижней и верхней кромками на поверхности теплоизоляционных опор при угле наклона платы по отношению к вертикали  $5^\circ - 10^\circ$  и, соответственно,  $85^\circ - 80^\circ$  в вертикальной плоскости по отношению к оптической оси объектива, формирующего изображение платы на матрице цифровой камеры. Охлаждение платы происходило преимущественно в условиях естественной конвекции в воздухе при комнатной температуре  $20 - 25^\circ\text{C}$ . Зависимость изменения температуры платы во времени определялась контактным способом с помощью термопары. Эта зависимость затем использовалась в голографическом эксперименте для определения температуры платы для каждой голограммы деформационного состояния платы. Сняв серию голограмм в процессе остывания платы и записав время записи каждой голограммы, можно оценить значения температуры платы для каждой голограммы. Непосредственно в эксперименте определять температуру с помощью термопары практически нельзя, поскольку механический контакт термопары с платой неизбежно вызывает смещение платы как целого, что вносит существенные фазовые возмущения в записываемое на голограмму объектное волновое поле и, соответственно, вносит паразитные возмущения в формируемую голографическую интерферограмму, существенно усложняя картину интерференционных полос. Методика эксперимента по цифровой голографической интерферометрии деформационных смещений поверхности объекта подробно описана в [8].

На рис.4 приведена серия голографических интерферограмм, показывающих изменение деформационного прогиба платы в процессе изменения ее температуры от  $0$  до  $8^\circ\text{C}$ . Увеличение прогиба платы определяет увеличение пространственной частоты интерференционных полос из-за роста величины градиента перемещений поверхности от центра платы к ее краям. При значительных прогибах платы полосы становятся неразрешимы по краям интерференционного изображения платы. Поэтому для определения профиля прогиба платы в широком диапазоне изменения ее температуры – в наших экспериментах от  $80^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ , необходимо формирование нескольких интерферограмм, отражающих прогиб при небольшом интервале изменения температур.

В наших экспериментах получали и обрабатывали или 10 интерферограмм с интервалом изменения температуры  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  или 5 интерферограмм с  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ . На рис. 5а-д приведены интерферограммы, полученные с одинаковым интервалом изменения температуры платы  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  в диапазоне от  $80^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ . Смещения центра концентричности интерференционных полос относительно геометрического центра платы обусловлено небольшими поворотами платы как целого в процессе ее тепловой деформации.

Конечно-элементное моделирование процессов термического деформирования платы [9] так же показывает, что положение точек с заданными нулевыми смещениями (необходимы для устранения эффектов перемещения тела как единого целого) при построении расчётной схемы существенно изменяет общую картину распределения поля смещений. На рис.6 представлено распределение поверхностей равного уровня нормальных смещений поверхности  $g(x,y)$  для варианта ограничения пространственных смещений в трёх угловых точках (рис.6 а, симметричное относительно центра распределение) и для варианта, когда одна из них взята в точке с максимального прогиба (рис.6 б, зона максимальных смещений наблюдается в нижней части платы). Следует учитывать, что такого рода изменение поля смещений не приводит к изменению напряженно-деформированного состояния и возникновению каких-либо дополнительных напряжений в объекте.

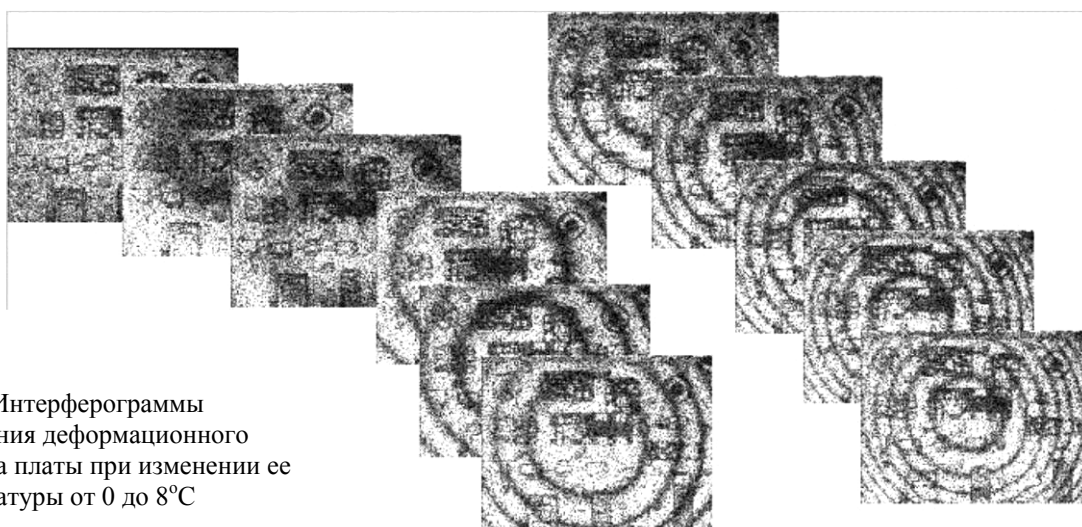


Рис.4. Интерферограммы изменения деформационного прогиба платы при изменении ее температуры от 0 до 8°C

Такие изменения интерференционной картины в определенной степени усложняют количественную обработку интерферограмм и восстановление профиля прогиба во широком диапазоне изменения температуры платы. Для устранения таких непредсказуемых изменений интерференционных картин нами разработана методика апостериорной численной обработки цифровых голограмм для коррекции влияния наклона и поступательного смещения платы как целого [10]. На рис.5е-к приведены интерферограммы, полученные в результате апостериорной коррекции соответствующих голограмм.

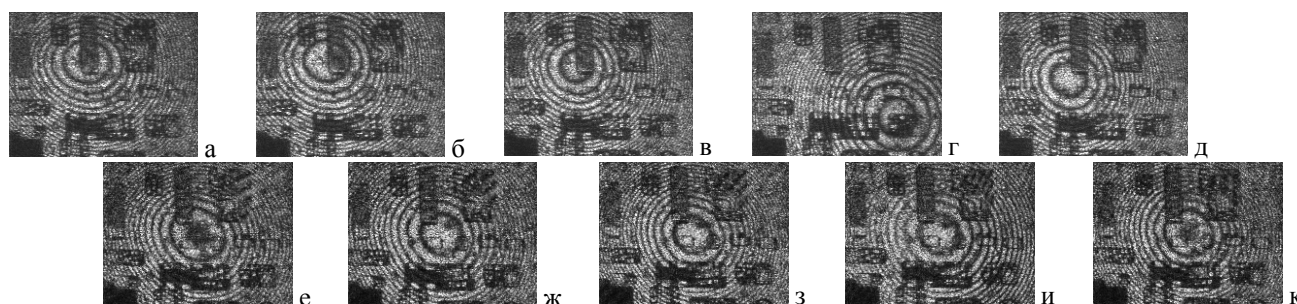


Рис.5. Интерферограммы прогиба платы без коррекции (а-д) и с коррекцией (е-к) цифровых голограмм, полученных при изменении температуры платы в интервалах:  
а, е - 80°C – 70°C ; б, ж - 70°C – 60°C ; в, з - 60°C – 50°C ; г, и - 50°C – 40°C ; д, к - 40°C – 30°C

Пошаговая серия голографических интерферограмм, получаемая при заданных интервалах изменения температуры платы, позволяет определить изменение профиля прогиба платы при изменении ее температуры в широком диапазоне 80°C – 30°C. На рис.7 представлены кривые



восстановленного по интерферограммам прогиба платы для различных диапазонов изменения ее температуры.

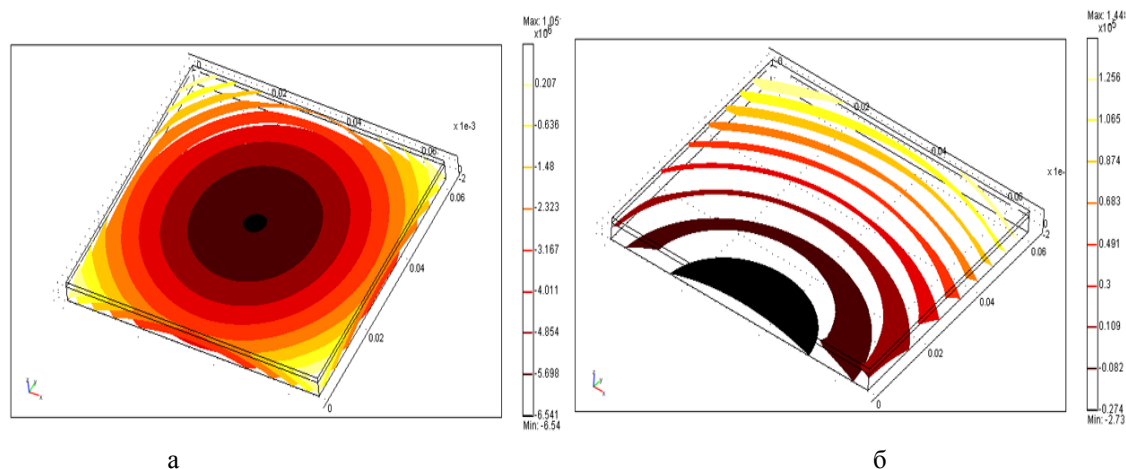


Рис.6. Распределение поверхностей равного уровня смещений при различных вариантах построения расчетной схемы: а – точки с граничными условиями нулевых смещений совпадают с угловыми узлами области (правый, нижний и верхний углы); б – точка с нулевым смещением  $g(x, y)$  перемещена из нижнего угла в центр нижней боковой грани пластины

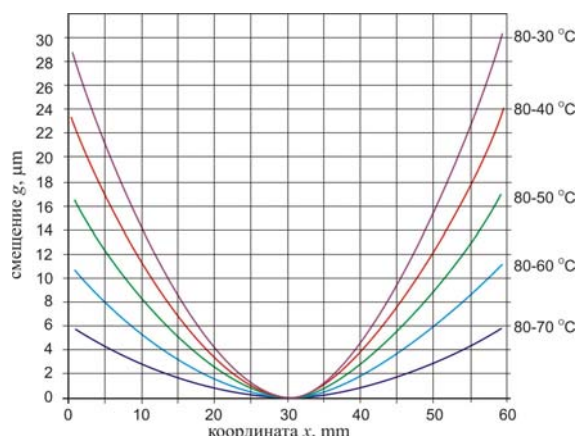


Рис.7. Восстановленные по интерферограммам деформационные прогибы платы, возникающие при изменении температуры платы на различную величину

Неравномерное охлаждение или нагрев платы при неравномерном теплоотводе вызывает, соответственно, неравномерные деформации платы с возникновением локальных участков повышенной деформации и механических напряжений. На рис.8 представлены интерферограммы с локальными зонами искривления интерференционных полос, свидетельствующих о неоднородности деформационных смещений, в том числе и в зоне расположения керамической пластины фильтра ПАВ (рис.8б)

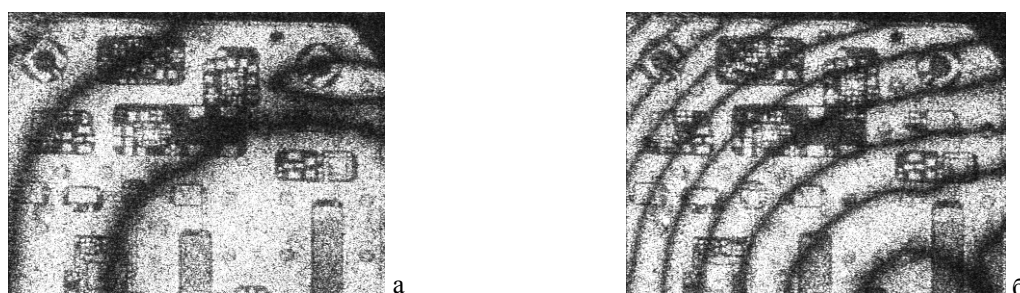


Рис.8. Интерферограммы неоднородной деформации платы в результате неравномерного ее охлаждения при локальном контактном отводе тепла

Запись интерферограмм в циклах «нагрев-охлаждение» в диапазоне эксплуатационных температур также показало наличие остаточных деформационных смещений, что является результатом пластического деформирования слоя припоя в паяном соединении основания и текстолитовой пластины.

Разработанный экспериментальный голографический метод позволяет с высокой достоверностью определять локализацию зон концентрации напряжений, проводить оценку существующих уровней напряжений и предельно допустимых режимов эксплуатации, способствует выработке рекомендаций по изменению топологии расположения функциональных элементов, изменению конструкции корпуса с целью уменьшения критичности сложного устройства по отношению к термоциклам.

#### Литература

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. - М.: Мир, 1973.
2. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977.
3. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986.
4. Kreis, T. Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods. – Wiley, 2005.
5. Schnars U., Jueptner W. Digital Holography. – Berlin: Springer-Verlag, 2004.
6. Алексеенко И.В., Гусев М.Е. // Автометрия. 2008, Т. 44, № 1, с. 111–117.
7. Гусев М.Е., Воронин А.А., Гуревич В.С. и др. // Наносистемы: физика, химия, математика. 2011, Т. 2, №. 1. с. 23–39.
8. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И. и др. // Компьютерная оптика. 2012, Т.36, №.1, с. 51-64.
9. Резчиков А.Ф., Якунин А.Н. Конечно-элементное моделирование объектов прецизионного приборостроения при силовых и тепловых воздействиях. Саратов: Издательский центр «Наука», 2008.
10. Савонин С.А., Абрамов А.Ю., Рябухо П.В. Численная коррекция фазовых сдвигов в цифровой голографической интерферометрии. // Сборник научных трудов III Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2014. С.180-181.

## ЧИСЛЕННАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ ОТ МИКРОНАКЛОНОВ И ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ ДИФФУЗНО-РАСSEИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Савонин С.А.<sup>1</sup>, Рябухо В.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

<sup>2</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

При голографическом интерференционном контроле микро-перемещения поверхности нагруженных объектов различного технического назначения, могут формироваться интерферограммы, определяющиеся не только деформациями поверхности объекта под действием приложенной нагрузки, но и некоторыми дополнительными фазовыми сдвигами, связанными с микронаклонами и поступательными микросмещениями объекта как целого. Это усложняет качественную и количественную интерпретацию интерферограмм. В настоящей работе показано, что применение специализированных численных алгоритмов постобработки голограмм дает возможность эффективно устранять такие фазовые вклады и реконструировать интерферограммы чисто деформационного смещения поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Методы голографической интерферометрии, в отличие от классической оптической интерферометрии, позволяют определять поля деформационных микроперемещений точек поверхностей объектов с рассеивающей оптически негладкой поверхностью – конструкций и узлов различного технического назначения – находящихся под действием деформирующей нагрузки [1-3]. В случае достижения внешнего деформирующего воздействия некоторой пороговой величины на формируемых деформационных интерферограммах могут проявляться сторонние одиночные интерференционные полосы или системы полос. Они определяются дополнительными фазовыми вкладыями в полную разность фаз объектных полей, соответствующих последовательным экспозициями исследуемого объекта. Эти фазовые вклады могут быть связаны с микронаклонами объекта как целого, его поступательными (продольными и поперечными) микросмещениями,

которые возникают в том случае, если стабильность объекта между экспозициями недостаточна, – жесткость устройств его закрепления недостаточна.

С другой стороны, существуют некоторые типы практических задач, в которых поступательное микросмещение поверхности объекта связано с его особенностями, а также с методами и техникой постановки эксперимента. Например, задача контроля деформационного расширения вдоль радиуса полого цилиндра, ориентированного горизонтально и касающегося опор по образующей. Нормальное расширение такого объекта сопровождается его вертикальным перемещением как целого в направлении от опоры. При этом на интерферограмме будут проявляться некоторые смещения центров полос, связанные с внесением в полную разность фаз объектных полей вклада от поступательного перемещения.

В общем случае, такие дополнительные фазовые вклады, возникающие при сложных деформациях объектов, вносят существенные искажения в структуру интерференционных полос. При этом возникают трудности с качественной интерпретацией и количественной расшифровкой формируемых голографических интерференционных изображений.

### ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА КОРРЕКЦИИ

Применяемый в настоящей работе метод голографического интерференционного контроля деформационного перемещения точек поверхности объекта основывается на записи цифровой голограммы сфокусированного изображения [4-7]. Ключевой особенностью такого схемного решения является применение объектива для формирования в плоскости записи голограммы резкого изображения поверхности исследуемого объекта, на которое накладывается когерентная опорная волна. Вариацией коэффициента увеличения объектива на светочувствительной матрице возможно формирование как изображения объекта целиком, так и некоторой его части, в зависимости от особенностей решаемой практической задачи [6].

При разработке метода коррекции дополнительных фазовых вкладов, в качестве модельного объекта применялась упругая латунная мембрана (толщиной 0,5 мм, радиуса  $R=16$  мм), закрепленная винтами по окружности к основе (рис. 1а). Мембрана 1 подвергалась упругой изгибной деформации под действием сосредоточенной силы  $\vec{F}$ , приложенной к ней по нормали в центре с обратной стороны. Деформирующая сила регулировалась путем изменения количества разновесов на платформе 2, связанной с мембраной рычажным механизмом 3. Наклоны объекта относительно вертикальной оси и его поступательные микроперемещения реализовывались посредством механической системы, состоящей из двух линейных трансляторов и поворотной платформы. Под действием приложенной силы  $\vec{F}$ , точки поверхности мембраны претерпевают микросмещения, которые находят свое качественное и количественное отражение на формируемой интерферограмме (рис. 1б).

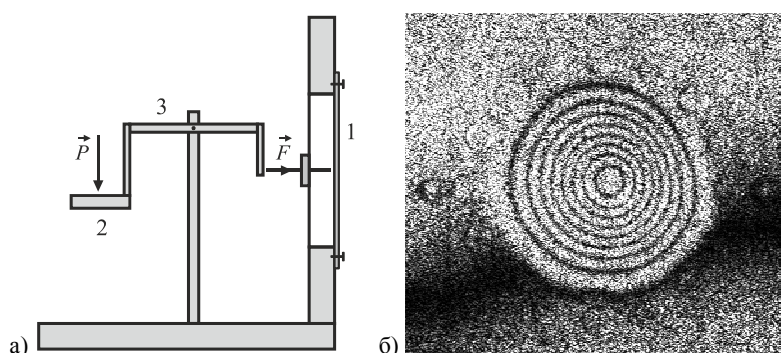


Рис. 1. Схематическое изображение тестового объекта – упругой мембраны, жестко закрепленной по контуру винтами (а) и цифровая голографическая интерферограмма деформации мембраны под действием сосредоточенной силы, приложенной нормально к её центру (б)

Такая реализация модельного объекта позволяет наглядно отразить на одной интерферограмме одновременно и упругую деформацию поверхности объекта под действием внешней сосредоточенной силы, и фазовый вклад от его микронаклонов и микросмещений как

целого. На интерферограмме с рис. 1б, кроме замкнутых полос от изгибной деформации мембраны, присутствует наклонная одиночная полоса, отражающая фазовый вклад в полную разность фаз объектных полей  $\Delta\varphi_S(\vec{\rho}_0)$  от микронаклона мембраны как целого (вместе со своей опорой) вокруг оси, направленной параллельно этой интерференционной полосе. Такие дополнительные полосы нарушают пространственную структуру исходной интерференционной картины, что выражается в разрыве части круговых полос. Это, в свою очередь, в значительной степени затрудняет однозначную трактовку полей деформационного микроперемещения поверхности объекта.

В общем случае, полный фазовый набег  $\Delta\varphi_S(\vec{\rho}_0)$  между двумя последовательными записями цифровых голограмм, соответствующих деформационным перемещениям поверхности объекта, будет определяться суммой вкладов от изгибной деформации поверхности объекта  $\Delta\varphi_{def}(\vec{\rho}_0)$  под действием внешних сил и некоторых вкладов  $\Delta\varphi_{mov}(\vec{\rho}_0)$  от микроперемещения объекта как целого:

$$\Delta\varphi_S(\vec{\rho}_0) = \Delta\varphi_{def}(\vec{\rho}_0) + \Delta\varphi_{mov}(\vec{\rho}_0). \quad (1)$$

В свою очередь, в методе цифровой голографической интерферометрии [8,9] применяется численная запись голограмм посредством матричного фотоприемника. Восстановление комплексных амплитуд объектных полей  $U_{S1}(\vec{\rho}_0)$  и  $U_{S2}(\vec{\rho}_0)$ , соответствующих различным состояниям поверхности исследуемого объекта, осуществляется в памяти компьютера также в численной форме путем прямого расчета дифракционных преобразований записанных цифровых голограмм. Это дает возможность на этапе формирования интерферограммы ввести в одно из восстановленных объектных полей некоторую дополнительную разность фаз  $\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)$ .

В таком случае, выражение для цифровой интерферограммы можно записать в виде:

$$\begin{aligned} I_S^{21}(\vec{\rho}_0) &= |U_{S1}(\vec{\rho}_0) + \exp(i\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0))U_{S2}(\vec{\rho}_0)|^2 = \\ &= I_{S1}(\vec{\rho}_0) + I_{S2}(\vec{\rho}_0) + 2\sqrt{I_{S1}(\vec{\rho}_0)I_{S2}(\vec{\rho}_0)}\cos(\Delta\varphi_{def}(\vec{\rho}_0) + \Delta\varphi_{mov}(\vec{\rho}_0) + \Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)). \end{aligned} \quad (2)$$

Если подобрать вносимую разность фаз  $\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)$  так, чтобы  $\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0) = -\Delta\varphi_{mov}(\vec{\rho}_0)$ , то картина полос на интерферограмме  $I_S^{21}(\vec{\rho}_0)$  будет определяться только фазовым вкладом от изгибной деформации  $\Delta\varphi_{def}(\vec{\rho}_0)$ .

Таким образом, процедура численной коррекции дополнительных фазовых сдвигов заключается в перемножении комплексной амплитуды объектного поля, соответствующего нагруженному состоянию объекта, и экспоненциального множителя  $\exp(i\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0))$ , содержащего в себе явное выражение для корректирующей разности фаз. Все остальные процедуры, необходимые для восстановления объектных полей с цифровых голограмм сфокусированного изображения и формирования на их основе интерферограмм, остаются без изменений.

Аналитическое выражение для фазового вклада  $\Delta\varphi_{mov}(\vec{\rho}_0)$  определяется геометрическими параметрами объекта и схемы записи голограммы, а также характером приложенных к объекту внешних сил. На практике при исследовании нагруженных объектов методами голографической интерферометрии наиболее широко распространены дополнительные микронаклоны и поступательные (продольное и поперечное) микросмещения объекта как целого. Поэтому актуальной является задача численного устранения дополнительных интерференционных полос от подобных процессов на интерферограммах изгибных деформаций нагруженных объектов.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В методе голографической интерферометрии применение математического моделирования позволяет в численном виде воспроизвести процедуры записи голограммы и восстановления с нее поля изображения объекта. Практическая возможность построения модели с учетом произвольных типов деформации объекта позволяет еще до постановки натурального эксперимента получить предварительную информацию об особенностях пространственного распределения полос голографической интерферограммы. Корректно построенная модель дает возможность качественно оценить эффективность процедуры устранения фазовых сдвигов от поступательных микроперемещений, а также получить дополнительную информацию о качественных и

количественных особенностях влияния «паразитного» фазового вклада на характер картины интерференционных полос от прогиба мембраны.

Основной задачей, при построении математической модели формирования интерференционного изображения поверхности испытывающего внешнее деформирующее воздействие объекта, является вычисление разности фаз  $\Delta\varphi_S(\vec{\rho}_0)$  объектных полей до и после деформационного смещения поверхности объекта, которую можно представить в виде [2]:

$$\Delta\Psi(\vec{\rho}_0) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{g}(\vec{\rho}_0) (\vec{N}_0(\vec{\rho}_0) - \vec{N}_S(\vec{\rho}_0)),$$

где  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$  – поле микросмещений поверхности,  $\vec{N}_S$  – единичный вектор направления освещения поверхности объекта,  $\vec{N}_0$  – единичный вектор направления наблюдения.

Модель строилась в предположении, что объект освещается пучком света со сферическим волновым фронтом, поэтому в ней учитывается зависимость векторов  $\vec{N}_S$  и  $\vec{N}_0$  от координат точек поверхности объекта.

Вектор микросмещения точек поверхности объекта  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$  определяет вид поля деформации объекта и величину деформаций в каждой точке. Для определения его явного вида необходима опытная информация о геометрических параметрах поверхности объекта и характере деформации.

В том случае, если объект испытывает деформационное смещение поверхности, сопряженное с поступательными смещениями как целого, то вектор поля полного перемещения  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$  определяется суммой компонент:

$$\vec{g}(\vec{\rho}_0) = \vec{g}_{def}(\vec{\rho}_0) + \vec{g}_{mov}(\vec{\rho}_0), \quad (4)$$

где  $\vec{g}_{def}(\vec{\rho}_0)$  – вектор поля деформации упругой мембраны под действием сосредоточенной силы,  $\vec{g}_{mov}(\vec{\rho}_0)$  – дополнительный вклад в деформационное поле, связанный с микроперемещением объекта как целого.

Для выбранного модельного объекта – мембраны, в соответствии с литературными данными [10], можно использовать следующее выражение для расчета величины нормального перемещения точек мембраны, закрепленной по окружности, под действием центральной нормально приложенной силы:

$$g_{def}(\vec{r}) = g_0 \cdot \left( 1 - \left( \frac{|\vec{r}|}{R} \right)^2 \right)^2, \quad (5)$$

где  $g_0$  – нормальное перемещение поверхности мембраны в точке приложения центральной силы,  $\vec{r}(x, y)$  – радиус вектор произвольной точки мембраны, в которой вычисляется перемещение.

При этом вектор  $\vec{g}_{mov}(\vec{\rho}_0)$ , отражающий дополнительный вклад в деформационное поле и связанный с микросмещениями объекта как целого, может быть определен на основании геометрических построений с учетом характерных особенностей микросмещения. Таким образом, задача построения математической модели сводится к получению явного выражения для вектора  $\vec{g}_{mov}(\vec{\rho}_0)$ .

На рис. 2 приведен результат численного моделирования интерферограмм прогиба упругой мембраны, закрепленной по контуру – окружности, при её поступательном микросмещении как целого. В модели вводилось два различных микросмещения объекта: поперечное (тангенциальное) – вдоль горизонтальной оси (рис. 2а) на величину  $\delta x_g = 15$  мкм, и продольное – вдоль нормали к поверхности мембраны по оптической оси объектива к центру матричного фотодетектора (рис. 2б). Такие смещения приводят к образованию на интерферограмме системы полос равной ширины, которые накладываются на концентрические полосы, отражающие упругий прогиб мембраны. При этом исходно замкнутые интерференционные полосы от прогиба, претерпевают разрывы, с одновременным смещением их центра концентричности. В случае продольного микросмещения объекта дополнительные полосы искривлены, что связано с отличиями степени кривизны волнового

фронта освещающего пучка в точках пространства, соответствующих исходному положению объекта и его положению после продольного перемещения

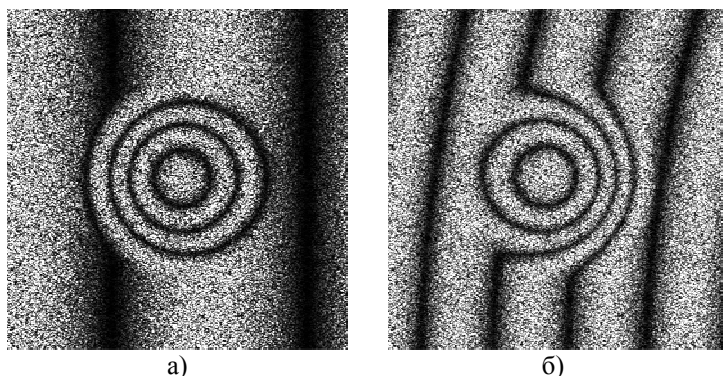


Рис. 2. Полученные в результате численного расчета спекл-модулированные интерферограммы от упругого прогиба мембраны под действием центральной сосредоточенной силы: а) объект испытывает поступательное поперечное микросмещение на  $\delta x_g = 15$  мкм параллельно плоскости регистрации; б) объект испытывает продольное микросмещение на  $\delta z_g = 220$  мкм в направлении, перпендикулярном плоскости регистрации

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При интерференционном контроле объектов, испытывающих деформации под действием внешних сил, точки приложения таких сил могут не совпадать с геометрическим центром объекта. В таком случае могут наблюдаться наклоны объекта как целого вокруг проходящих через объект вертикальных и/или горизонтальных осей.

На рис. 3а представлен фрагмент интерферограммы, которая была сформирована на основе пары экспериментальных голограмм. Между их экспозициями к центру мембраны с обратной стороны нормально прикладывалась центральная сила, вызвавшая упругий прогиб. Наклон объекта вокруг вертикальной оси вводился принудительно с помощью поворотной платформы.

На основании разработанной математической модели был осуществлен расчет корректирующего фазового множителя  $\Delta\varphi_D(\vec{p}_0)$ . Он совпадает по величине с фазовым вкладом от вертикального наклона в эксперименте, но противоположен ему по знаку. На этапе формирования интерферограммы такой корректирующий фазовый множитель вносился в комплексную амплитуду объектного поля нагруженного состояния объекта, что приводило к компенсации фазового вклада от наклона.

В результате такой численной обработки наблюдается эффективное устранение системы параллельных полос (рис. 3б), вносимых в общую интерференционную картину от дополнительного фазового вклада, вызванного микронаклоном мембраны как целого вокруг вертикальной оси.

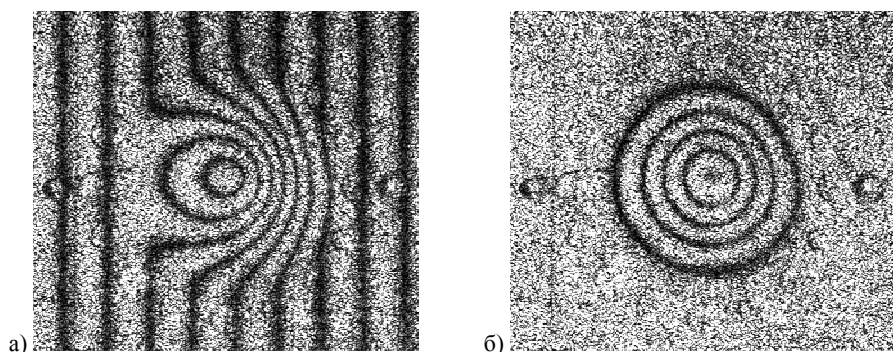


Рис. 3. Устранение побочных фазовых сдвигов от микронаклона на экспериментальных интерферограммах. Объект испытывает наклон вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр: а) наклон на  $\alpha = 15^\circ$ , нагрузка в центральной точке 16 г; б) результат численной коррекции

Поступательные микросмещения мембраны как целого вносились также на этапе записи голограммы деформированного состояния объекта. Для этого мембрана, закрепленная на основе, устанавливалась на платформе, связанной с системой перпендикулярно ориентированных механических линейных трансляторов. Они позволяли осуществить контролируемое прецизионное перемещение объекта по продольному и поперечному направлениям относительно нормали к плоскости регистрации изображения. Как и в предыдущем случае, между экспозициями к центру

мембраны по нормали прикладывалась точечная нагрузка, что приводило к её прогибу с образованием системы концентрических полос на интерферограмме.

На рис. 4 приведены экспериментальные интерферограммы упругой деформации мембраны, совмещенной с её поступательными перемещениями, а также результат численной коррекции таких перемещений.

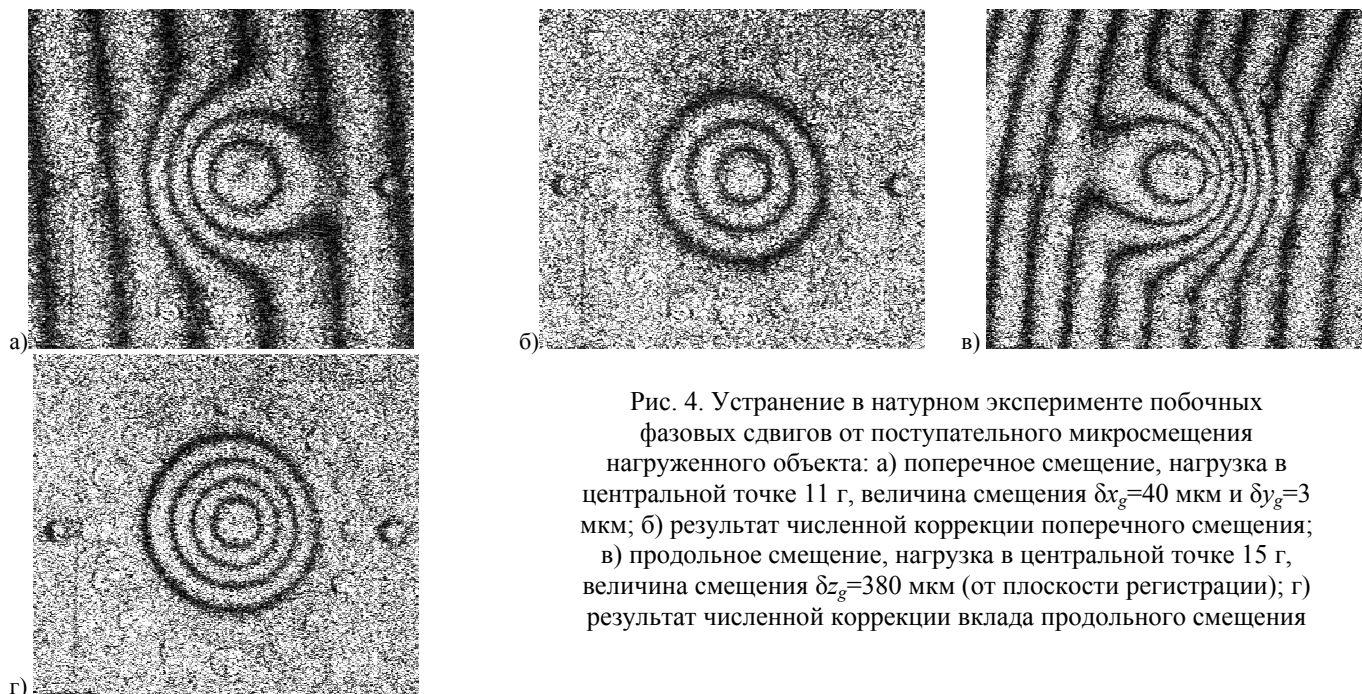


Рис. 4. Устранение в натурном эксперименте побочных фазовых сдвигов от поступательного микросмещения нагруженного объекта: а) поперечное смещение, нагрузка в центральной точке 11 г, величина смещения  $\delta x_g=40$  мкм и  $\delta y_g=3$  мкм; б) результат численной коррекции поперечного смещения; в) продольное смещение, нагрузка в центральной точке 15 г, величина смещения  $\delta z_g=380$  мкм (от плоскости регистрации); г) результат численной коррекции вклада продольного смещения

Аналогично наклону, при поступательном микросмещении картина замкнутых интерференционных полос от упругого прогиба мембраны претерпевает изменение за счет добавления в полное поле разности фаз некоторого вклада, вызванного таким поступательным микросмещением. При этом образуется система дополнительных интерференционных полос, которая накладывается на концентрические полосы, отражающие упругий прогиб мембраны.

Дополнительные полосы на рис. 4а имеют некоторый наклон относительно вертикали, что связано с поперечным смещением объекта сразу в двух перпендикулярных направлениях – относительно вертикальной и горизонтальной осей. При этом угол наклона полос в плоскости интерферограммы определяется соотношением величин микросмещений  $\delta x_g / \delta y_g$ .

В результате применения к интерферограммам численного алгоритма коррекции наблюдается восстановление концентричности в картине интерференционных полос упругого прогиба закрепленной по краю мембраны и полное устранение вторичных полос от поперечного микросмещения (рис. 4б,г).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При приложении к исследуемому объекту механической нагрузки почти всегда возникают некоторые его микронаклоны относительно линии закрепления объекта. Это вносит искажения в интерференционные картины от того типа деформации, который выступает объектом исследования в эксперименте. Аналогично, любые по величине поперечные и продольные микросмещения объекта также ограничивают возможности качественного и количественного анализа интерферограмм чистой деформации объекта от действия приложенной нагрузки.

Применение метода численной коррекционной постобработки, направленной на устранение вносимых в эксперименте микронаклонов и поступательных микросмещений, является действенным способом преодоления подобных трудностей и дает возможность повысить точность качественного и количественного анализа характера деформации при решении обратной задачи интерферометрии.

Численное добавление корректирующей разности фаз  $\Delta\varphi_D(\vec{r}_0)$  в комплексную амплитуду объектного поля, соответствующего деформированному состоянию объекта, на этапе формирования голографической интерферограммы, приводит к эффективному устранению фазового вклада от микронаклонов и микросмещений как целого. Это дает возможность реконструировать интерферограмму, отражающую только тот фазовый сдвиг в объектном поле, который определяется полем деформационных микроперемещений поверхности исследуемого объекта.

## Литература

1. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций – М.: Наука, 1988.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия – М.: Мир, 1982.
3. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия – М.: Наука, 1977.
4. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия – М.: Наука, 1985.
5. Кольер Р., Беркхарт К., Лиин Л. Оптическая голография – М.: Мир, 1973.
6. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И. и др. // Компьютерная оптика. 2012, Т. 36, № 1, с. 51–64.
7. Диков О.В., Савонин С.А., Качула В.И. и др. // Известия Саратовского университета. Сер. Физика 2012, Т. 12, № 1, с. 12–17.
8. Schnars U., Jueptner W. Digital holography– Springer Verlag, 2004.
9. Kreis T. Handbook of Holographic Interferometry. Optical and Digital Methods – Wiley-VCH, 2005.
10. Бажанов В.Л., Гольденблат И.И. Расчет конструкций на тепловые воздействия – М.: Машиностроение, 1969.

## КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СПЕКЛОГРАММ В ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

*Рябухо П.В.<sup>1</sup>, Максимова Л.А.<sup>2</sup>, Мысина Н.Ю.<sup>2</sup>, Рябухо В.П.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Саратовский государственный университет*

<sup>2</sup> *Институт проблем точной механики и управления РАН,*

При реализации метода цифровой спекл-фотографии смещение спекл-структуры, вызванное смещением рассеивающего объекта, регистрируется на матрицу цифровой фотокамеры. Смещение меньше одного пикселя вызывает изменение в распределении регистрируемой на матрицу цифровой фотокамеры интенсивности спекл-поля. Информация о таком малом смещении содержится в пространственном спектре разности спекл-структур, формируемых при исходном и смещённом состояниях рассеивающего объекта. В работе рассматривается метод цифровой спекл-фотографии с корреляционной обработкой суммарного пространственного спектра спекл-структур для определения смещения, вызываемого перемещением или деформацией объекта с рассеивающей поверхностью, с субпиксельной точностью.

### ВВЕДЕНИЕ

Микросмещение рассеивающего объекта или деформация его поверхности отражаются на пространственном распределении интенсивности спекл-поля, которое формируется при отражении когерентного лазерного излучения от рассеивающей поверхности объекта [1-3]. Спекл-поле также формируется при прохождении лазерного излучения через оптически неоднородную среду. Изменения, происходящие в такой среде, вызывают изменения в спекл-модулированном поле. С помощью лазерных методов интерферометрии можно определить изменения в спекл-поле и получить измерительную информацию о микросмещениях рассеивающих объектов [2-5].

Однородное поперечное смещение спекл-структуры можно определить с помощью метода цифровой двухэкспозиционной спекл-фотографии путем анализа интерференционной картины, образующейся в суммарном пространственном спектре исходной и смещенной спекл-структур – в дифракционном гало [4,5], или по величине линейного фазового набега, возникающего в поле комплексного суммарного пространственного спектра [6].

Использование корреляционного метода для определения взаимного смещения спекл-структур [7,8] имеет много преимуществ – таких, как простота реализации, возможность автоматизации процессов измерения, прямое получение информации о смещении спекл-структуры без преобразования в частотную область. Недостатком такого метода является не чувствительность к смещению спекл-структуры на величину меньшую, чем межпиксельное расстояние матрицы цифровой фотокамеры.



В работе предложены методы численной обработки и корреляционного анализа комплексных пространственных спектров спекл-структур для определения их микросмещений в субпиксельном диапазоне. В основе данных методов лежит корреляционный анализ интерференционной картины в дифракционном гало и введение дополнительных фазовых сдвигов интерференционной картины для численного определения фазового набега в пространственном спектре.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБПИКСЕЛЬНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ СПЕКЛ-СТРУКТУРЫ

Субпиксельное смещение спекл-структуры реализовывалось с помощью моделирования наклона рассеивающей поверхности - источника поля, на малый угол. Моделирование поля источника дифракционного спекл-модулированного поля производилось согласно следующему алгоритму. Генерировались две матрицы случайных независимых вещественных величин  $u_{kj}$  и  $v_{kj}$ , распределенных от -1 до 1 по нормальному закону. На их основе формировалась матрица случайных комплексных переменных  $U_0(k, j) = u_{kj} + iv_{kj}$ . Таким образом создавалось случайное, попиксельно коррелированное поле круговых гауссовых комплексных величин [9]. Данное поле модулировалось бинарной апертурной функцией  $P(k, j)$  той или иной формы, равной 1 в пределах апертуры и 0 за ее пределами. Распределение комплексной амплитуды поля источника задавалось в виде дискретного массива независимых круговых гауссовых случайных величин  $U(k, j) = U_0(k, j)P(k, j)$ .

Комплексная амплитуда спекл-поля в дальней области дифракции формировалось путем фурье-преобразования поля источника с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Таким образом получали матрицу комплексных амплитуд дифракционного спекл-поля. Апертуры источников спекл-полей и фрагменты соответствующих смоделированных дифракционных спекл-картин, формируемых такими источниками, представлены на рис. 1,а,б,в. Фурье-преобразование матрицы, содержащей спекл-структуру, приводит к формированию дифракционного гало (рис. 1,г). На рис. 2 представлен алгоритм формирования дифракционного гало.

Наклон рассеивающего объекта моделировался путём умножения элементов матрицы со сформированным источником на множитель, содержащий линейно изменяющийся фазовый набег,  $U'(k, j) = \exp(i2\pi\Delta\phi(k, j))$ . Затем, после преобразования Фурье, формировалась матрица, содержащая спекл-структуру, соответствующую смещённому состоянию рассеивающего объекта (рис. 1,в). Множитель подбирали таким образом, чтобы смещение спекл-структуры в плоскости пространственных частот рассеивающего объекта составляло доли пикселя матрицы.

Фурье-преобразование матрицы, содержащей распределение разности спекл-структур исходного и смещенного состояний объекта, приводит к формированию дифракционного гало с темной полосой посередине гало, соответствующей минимуму интерференционной картины. На рис. 1,д представлено дифракционного гало, соответствующее однородному смещению спекл-структуры в горизонтальном направлении на 0,01 пикселя. В этом случае максимум интерференционной картины невозможно наблюдать, поскольку он выходит за пределы матрицы, содержащей гало. При наблюдении картины гало, являющейся фурье-преобразованием распределения суммы спекл-структур, соответствующих исходному и смещенному состояниям объекта, заметить интерференционную картину практически невозможно, потому что максимум интерференционной картины сливается с дифракционным гало, а темная полоса выходит за пределы матрицы.

Информация о субпиксельном смещении спекл-структуры записывается в незначительном изменении распределения интенсивности смещенного состояния спекл-структуры относительно исходного. Регистрируемые изменения в распределении интенсивности спекл-поля столь малы, что их практически невозможно заметить при непосредственном наблюдении спекл-структур (рис. 1,б,в), но можно выявить путём преобразования в область пространственных частот, используя методы цифровой спекл-фотографии.

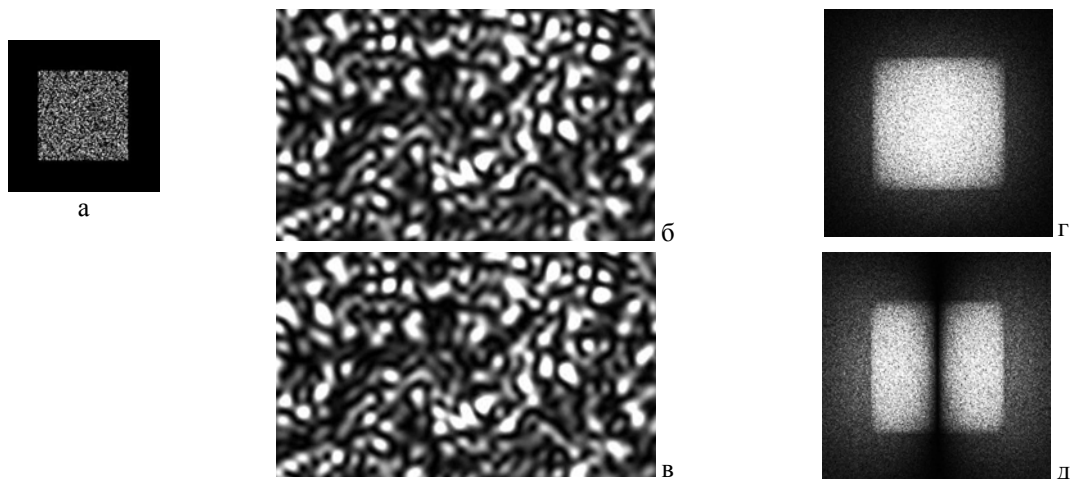


Рис.1. Смоделированный источник спекл-поля (а); фрагменты смоделированных дифракционных спекл-структур исходного (б) и смещённого (в) состояний источника; дифракционные гало, соответствующие исходному состоянию спекл-структуры (г) и разности исходного и смещённого на 0,01 пикселя состояний спекл-структур (д)

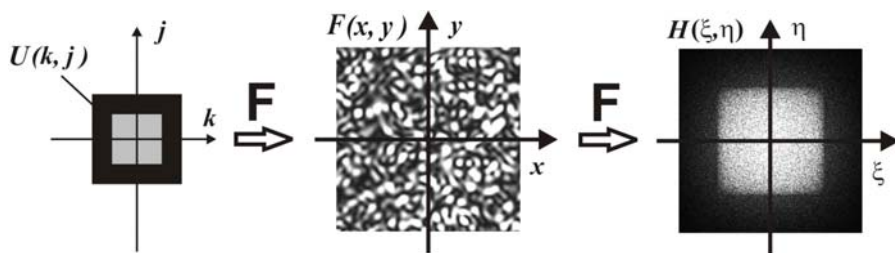


Рис.2. Алгоритм формирования дифракционного гало;  $\mathbf{F}$  – дискретные преобразования Фурье

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУБПИКСЕЛЬНЫХ МИКРОСМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

Для дискретных распределений комплексной амплитуды поля в пространственных спектрах исходной и смещённой спекл-структур, а также в суммарном пространственном спектре разности исходной и смещённой спекл-структур можно записать следующие выражения [10].

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}(I_0(x, y)) &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x, y) \exp \left[ i2\pi \left( \frac{x}{M} \xi + \frac{y}{N} \eta \right) \right] = H_0(\xi, \eta); \\
 \mathbf{F}(I_s(x, y)) &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_0(x - \Delta x, y) \exp \left[ i2\pi \left( \frac{x}{M} \xi + \frac{y}{N} \eta \right) \right] = H_s(\xi, \eta) = \\
 &= H_0(\xi, \eta) \exp \left( i2\pi \frac{\Delta x}{M} \xi \right). \\
 H(\xi, \eta) &= \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_s(x, y)\} = \mathbf{F}\{I_0(x, y) - I_0(x - \Delta x, y)\} = \\
 &= H_0(\xi, \eta) \left[ 1 - \exp \left( i2\pi \frac{\Delta x}{M} \xi \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $I_0(x, y)$  и  $I_s(x, y)$  - распределения интенсивностей исходного и смещённого состояний спекл-структур,  $\mathbf{F}$  - символ пространственного фурье-преобразования,  $H_0(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_0(x, y)\}$  и  $H_s(\xi, \eta) = \mathbf{F}\{I_s(x, y)\}$  - комплексные амплитуды пространственных спектров исходной и смещённой спекл-структур. Для модуля комплексной амплитуды суммарного пространственного спектра спекл-структур получаем

$$|H(\xi, \eta)| = |H_0(\xi, \eta)| 2 \left| \sin \left( \pi \frac{\Delta x}{M} \xi \right) \right|. \quad (2)$$

Выражение (2) для суммарного амплитудного спектра спекл-структур определяет зависимость периода интерференционных полос от величины взаимного смещения спекл-структур  $\Delta x$  и, соответственно, позволяет получить выражение для вычисления величины смещения спекл-структуры по величине периода полос:

$$\pi \frac{\Delta x}{M} \Lambda = \pi \Rightarrow \Delta x = \frac{M}{\Lambda}. \quad (3)$$

Для определения периода интерференционных полос в случае, когда на область дифракционного гало приходится только одна тёмная полоса, можно применить метод дополнительного фазового сдвига. Смещение интерференционных полос дифракционного гало на заданную долю периода  $\Delta\phi/2\pi$  происходит в результате умножения каждого элемента матрицы, или исходного, или смещённого состояния спекл-структуры, на постоянный заданный фазовый множитель  $\exp(i\Delta\phi)$ . Величину смещения  $\Delta\xi$  интерференционной картины (в данном случае темной интерференционной полосы) дифракционного гало можно определить по смещению центрального минимума функции распределения интенсивности в дифракционном гало (рис.3). Определяя период интерференционных полос  $\Lambda = 2\pi\Delta\xi/\Delta\phi$  можно согласно формуле (3) определить величину смещения спекл-структуры:

$$\Delta x = \frac{M \Delta\phi}{2\pi\Delta\xi}. \quad (4)$$

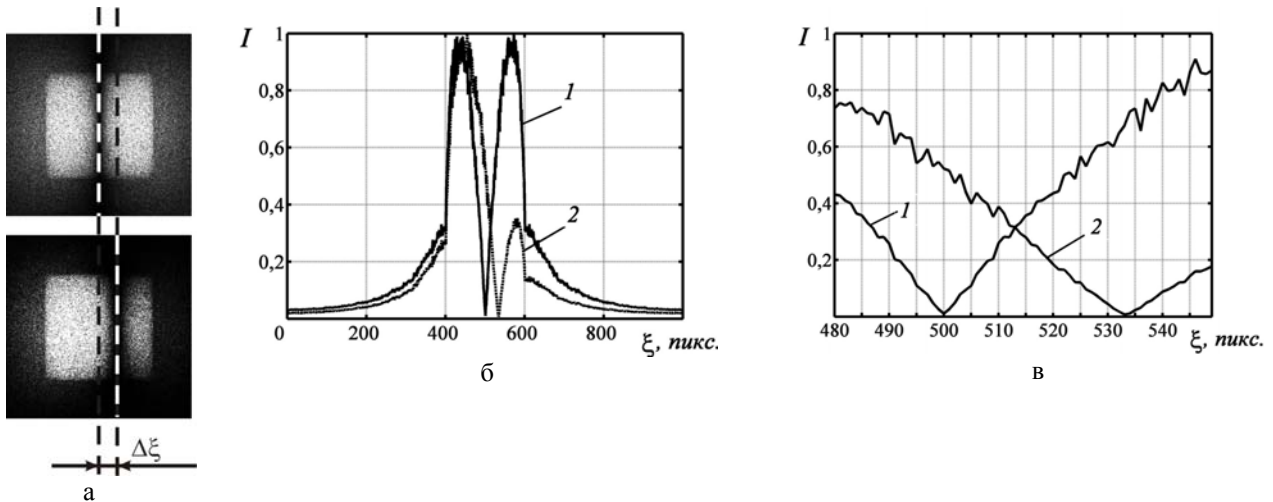


Рис.3. Смещение интерференционной полосы в дифракционном гало (а) в результате умножения каждого элемента матрицы, содержащей смещённое состояние спекл-структуры ( $\Delta x = 0,01$  пикс.), на постоянный фазовый множитель с фазовым сдвигом  $\Delta\phi = \pi/1500$  рад; (б, в) – нормированные, усреднённые по 100 реализациям, распределения интенсивности в дифракционных гало (рис. 3,а) вдоль оси  $\xi$  (рис. 2): (1) – исходное, (2) – смещённое на величину  $\Delta\xi$ ; (в) – увеличенный масштаб области смещения локального минимума,  $\Delta\xi = 33$  пикс; размер матрицы  $M = 1000$  пикс

На рис. 4 представлены дифракционные гало, содержащие различные фазовые смещения интерференционной картины дифракционного гало и так же нормированные дифракционные гало. Распределение интенсивности в дифракционном гало по одной реализации, перпендикулярное интерференционной картине, не позволяет достаточно точно определить положение минимумов (рис. 5,а). Более точное определение величины смещения минимума интерференционной картины возможно с использованием апостериорной численной обработки дифракционного гало, усреднения и нормировки (рис. 5,б).

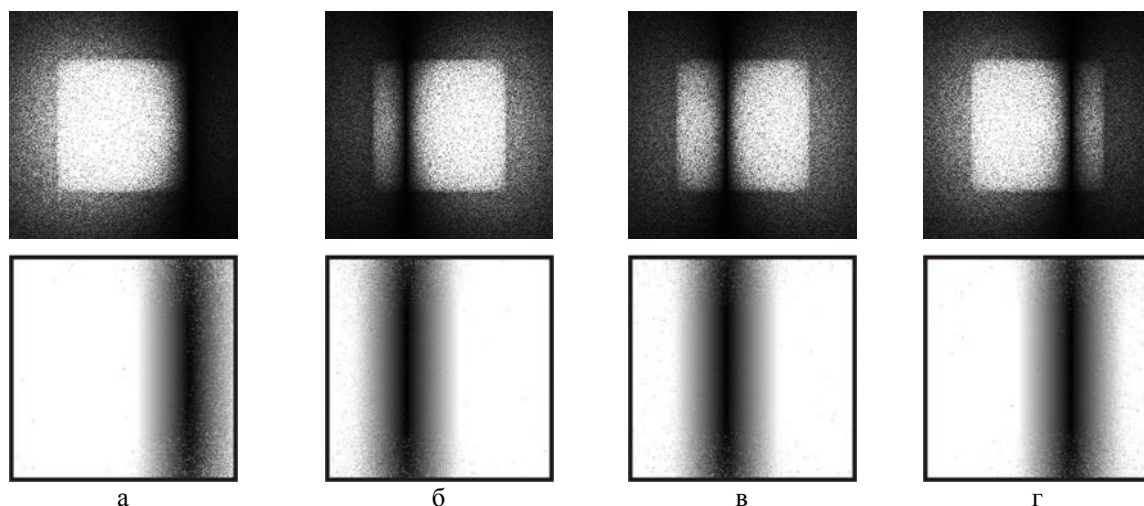


Рис.4. Интерференционная полоса в дифракционном гало и нормированные изображения полос, соответствующие смещению спекл-структуры  $\Delta x = 0,01$  пикс, при умножении каждого элемента матрицы со смещенной спекл-структурой на постоянный фазовый множитель с фазовым сдвигом: (а) –  $\Delta\phi = \pi/500$  рад; (б) –  $\Delta\phi = -\pi/1000$  рад; (в) –  $\Delta\phi = -\pi/2000$  рад; (г) –  $\Delta\phi = \pi/1000$  рад

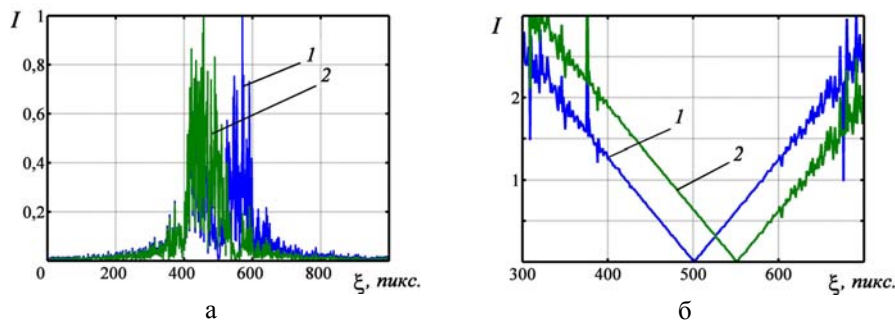


Рис.5. Распределение интенсивности в дифракционном гало вдоль оси  $\xi$  (а); усреднённое и нормированное распределение интенсивности вдоль оси  $\xi$  (б): (1) – исходное, (2) – смещённое на величину  $\Delta\xi$  при задании фазового сдвига  $\Delta\phi = \pi/1000$  рад

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС ДИФРАКЦИОННОГО ГАЛО

Фурье-преобразование матрицы, содержащей разность исходного и смещённого состояния спекл-структур, приводит к формированию дифракционного гало с системой интерференционных полос. Смещение спекл-структуры можно определить по интерференционной картине дифракционного гало (рис. 6,а) или непосредственно корреляционным методом, который, однако, не даёт субпиксельной точности. При использовании корреляционного метода смещение спекл-структуры определяется по смещению центрального пика функции автокорреляции распределения интенсивности  $I_0(x, y)$  исходного состояния спекл-структуры и функции взаимной корреляции распределений интенсивностей исходного и смещённого состояний спекл-структур  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$  (рис. 6,в).

Функции автокорреляции и взаимной корреляции можно записать следующими выражениями, в которых  $(x, y)$  – дискретные координаты пикселей матрицы с записями интенсивностей;  $N \times M$  – размер матрицы в пикселях:

$$\Gamma_0(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_0(x - \Delta x, y - \Delta y);$$

$$\Gamma_S(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I_0(x, y) I_S(x - \Delta x, y - \Delta y).$$
(5)

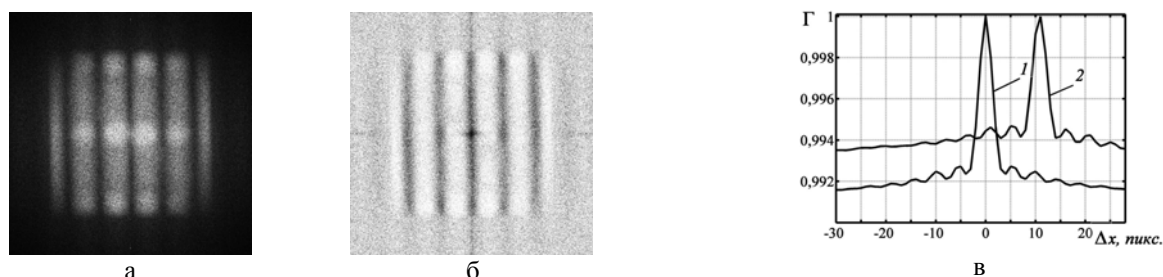


Рис.6. Дифракционное гало с системой интерференционных полос, полученное в натурном эксперименте (а); нормированное дифракционное гало (б); смещение центрального пика функции автокорреляции распределения интенсивности  $I_0(x, y)$  исходного состояния спекл-структуры (1) и функции взаимной корреляции распределений интенсивностей исходного и смещённого состояний спекл-структур  $I_0(x, y)$  и  $I_S(x, y)$  вдоль осей  $\Delta x$  (в);  $\Delta x' = 11$  пикс

Корреляционный метод позволяет извлечь информацию о смещении спекл-структуры только в целых значениях пикселей. Для определения величин микросмещений с субпиксельной точностью необходимо преобразование в область пространственных частот. На рис. 7,а представлено нормированное распределение модуля комплексной амплитуды поля  $H(\xi)$  в дифракционном гало, усредненное по 400 строкам в изображении суммарного пространственного спектра спекл-структур вдоль направлений, параллельным интерференционным полосам.

На графике (рис. 7,а) усреднённого распределения амплитуды проявляются некоторые флуктуации, вызванные спеклами, которые снижают точность определения периода интерференционных полос. Графики, представленные на рис. 7, соответствуют дифракционному гало на рис. 6,а. В автокорреляционной функции распределения модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало случайная модуляция существенно меньше (рис. 7,б). Это позволяет определить с достаточно высокой точностью период интерференционных полос  $\Lambda$  по разности координат глобальных максимумов автокорреляционной функции (рис, 7,б).

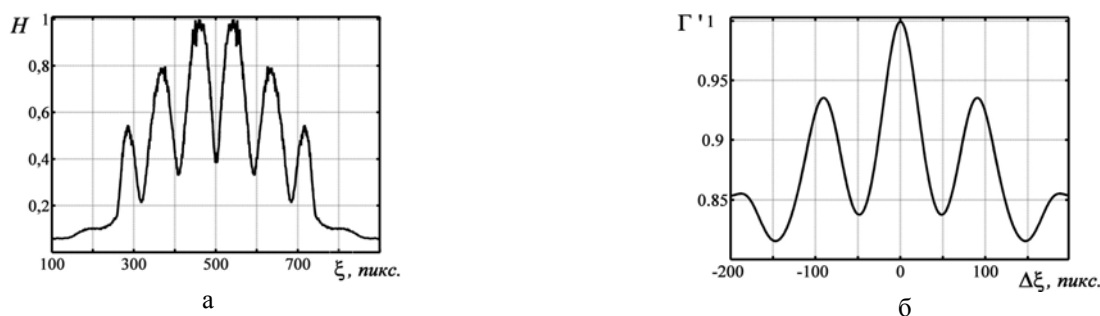


Рис.7. Распределение амплитуды поля в дифракционном гало (рис. 7,а) вдоль оси  $\xi$  (а), усредненное по 400 строкам изображения суммарного пространственного спектра; нормированная функция автокорреляции усредненного распределения амплитуды поля; период интерференционных полос  $\Lambda = 90$  пикс ; смещение спекл-структуры  $\Delta x \approx 11,11$  пикс

Функцию автокорреляции распределения модуля комплексной амплитуды поля в дифракционном гало можно записать с использованием следующего выражения:

$$\Gamma'(\Delta\xi, \Delta\eta) = \sum_{\xi=1}^M \sum_{\eta=1}^N |H(\xi, \eta)| |H(\xi - \Delta\xi, \eta - \Delta\eta)|, \quad (6)$$

где  $H(\xi, \eta)$  - дискретная функция распределения комплексной амплитуды поля в дифракционном гало – в комплексном пространственном спектре разности спекл-структур,  $(\xi, \eta)$  – дискретные координаты – пространственные частоты, расположения пикселей численной матрицы дифракционного гало,  $(\Delta\xi, \Delta\eta)$  – дискретные переменные автокорреляционной функции;  $N \times M$  – размер матрицы в количестве пикселей.

Определяя период интерференционных полос  $\Lambda = 90 \text{ пикс}$  по графику на рис. 8,б и учитывая размер матрицы  $M \times N = 1000 \times 1000$  пикселей, можно определить величину смещения спекл-структуры по формуле (3),  $\Delta x \approx 11,11 \text{ пикс}$ . Период интерференционных полос в пространственном спектре определяется с помощью корреляционного метода с точностью до одного межпиксельного расстояния  $\delta(\Lambda) \approx 1 \text{ пикс}$ . В этом случае абсолютная погрешность определения смещения спекл-структуры составляет  $\delta(\Delta x) \approx (M/\Lambda^2)\delta\Lambda \approx 0,11 \text{ пикс}$ , тогда как корреляционный анализ непосредственно спекл-структур позволяет определить их взаимное смещение только с абсолютной погрешностью  $\delta(\Delta x) \approx 1 \text{ пикс}$ .

На рис. 8 представлены дифракционные гало с различными периодами интерференционных полос, нормированные распределения модуля комплексной амплитуды поля  $H(\xi)$  в дифракционном гало, усредненные по 400 строкам в изображении дифракционного гало вдоль направления, параллельного интерференционным полосам и нормированные функции автокорреляции  $\Gamma'(\Delta\xi)$ . Можно построить функции автокорреляции двумя способами. Первый способ: сначала нужно усреднить распределение амплитуды поля, а затем можно построить функцию автокорреляции (рис. 8,д,е). Второй способ: сначала нужно определить функцию автокорреляции в каждой строке в изображении дифракционного гало вдоль направления, перпендикулярного интерференционным полосам, а затем нужно усреднить полученные автокорреляционные функции (рис. 9).

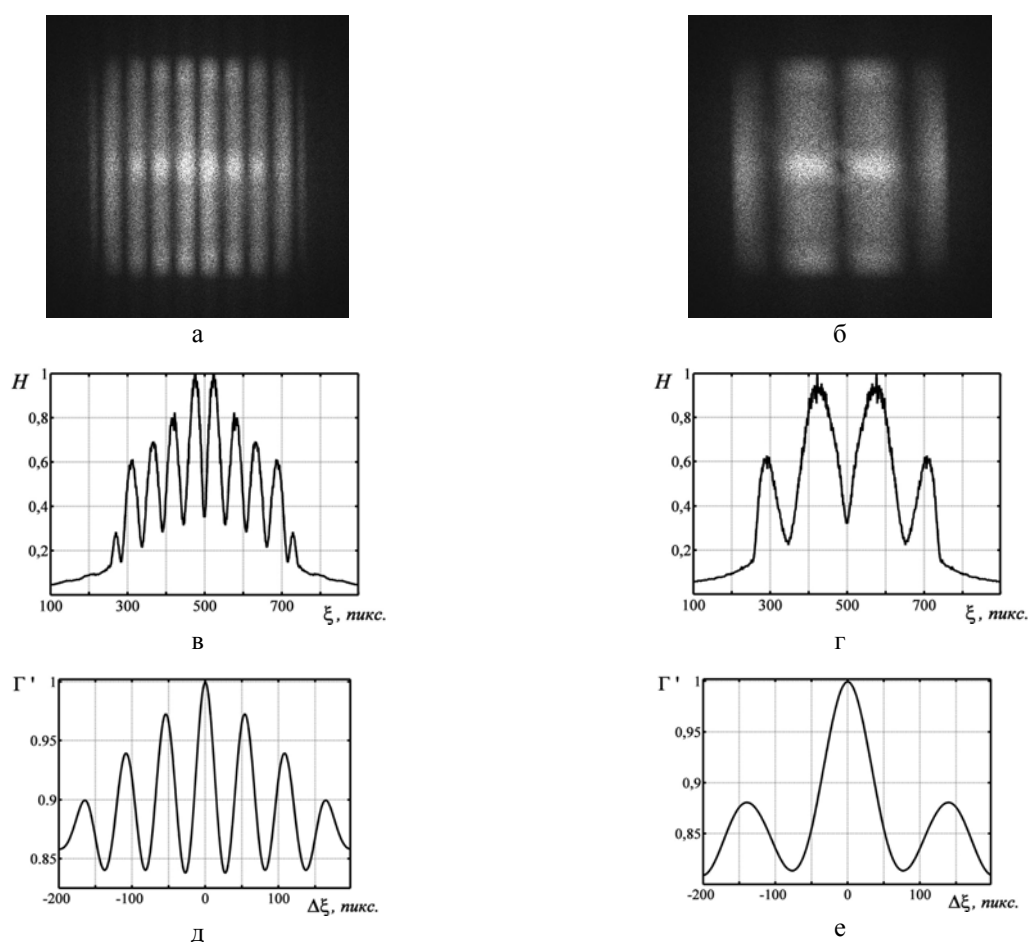


Рис. 8. (а,б) - дифракционные гало с системами интерференционных полос; (в,г) - распределения амплитуды поля в этих гало вдоль оси  $\xi$ , усредненные по 400 строкам изображения дифракционного гало; (д,е) - нормированные функции автокорреляции усредненного распределения амплитуды поля; период интерференционных полос  $\Lambda$  : (а,в,д) -  $\Lambda = 53 \text{ пикс}$ , (б,г,е) -  $\Lambda = 128 \text{ пикс}$ ; смещение спекл-структуры  $\Delta x$  : (а,в,д) -  $\Delta x \approx 18,87 \text{ пикс}$ , (б,г,е) -  $\Delta x \approx 7,81 \text{ пикс}$

Таким образом, использование в методе цифровой спекл-фотографии корреляционного анализа суммарного пространственного спектра спеклограмм позволяет уменьшить абсолютную погрешность в определении смещения спекл-структуры до субпиксельных значений. При использовании корреляционного анализа комплексной амплитуды поля в дифракционном гало существенно снижается случайная модуляция (рис. 8, 9). Это позволяет определить с достаточно высокой точностью величину периода интерференционных полос, следовательно, и смещение спекл-структуры.

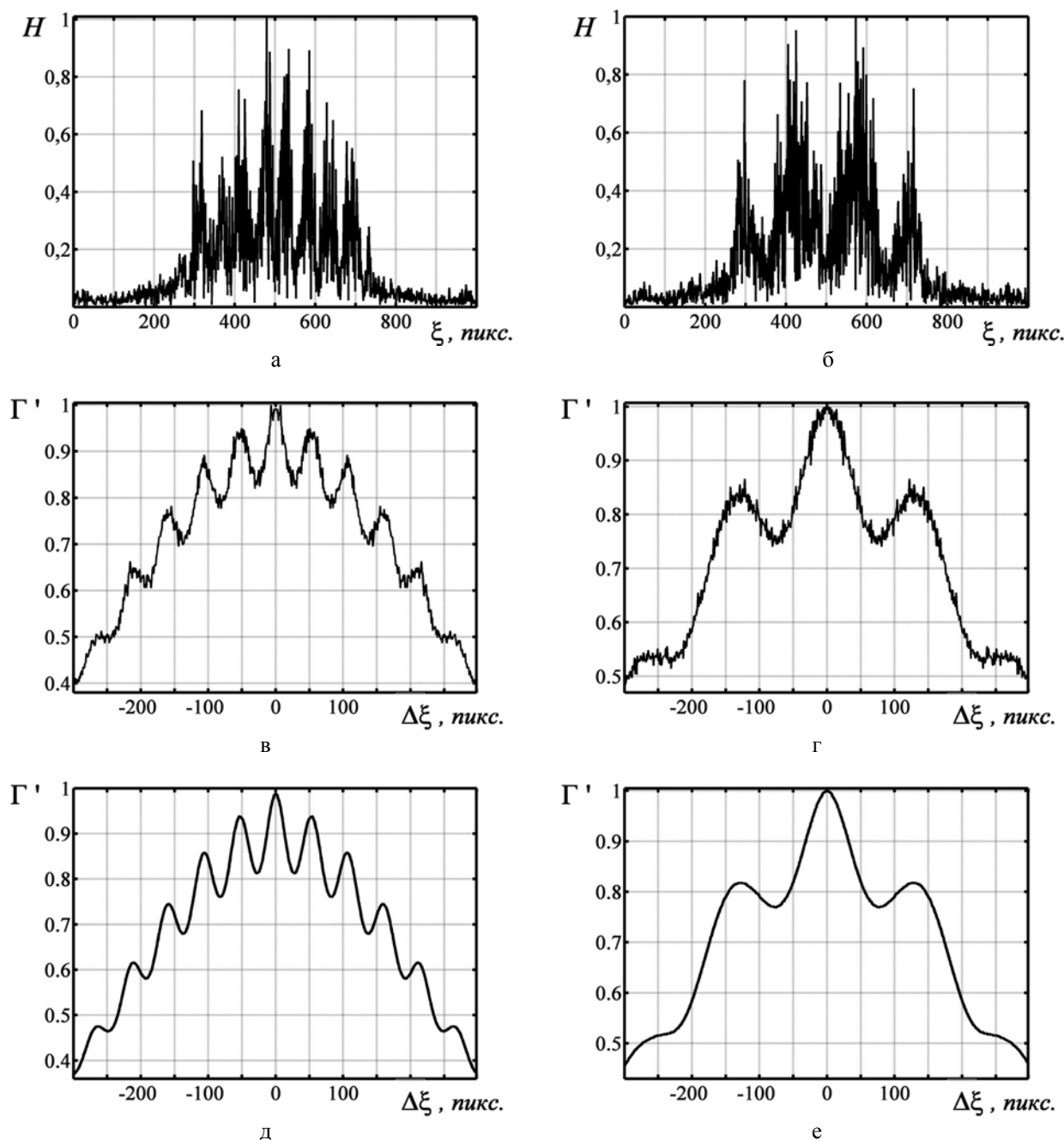


Рис. 9. (а,б) – не усредненные распределения амплитуды поля в дифракционных гало (рис. 8,а,б) вдоль оси  $\xi$ ; (в,г) - нормированные функция автокорреляции этих не усреднённых распределений амплитуды; (д,е) - функция автокорреляции, усредненные по 400 строкам вдоль направления, параллельного интерференционным полосам (рис. 8,а,б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерений микросмещений с субпиксельной точностью или в субпиксельном диапазоне необходимо при реализации метода цифровой спекл-фотографии выполнять численные

преобразования спекл-структур в область их пространственных частот. Период интерференционных полос в суммарном пространственном спектре спекл-структур можно определить корреляционным способом по положению максимумов автокорреляционной функции распределения амплитуды поля в дифракционном гало. Для малых смещений спекл-структуры, когда в дифракционном гало формируется только один минимум интерференционной картины, период интерференционных полос можно определить с помощью метода дополнительного фазового сдвига для смещения интерференционной картины в дифракционном гало на заданную часть периода.

Предложенные в работе методы анализа и обработки пространственного спектра спекл-структур позволяют определять смещение спекл-структуры с субпиксельной точностью, что существенно расширяет диапазон измерений, производимых с помощью метода цифровой спекл-фотографии, в сторону малых величин смещений рассеивающего объекта, и может быть эффективно использовано в практике измерения малых смещений и деформаций рассеивающих объектов.

#### Литература

1. Goodman J.W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. - Roberts & Company, Publishers, Englewood, CO, 2006.
2. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. - М.: Мир, 1986.
3. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. - М.: Наука, 1985.
4. Горбатенко Б.Б., Гребенюк А.А., Максимова Л.А. и др. // Компьютерная оптика. 2010, Т. 34, № 1, с. 69-81.
5. Максимова Л.А., Мысина Н.Ю., Гребенюк А.А. и др. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2011, Т. 11, № 2, с. 40-45.
6. Lu H., Huang C., Wang C., et al. // Appl. Opt. 2014, Vol. 13, p. 2806-2814.
7. Nguyen T.N., Huntley J.M., Burguete R.L. et al. // Opt. Eng. 2011, Vol. 50, p. 101505.
8. Malesa M., Kujawinska M. // Appl. Opt. 2012, Vol. 51, p. 8641-8655.
9. Гудмен, Дж. Статистическая оптика - М.: Мир, 1988.
10. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. - М.: Мир, 1970.

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ГЕНЕРАЦИИ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ

*Зарьков С.В., Конюхов А.И.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского.*

В эксперименте по генерации третьей оптической гармоники получены «биения Мейкера» для образцов плавленого кварца и халькогенидных стёкол с различным составом ( $As_3S_3As_2Se_2As_2Se_2Te$ ,  $As_3Se_3S_3$ ,  $Ge-As-Se-Te$ ). Расчитаны значения нелинейной восприимчивости третьего порядка для стёкол состава  $As_{40}Se_{60}$  и  $As_{30}S_{60}$ .

### Введение

Генерация третьей гармоники (ГТГ) является одним из методов определения нелинейной восприимчивости третьего порядка халькогенидных стекол и других аморфных веществ и кристаллов, обладающих центром симметрии, для которых, как известно, запрещена генерация второй гармоники в электродипольном приближении [1].

Преимущество ГТГ перед другими способами определения нелинейно-оптических характеристик заключается в том, что данный метод позволяет определить чисто электронную нелинейность, отделив от ориентационной, термической и других типов нелинейности. Недостатками данного метода являются невозможность измерения очень больших значений нелинейности, невозможность определения времени нелинейного отклика, а так же высокий уровень помех из-за наличия нелинейности третьего порядка у многих веществ, включая воздух, материал кюветы (для жидких образцов) и т.д., что затрудняет регистрацию сигнала третьей гармоники от исследуемого образца, особенно в случае когда нелинейная восприимчивость исследуемого образца мала.

Динамические нелинейности не могут быть определены с помощью ГТГ. Однако, если фундаментальная и/или третьей гармоники частоты находится возле однофотонной, двухфотонной, или трехфотонной полосы поглощения материала, нелинейная восприимчивость резонансно



усиливается из-за эффекта дисперсии [2]. Интенсивность генерируемой третьей гармоники (ТГ) зависит от рассогласования волновых векторов, которое зависит от разности показателей преломления для длины волны излучения накачки и генерируемого излучения на утроенной частоте. В большинстве веществ они не равны. Исключения составляют оптически-анизотропные кристаллы в которых становится возможен коллинеарный векторный синхронизм благодаря явлению двулучепреломления. В оптически-изотропных средах можно оптимизировать КПД генерации путем регулирования длины взаимодействия. Интенсивность ТГ осциллирует как функция длины взаимодействия. Изменение длины взаимодействия обычно осуществляется путем вращения образца, как в Maker-fringes методе или сдвигом в клиновидном образце, как в Wedge-fringes методе. Важно отметить, что генерация гармоник происходит от нелинейного взаимодействия, рассматриваемого как мгновенное. Такие когерентные нелинейности являются производными только от электронных взаимодействий, не зависящих от населённости возбужденного состояния.

### ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОСПРИИМЧИВОСТЕЙ

Рассмотрение явления ТГ в веществе базируется на решении волнового уравнения в однородной, нелинейной, немагнитной и непроводящей среде в приближении медленно меняющихся амплитуд. Результатом является выражение (1) для зависимости интенсивности света утроенной частоты ( $3\omega$ ) от угла падения (угла поворота пластинки) света с частотой  $\omega$  на исследуемый образец [3]:

$$I_{3\omega} = \frac{576\pi^6}{n_{3\omega}n_{\omega}^2\lambda_{\omega}^2c^2} |\chi^{(3)}|^2 I_{\omega}^3 L^2 \left( \frac{\sin(\Delta k L / 2)}{\Delta k L / 2} \right)^2, \quad (1)$$

где  $n_{3\omega}$  - показатель преломления на длине волны третьей гармоники,  $n_{\omega}$  - показатель преломления на длине волны накачки,  $\lambda$  - длина волны накачки,  $c$  - скорость света,  $\chi^{(3)}$  - электронная нелинейная восприимчивость 3-го порядка,  $I_{\omega}$  - интенсивность излучения падающего на образец,  $L$  - длина оптического пути излучения накачки внутри образца (длина взаимодействия),  $\Delta k = 6\pi(n_{3\omega} - n_{\omega})/\lambda$  - фазовая расстройка,  $I_{3\omega}$  - интенсивность излучения третьей гармоники, выходящего из образца.

Нелинейная восприимчивость образца стекла  $\chi^{(3)}$  определяется по формуле (2):

$$\chi^{(3)} = \left( \frac{n+1}{n_s+1} \right)^4 \frac{\Delta k}{\Delta k_s} \sqrt{\frac{I_{3\omega}}{I_{3\omega s}}} \chi_s^{(3)}, \quad (2)$$

где  $n$  и  $n_s$  - показатели преломления,  $\Delta k$  и  $\Delta k_s$  - фазовые расстройки,  $I_{3\omega}$  и  $I_{3\omega s}$  - интенсивности излучения гармоники для образца халькогенидного и кварцевого стекла соответственно,  $\chi_s^{(3)}$  - нелинейная восприимчивость кварцевого стекла. По известному значению можно вычислить керровскую постоянную  $n_2$  (3):

$$n_2 = \frac{3\pi}{n_{\omega}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \chi^{(3)}, \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная.

Основными факторами, вносящими вклад в вид биений Мейкера являются длина взаимодействия  $L$  и фазовая расстройка  $\Delta k$ , а так же тип поляризации волны  $\omega$ . Эффективная длина взаимодействия без учёта эффекта многофотонного поглощения выражается формулой (3)[2]:

$$L_{eff}(\theta_i) = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L(\theta_i))], \quad (4)$$

где  $\alpha$  - линейный коэффициент поглощения,  $L(\theta_i)$  определяется из закона преломления Снелла (4):

$$L(\theta_i) = d \cdot \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \theta_i}{n_{\omega}} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $\theta_i$  - угол падения (рис. 1),  $d$  - толщина образца,  $n_{\omega}$  - показатель преломления.

Халькогенидные стёкла, например сульфид мышьяка ( $As_{30}S_{60}$ ), в отличие от кварцевого стекла обладают сильным поглощением в УФ области ( $\lambda_{3\omega} = 355$  нм), в которой находится третья гармоника при использовании лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, поэтому большая её часть, генерируемая в

толще стекла, поглощается, и вклад в наблюдаемую  $I_{3\omega}$  вносит только малая её доля, сгенерированная внешним поверхностным слоем стекла. Для образцов  $As_{30}S_{60}$  и  $As_{40}Se_{60}$  при толщине в  $d=1$  мм оценка по формуле (2) даёт значение  $L_{eff} \approx 100$  мкм. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны для селенида мышьяка приведена на рисунке 1 [4].

Спадание интенсивности третьей гармонике по краям определяется коэффициентами Френеля (4) и (5) соответственно для S и P- типов поляризации падающего излучения на частоте  $\omega$  и генерируемого излучения  $3\omega$ :

$$I_s = I_{s0} \cdot \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + n_\omega \cos \theta_t}, \quad (6) \quad I_p = I_{p0} \cdot \frac{2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)}, \quad (7)$$

где  $\theta_t$  – угол преломления луча (внутри образца).

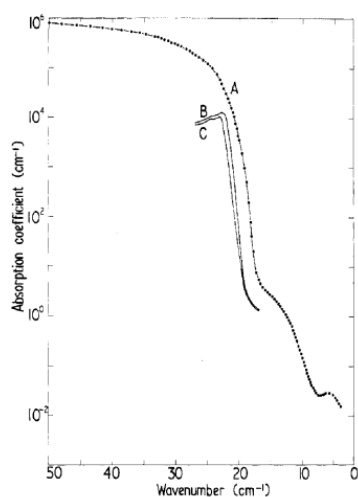


Рис. 1. Коэффициент поглощения сульфида мышьяка, кривая А соответствует стеклообразному состоянию.

Без учёта последних в формуле (1) наблюдается периодическая, не спадающая по краям функция, зависящая только от разности показателей преломления  $n_{3\omega} - n_\omega$ , входящих в  $\Delta k$  и коэффициента линейного поглощения  $\alpha$ , определяющих количество осцилляций  $I_{3\omega}(\theta_i)$  на угловом промежутке (в эксперименте  $\pm 70^\circ$ ).

### ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. В качестве источника излучения используется Nd:Yag лазер, сочетающий наносекундную длительность импульсов с минимальной частотой следования (10-30 Гц). Характеристики лазера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики Nd:Yag лазера

Длина волны $\lambda$ , мкм	1,064
Макс. энергия импульса, мкДж	111
Длительность импульса, пс	16
Ширина пучка, мм	5

Расстояние от линзы  $L$  до образца составляло 25 см. В таблице 2 приведены составы использованных образцов стёкол, их параметры и рассчитанные по формулам (2) и (3) значения  $\chi^{(3)}$  и  $n_2$ . Полученные по формуле (1) аппроксимации для экспериментальных графиков, снятых для образцов кварцевого стекла ( $SiO_2$ ), селенида мышьяка ( $As_{40}Se_{60}$ ) и сульфида мышьяка ( $As_{40}S_{60}$ ) представлены на рисунках 3 - 6. Аппроксимация осуществлялась подбором величины  $n_{3\omega} - n_\omega$ . На рисунках 7 - 16 представлены экспериментальные графики.

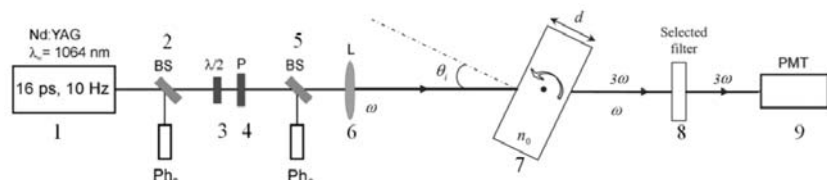
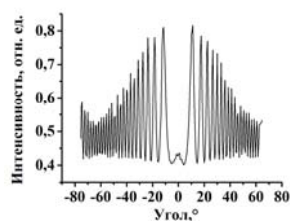


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для ГТГ.

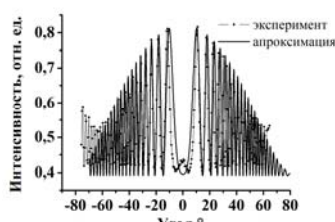
1 – Nd:YAG лазер; 2,5 – делители пучка; 3,4 – поляризатор; 6 – линза; 7 – образец; 8 – спектральный фильтр ( $3\omega$ ); 9 – фотозлектронный умножитель.

Таблица 2. Использованные образцы стёкол и их оптические характеристики.

Образец	$n, 1064 \text{ нм}$	$\alpha, \text{ см}^{-1}$	$\chi^{(3)} \times 10^{-14}, \text{ см}^2/\text{Вт}$	$n_2 \times 10^{-15}, \text{ см}^2/\text{Вт}$
Плав. кварц ( $\text{SiO}_2$ )	1,45	$10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-18}$	$6,5 \times 10^{-27}$
$\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$	2,9	$\geq 90,7$	3,13	1,85
$\text{As}_{40}\text{Se}_{70}$	-	-	-	-
$\text{As}_{30}\text{Se}_{63}\text{Te}_{70}$	-	-	-	-
$\text{As}_{30}\text{Se}_{67}\text{Te}_3$	2,8	-	-	-
$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	2,45	90,7	2,9	1,74
$\text{As}_{40}\text{Se}_{20}\text{S}_{40}$	2,69	-	-	-
$\text{As}_{40}\text{Se}_{15}\text{S}_{45}$	2,74	-	-	-

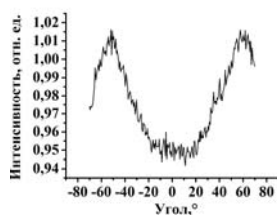


а)

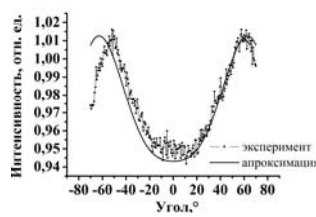


б)

Рис. 3. Биения Мейкера для кварцевого стекла ( $\text{SiO}_2$ ),  $d=2 \text{ мм}$ , Р-поляризация (а)- экспериментальный график, (б) –аппроксимация по формуле(1)

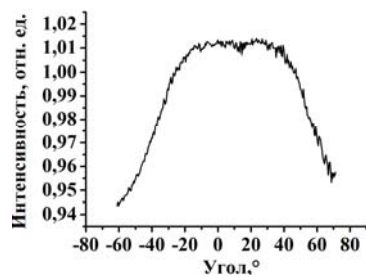


а)

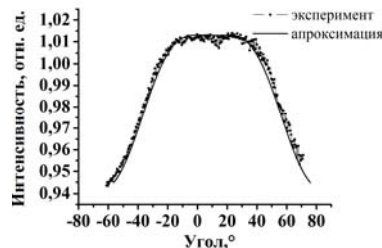


б)

Рис.4. Биения Мейкера для селенида мышьяка ( $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ ),  $d=0,614 \text{ мм}$ , Р-поляризация (а)– экспериментальный график, (б) –аппроксимация по формуле(1)



а)



б)

Рис.5. Биения Мейкера для селенида мышьяка ( $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ ),  $d=0,614 \text{ мм}$ , Р-поляризация (а) – экспериментальный график, (б) –аппроксимация по формуле (1)

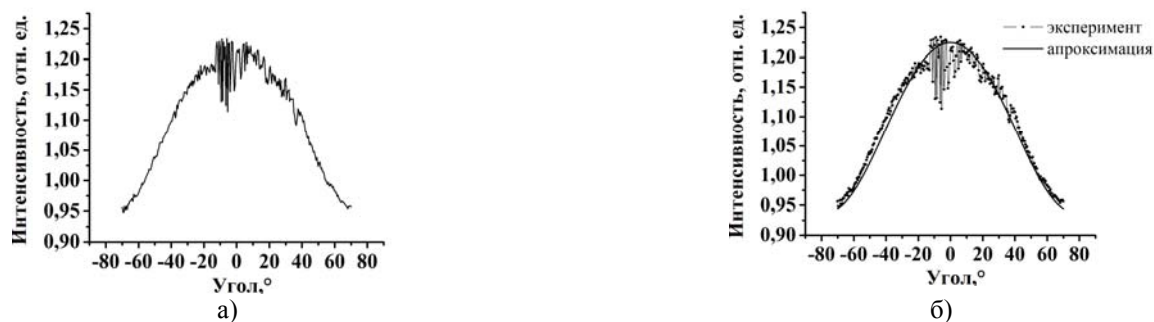


Рис.6. Биения Мейкера для сульфида мышьяка ( $As_{40}S_{60}$ ),  $d=0,618$  мм, S-поляризация  
(а)– экспериментальный график, (б) –аппроксимация по формуле (1)

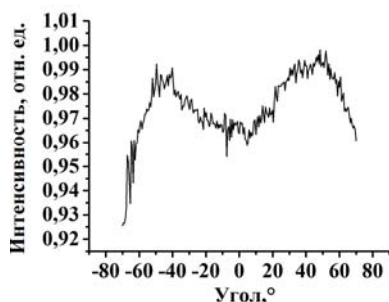


Рис.7.  $As_{40}Se_{60}$ ,  $d=0,614$  мм, S-поляризация

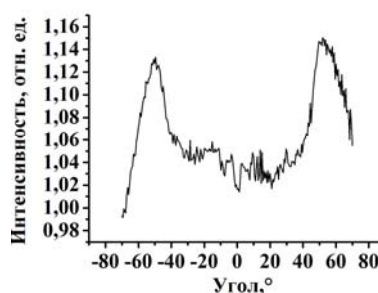


Рис. 8.  $As_{40}Se_{70}$ ,  $d=0,481$  мм, P-поляризация

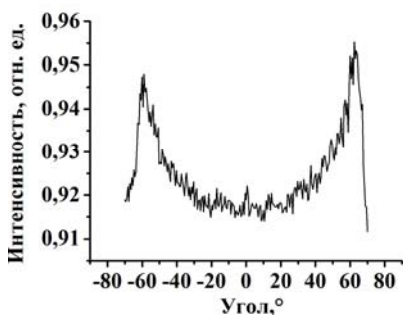


Рис. 9.  $As_{30}Se_{63}Te_{70}$ ,  $d=0,618$  мм, S- поляризация

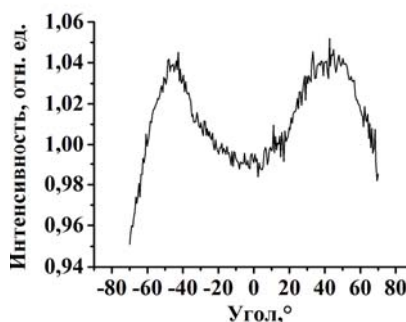


Рис. 10.  $As_{30}Se_{67}Te_3$ ,  $d=0,551$  мм, S-поляризация

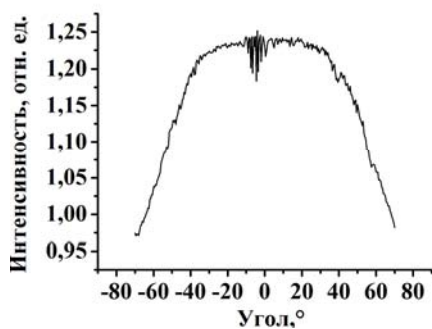


Рис. 11.  $As_{30}S_{60}$ ,  $d=0,618$  мм, P-поляризация

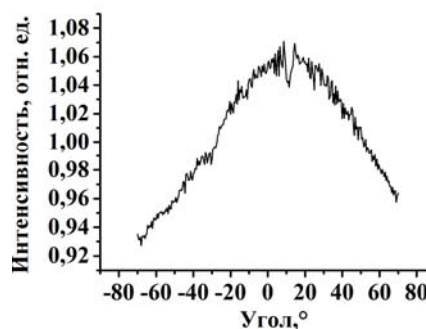


Рис. 12.  $As_{30}S_{60}$ ,  $d=0,618$  мм, S-поляризация

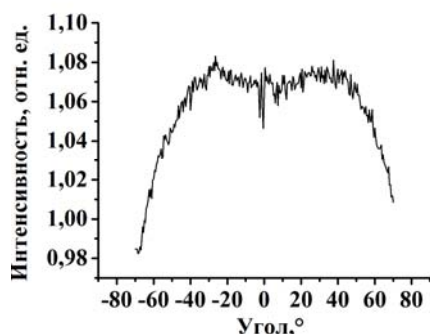


Рис. 13.  $As_{40}Se_{20}S_{40}$ ,  $d=0,834$  мм, P-поляризация

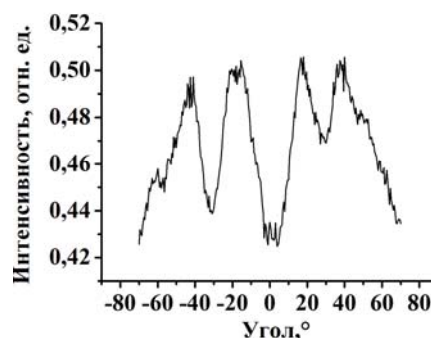


Рис. 14.  $As_{40}Se_{15}S_{45}$ ,  $d=0,636$  мм, S-поляризация

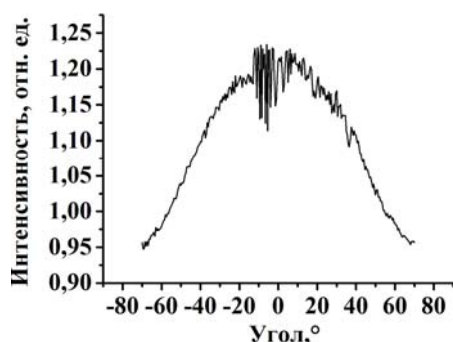


Рис. 15.  $As_{40}Se_{60}$ ,  $d=0,618$  мм, S-поляризация

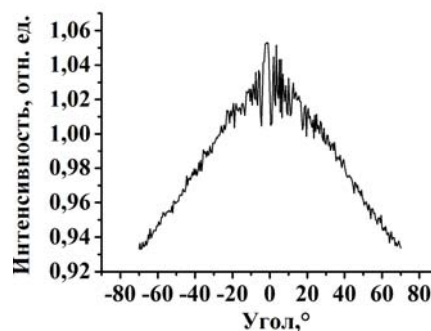


Рис. 16.  $As_{40}Se_{60}$ ,  $d=0,618$  мм, S-поляризация

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены сигналы третьей гармоники для различных составов халькогенидных стёкол. Для образцов селенида мышьяка ( $As_{40}Se_{60}$ ) и сульфида мышьяка ( $As_{40}S_{60}$ ) произведены аппроксимации по формуле (1) и по результатам рассчитаны значения реальной части нелинейной восприимчивости для данных составов стёкол. Стекла исследуемой группы обладают значительным поглощением как на длине волны накачки (1064 нм) так и на длине волны третьей гармоники (355 нм). Поэтому эффективная генерация третьей гармоники происходит в тонком приповерхностном слое при выходе лазерного луча из образца. За счет небольшой толщины приповерхностного слоя фазовая расстройка  $\Delta k$  изменяется незначительно при повороте образца. Поэтому угловая ширина первого максимума биений Мейкера достигает величины 20-30 градусов. Для некоторых образцов первый максимум биений Мейкера зарегистрировать не удалось, т.к. его угловое положение превышает величину 80 градусов. Метод биений Мейкера позволяет оценить величину нелинейности при наличии сильных потерь в стекле, когда использование других методов затруднительно.

### Литература

1. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики - М.:Наука, 1989.
2. Zakery A. and Elliot S.R. Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications - Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. New York, 2007.
3. Sahraoui B., Luc J., Meghea A., et al. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009, Vol. 11, p. 7-11.
4. Young P. A. // J. Phys. C: Solid St. Phys. 1971, Vol. 4, p. 96.

## ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ОБРАЗЦЕ СТЕКЛООБРАЗНОГО СУЛЬФИДА МЫШЬЯКА

Федюкина Н.А., Кузюткина Ю.С., Романова Е.А.

Саратовский Государственный Университет им. Н.Г.Чернышевского

Настоящая статья посвящена изучению нелинейного оптического отклика и кинетики носителей заряда в образце халькогенидного стекла состава  $As_2S_3$  при облучении сверхкоротким лазерным импульсом большой интенсивности на длине волны  $\lambda=0.79$  мкм с помощью трехимпульсного интерферометрического метода "накачка-зондирование".

## ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие в конце XX века оптики сверхкоротких импульсов, волоконной и интегральной оптики привело к созданию новых оптических устройств передачи, обработки и хранения информации. В свою очередь, это послужило основанием для создания и экспериментальных исследований новых нелинейных оптических материалов с заданными свойствами. Актуальной проблемой в данной области является развитие измерительных методик для исследования как линейных, так и нелинейных оптических свойств новых оптических материалов.

При создании нелинейных оптических устройств значения линейного и нелинейного показателей преломления оптических стекол являются наиболее важными параметрами, как и значения линейного и нелинейного коэффициентов поглощения. Эти параметры также ответственны за некоторые фотоиндуцированные явления.

Среди всех оптических стекол, халькогенидные стекла имеют наибольший нелинейный оптический отклик, который характеризуется нелинейной поляризацией третьего порядка [1]. Значения керровской постоянной  $n_2$  в этих стеклах на 2-3 порядка больше, чем в плавленом кварце ( $n_{2(SiO_2)} \approx 2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт), причем нелинейный отклик является быстрым (порядка нескольких фемтосекунд (фс)), что обусловлено электронным характером поляризации среды. Широкий диапазон прозрачности в инфракрасной области спектра, большие значения линейного показателя преломления, вариабельность состава, высокая химическая стабильность – эти свойства определяют растущий интерес к исследованию и применению халькогенидных стекол.

Для измерения нелинейного оптического отклика в халькогенидных стеклах используются различные методы, среди которых наиболее известны метод z-сканирования и методы «накачка-зондирование» [1]. В данной работе рассматривается измерение нелинейного оптического отклика и кинетика фотоиндуцированных носителей заряда в халькогенидных стеклах с использованием трехимпульсного интерферометрического метода «накачка-зондирование» [2].

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения проводились на экспериментальной установке, которая находится в лаборатории по изучению воздействия лазерного излучения на вещество в Техническом университете (Ecole Polytechnique) в г. Палезо (Франция). Оптическая схема установки для измерений трехимпульсным интерферометрическим методом "накачка- зондирование" [2] показана на Рис. 1. Источником излучения является титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы длительностью 50 фс с частотой повторения 20 Гц на длине волны  $\lambda= 0.79$  мкм.

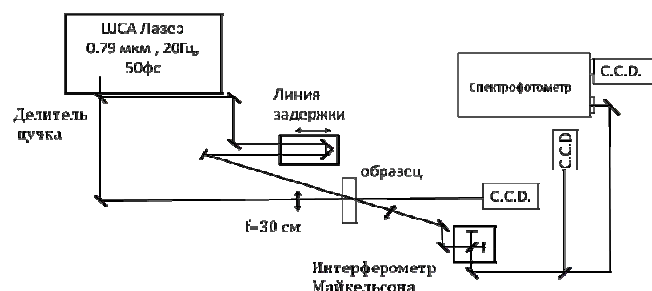


Рис. 1. Оптическая схема для измерений трехимпульсным интерферометрическим методом «накачка-зондирование»

Особенность реализации трехимпульсного интерферометрического метода «накачка-зондирование» в данной установке заключается в том, что два пробных импульса формируются в интерферометре Майкельсона уже после прохождения образца пробным пучком, что отличает эту реализацию от базовой схемы, описанной в [2,3].

Поскольку диаметр пробного пучка в несколько раз превышает диаметр сфокусированного пучка накачки в образце, нелинейная модуляция фазы происходит в узкой центральной области пробного пучка. Это позволяет сложить два пробных импульса, сформированных в интерферометре Майкельсона, таким образом, что на выходе спектрофотометра центральная часть одного пробного импульса перекрывается с периферийной частью другого. По модуляции интерференционной картины в области перекрытия можно определить сдвиг фазы и поглощательную способность  $A$ . Такая конфигурация позволяет исследовать нелинейный оптический отклик при большой (по сути, неограниченной) временной задержке между импульсом накачки и пробным импульсом.

### НЕЛИНЕЙНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В ОБРАЗЦАХ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛА СОСТАВА $As_2S_3$

В данном исследовании проводилась обработка результатов измерений нелинейного оптического отклика в образцах халькогенидного стекла состава  $As_2S_3$  (сульфид мышьяка).

Стекло данного состава было получено методом плавления особо чистых исходных веществ в кварцевой вакуумированной ампуле в комбинации с химико-дистилляционной очисткой расплава [4]. Образцы стекол были изготовлены в виде тонких дисков толщиной от 0.5 мм до 1 мм и оптически отполированы с обеих сторон для получения плоско - параллельных поверхностей.

Измерения проводились при различных энергиях импульса накачки  $E$ : 9.2 мкДж, 4.1 мкДж и 0.3 мкДж.

На Рис.2а показаны усредненные по сечению пучка профили сдвига фазы  $\Delta\Phi$  пробного импульса в зависимости от задержки по времени между импульсом накачки и пробным импульсом. На графике видно, что вначале  $\Delta\Phi$  постепенно нарастает при увеличении временной задержки  $\Delta t$ , что соответствует эффекту самомодуляции фазы импульса накачки и кросс-модуляции фазы пробного импульса в среде с керровской постоянной  $n_2 > 0$ . После достижения максимального значения  $\Delta\Phi$  уменьшается. Чем больше энергия импульса накачки, тем больше максимум кривой  $\Delta\Phi(\Delta t)$  – так называемый «керровский пик», но соответствующая этому максимуму временная задержка пробного импульса фактически не меняется. Появление свободных электронов в зоне проводимости вследствие частичного поглощения импульса накачки приводит к уменьшению максимального значения  $\Delta\Phi$ . Глубина минимума  $\Delta\Phi$  в области отрицательных значений также зависит от энергии импульса накачки. Дальнейшее увеличение  $\Delta\Phi$  и переход в область положительных значений происходит вследствие рекомбинации носителей заряда и их перехода в связанные состояния в запрещенной зоне.

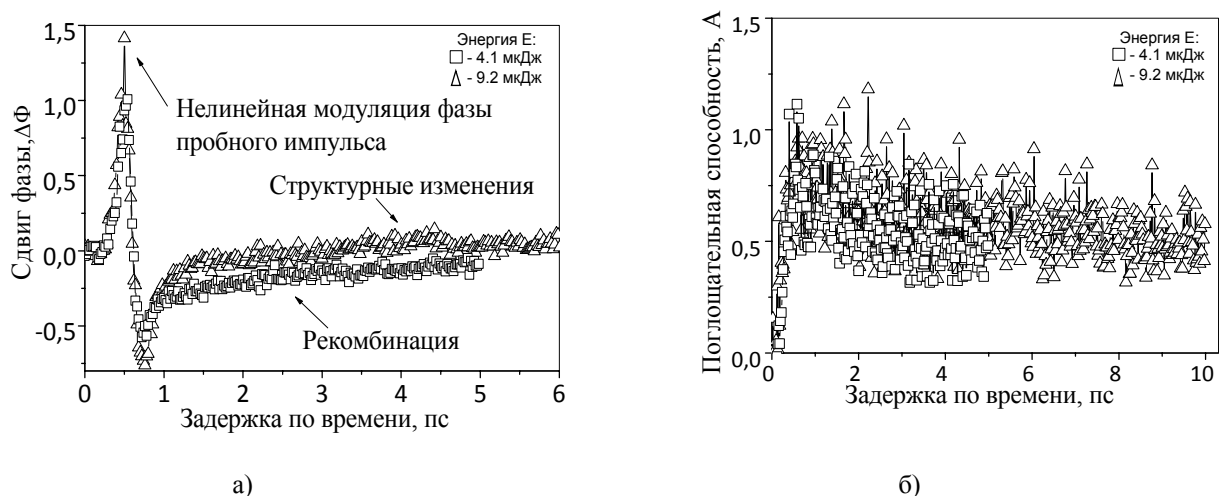


Рис.2. Временная зависимость сдвига фазы (а) и поглощательной способности (б) для образца  $As_2S_3$  при энергиях импульса накачки 9.2 мкДж и 4.1 мкДж.

Отметим, что переход  $\Delta\Phi$  в область положительных значений происходит быстрее при большей энергии импульса накачки по причине более высокой плотности возбужденных электронов и, соответственно, электронно-дырочных пар. В работе [2] такой характер временной динамики наблюдался в кристалле NaCl и объяснялся тем, что в этом случае самозахват дырок происходит сразу же после появления фотоиндуцированных носителей заряда (свободных электронов и дырок). Свободные электроны могут некоторое время перемещаться в образце до рекомбинации или образования связанного состояния.

На Рис.2б представлен график, описывающий временную динамику поглощательной способности исследуемого образца. Поглощательная способность, как и сдвиг фазы, растет до достижения своего максимума при  $\Delta t \approx 0.4-0.6$  пс. Далее  $A$  плавно уменьшается до некоторого значения, зависящего от  $E$ .

На Рис. 3а и 3б представлены профили сдвига фазы и поглощательной способности в зависимости от задержки по времени при энергии импульса накачки  $E=0.3$  мкДж.

Измерения поперечного профиля сдвига фазы пробного импульса и поглощательной способности (Рис.3в,3г, точки) показали, что при малых энергиях импульса накачки ( $E=0.3$  мкДж), когда влияние фотоиндуцированных носителей заряда незначительно, наблюдалось небольшое увеличение ширины пучка – не более 10% [3]. Сплошной линией на Рис.3в,3г показаны гауссовы функции, аппроксимирующие измеренные профили. Используя значения  $A$  и  $\Delta\Phi$  в пиках гауссовых кривых, можно определить значения нелинейных коэффициентов, таких как: керровская постоянная  $n_2$  и коэффициент двухфотонного поглощения  $\beta_2$ . Для образца  $As_2S_3$  были получены значения  $n_2=4.16 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>/Вт и  $\beta_2=1.45$  см/ГВт [3].

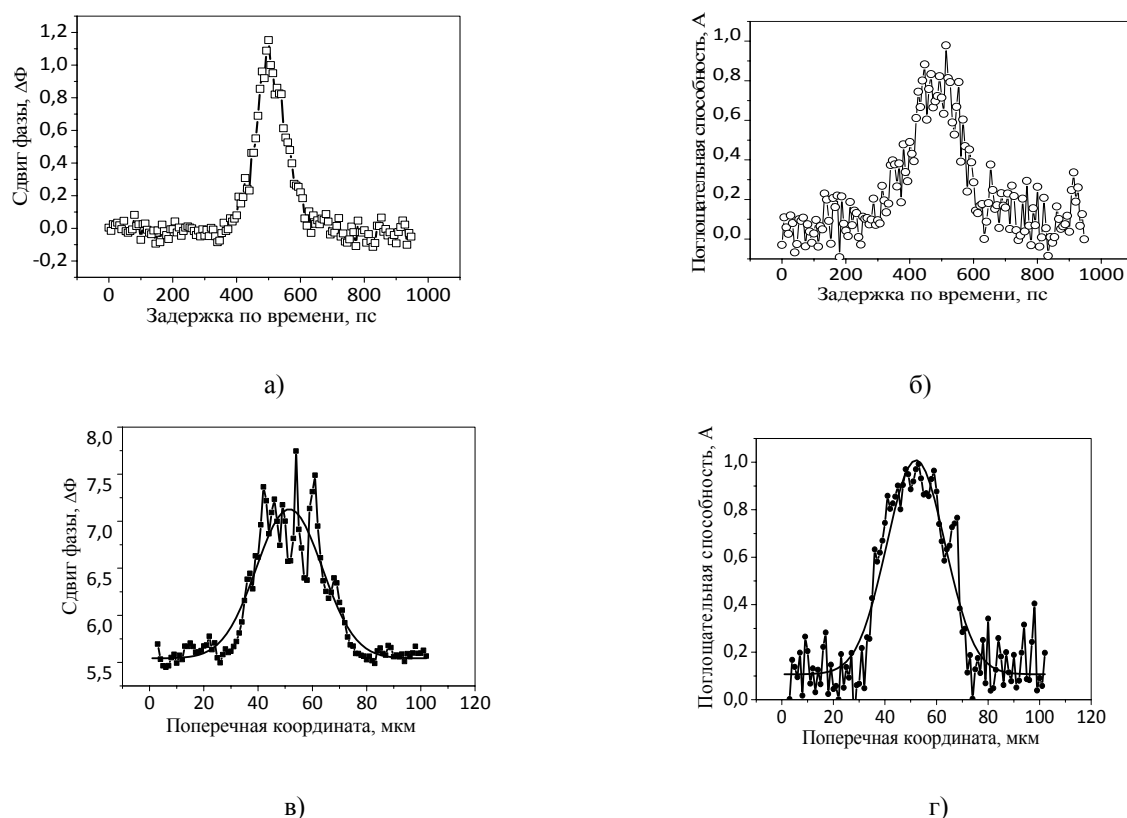


Рис.3. Временная зависимость сдвига фазы (а) и поглощательной способности (б), и поперечные профили сдвига фазы (в) и поглощательной способности (г) для образца  $As_2S_3$  при  $E = 0.3$  мкДж.

### КИНЕТИКА ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Многофотонное поглощение в твердом теле представляет собой процесс, в котором электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости в результате поглощения нескольких фотонов действующего излучения. На Рис. 4(а) схематично показан процесс двухфотонного поглощения.



Лавинная ионизация представляет собой многофотонное возбуждение с последующей ударной ионизацией, когда электроны (дырки) при неупругих взаимодействиях с атомами освобождают вторичные электроны, которые из валентной зоны переходят в зону проводимости. (Рис. 4(б)).

Следующее кинетическое уравнение позволяет определить плотность свободных электронов в зоне проводимости диэлектрика, которую определяет совместное действие многофотонного поглощения и лавинной ионизации:

$$dN / dt = aIN + \sigma I^m, \quad (1)$$

где  $N(t)$  – плотность свободных электронов,  $I(t)$  – интенсивность лазерного импульса,  $a$  – коэффициент лавинной ионизации,  $\sigma$  – сечение  $m$ -фотонного поглощения [5].

Для диэлектриков потери свободных носителей происходят на отрезке времени, сравнимом с длительностью фемтосекундного лазерного импульса. Таким образом, необходимо учесть влияние процессов рекомбинации на плотность свободных электронов.

В зависимости от механизма различают три вида рекомбинации: межзонную, через локальные центры и поверхностную [6].

Межзонная рекомбинация осуществляется при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону и сопровождается аннигиляции электрона и дырки. Межзонная рекомбинация играет основную роль в веществах с шириной запрещенной зоны порядка 0.2...0.3 эВ и меньше.



Рис. 4. Переходы свободного электрона при двухфотонном поглощении (а), при лавинной ионизации (б) и переход фотоиндуцированных электронов в связанные состояния (экситоны) в запрещенной зоне (в).

Если ширина зоны более 0.5 эВ, то при наличии в кристалле дефектов, энергетические уровни которых лежат в запрещенной зоне, возможен процесс рекомбинации через локальные центры. В этом случае дефект решетки, способный захватить свободный электрон и/или дырку, называют рекомбинационной ловушкой. Для того, чтобы дефект привел к рекомбинации (аннигиляции) пары электрон-дырка, он должен взаимодействовать как с зоной проводимости, так и с валентной зоной.

Поверхностная рекомбинация происходит через поверхностные рекомбинационные ловушки. Наконец, возможна и экситонная рекомбинация (Рис.4(в)), когда электрон и дырка образуют в качестве промежуточного состояния экситон – квазичастицу, соответствующую электронному возбуждению в кристалле диэлектрика, мигрирующему по кристаллу, но не связанному с переносом электрического заряда и массы.

#### КИНЕТИКА ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОБРАЗЦАХ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛА СОСТАВА $AS_2S_3$

В соответствии с представленным выше описанием динамики нелинейного оптического отклика в образце трисульфида мышьяка, кинетика фотоиндуцированных носителей заряда происходит следующим образом. При поглощении лазерного излучения возникают свободные носители зарядов: электроны и дырки. Потом дырки переходят в связанные состояния, а электроны продолжают находиться в зоне проводимости, перемещаясь в объеме образца, после чего они захватываются дырками, т.е происходит рекомбинация с переходом в связанное состояние.

Динамике нелинейного оптического отклика на Рис.2 соответствует характер кинетики носителей заряда, выраженный следующей системой уравнений:

$$dN_{fh} / dt = \sigma_2 I^2 - N_{fh} / \tau \quad (2a)$$

$$dN_{th} / dt = dN_{fh} / \tau \quad (2б)$$

$$dN_{tr} / dt = \sigma_c N_e (N_{th} - N_{tr}) \quad (2в)$$

$$dN_e / dt = \sigma_2 I^2 - \sigma_c N_e (N_{th} - N_{tr}) \quad (2г)$$

где  $N_{th}$  - плотность захваченных дырок,  $N_{fh}$  - плотность свободных дырок,  $N_{tr}$  - плотность захваченных электронов,  $N_e$  - плотность свободных электронов,  $\sigma_2 = \beta_2 / (2 \cdot h \nu)$ ,  $\tau$  - время рекомбинации,  $\sigma_c$  - сечение захвата электронов.

Теперь нормируем плотности носителей заряда в системе уравнений (2) на величину  $N_c = (\omega^2 \varepsilon_0 m^*) / e^2$ , которая является критической плотностью плазмы ( $\omega$  - частота лазерного импульса,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость в вакууме,  $m^*$  - эффективная масса электрона в зоне проводимости,  $e$  - заряд электрона). Введем нормированные переменные:  $n_e = N_e / N_c$ ,  $n_{fh} = N_{fh} / N_c$ ,  $n_{tr} = N_{tr} / N_c$ ,  $n_{th} = N_{th} / N_c$  и перепишем (2) в следующем виде:

$$dn_{fh} / dt = \sigma_2 I^2 / N_c - n_{fh} / \tau \quad (3a)$$

$$dn_{th} / dt = dn_{fh} / \tau \quad (3б)$$

$$dn_{tr} / dt = (\sigma_c / N_c) n_e (n_{th} - n_{tr}) \quad (3в)$$

$$dn_e / dt = (\sigma_2 I^2 / N_c) - (\sigma_c / N_c) n_e (n_{th} - n_{tr}) \quad (3г)$$

На Рисунке 5 показано решение системы (3) при следующих значениях параметров:  $I = 50 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  фс,  $N_c = 4.48 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>,  $\beta_2 = 1.45$  см/ГВт.

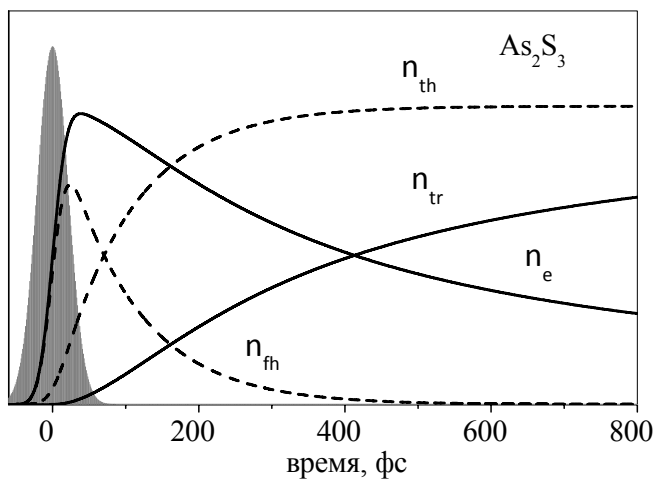


Рис.5. Кинетика фотоиндуцированных носителей заряда на передней поверхности образца трисульфида мышьяка

Сдвиг фазы пропорционален величине изменения показателя преломления  $\Delta n(r,t)$ :

$$\Delta \Phi(r,t) = \Delta n(r,t) \cdot 2\pi \cdot L / \lambda \quad (4)$$

где

$$\Delta n(r,t) \approx n_2 I_p + \frac{e^2}{2n_0 \varepsilon_0} \left\{ -\frac{N_e f_{CB}}{m^* \cdot \omega^2} + \frac{N_{tr} f_{tr}}{m \cdot (\omega_{tr}^2 - \omega^2)} \right\}. \quad (5)$$

Здесь  $I_p$  - интенсивность пучка накачки,  $n_2$  - нелинейный показатель преломления,  $n_0$  - показатель преломления стекла,  $e$  - заряд электрона,  $m$  - масса электрона,  $\omega$  - частота пробного импульса,  $f_{CB}$  - сила осциллятора, соответствующая переходу в зону проводимости,  $\omega_{tr}$  - частота перехода с первого дефектного уровня на основной уровень,  $f_{tr}$  - сила осциллятора, соответствующая переходу на дефектный уровень.

Первое слагаемое в (5) соответствует керровской нелинейности, а второе - кинетике фотоиндуцированных носителей заряда. Определим изменение показателя преломления в образце, вызванное появлением свободных электронов и их последующим переходом в связанные состояния:

$$\Delta n(r,t) \approx \frac{e^2}{2n_0 \varepsilon_0} \left\{ -\frac{N_e f_{CB}}{m^* \cdot \omega^2} + \frac{N_{tr} f_{tr}}{m \cdot (\omega_{tr}^2 - \omega^2)} \right\} \quad (6)$$

Из этого следует, что

$$\Delta \Phi(r,t) = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot \frac{e^2}{2n_0 \varepsilon_0} \left\{ -\frac{N_e f_{CB}}{m^* \cdot \omega^2} + \frac{N_{tr} f_{tr}}{m \cdot (\omega_{tr}^2 - \omega^2)} \right\} \quad (7)$$

Вынесем множитель  $(m^* \cdot \omega^2)^{-1}$  за скобку

$$\Delta \Phi(r,t) = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot \frac{e^2}{2n_0 \varepsilon_0 m^* \cdot \omega^2} \left\{ -N_e f_{CB} + (N_{tr} f_{tr} / (\frac{m}{m^*} \cdot (\frac{\omega_{tr}^2}{\omega^2} - 1))) \right\} \quad (8)$$

Сделаем замену  $e^2 / \varepsilon_0 m^* \cdot \omega^2 = 1 / N_c$  и внесем этот множитель внутрь скобки:

$$\Delta \Phi(r,t) = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot \frac{1}{2n_0} \left\{ -\frac{N_e}{N_c} f_{CB} + (N_{tr} / N_c) \cdot (f_{tr} / (\frac{m}{m^*} \cdot (\frac{\omega_{tr}^2}{\omega^2} - 1))) \right\} \quad (9)$$

На Рис.6 показано изменение фазы, полученное при следующих значениях основных параметров:  $I_1 = 50 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $I_2 = 2I_1$ ,  $L = 0.7$  мм,  $f_{CB} = 1$ ,  $f_{tr} = 0.25$ ,  $\omega_{tr} = 2.96 \cdot 10^{15}$  рад/с. Видно, что временная задержка, при которой сдвиг фазы становится равным нулю при переходе к положительным значениям, зависит от  $E$ .

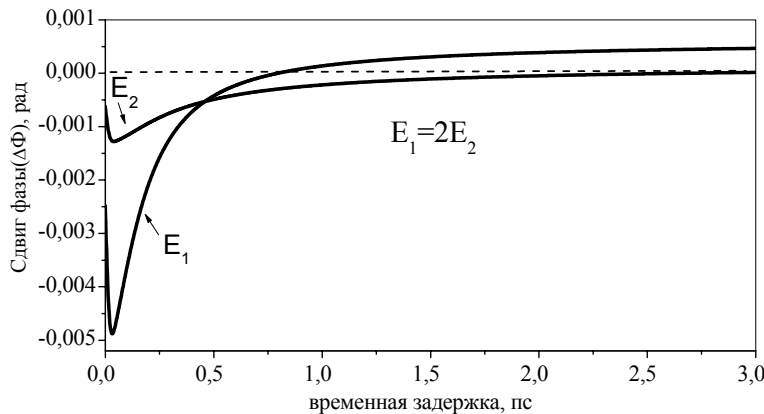


Рис.6. Изменение фазы пробного импульса вследствие кинетики носителей заряда в образце трисульфида мышьяка толщиной  $L$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследован нелинейно-оптический отклик в образце халькогенидного стекла состава  $As_2S_3$  трехимпульсным интерферометрическим методом «накачка-зондирование». Измерены сдвиг фазы и поглощательная способность для пробного импульса в зависимости от задержке по времени относительно импульса накачки. По результатам измерений получены значения керровской постоянной и коэффициента двухфотонного поглощения. На основе анализа графиков для изменения фазы при различных энергиях импульса накачки была построена кинетическая модель для плотности фотоиндуцированных носителей заряда. Правильность данной модели подтверждается согласием расчетов с результатами измерений.

### Литература

1. Zakery A., Elliot S.R. Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
2. Martin P., Guizard S., Daguzan Ph., et al. // Phys. Rev. 1997, Vol. B 55, p. 5799.
3. Федюкина Н.А., Кузюткина Ю.С., Денисова Е.П. и др. Изучение нелинейного оптического отклика халькогенидных стекол методом "накачка-зондирование", Проблемы оптической физики и биофотоники, SFM-2014, Саратов, 2014. с.64-70.
4. Abdel-Moneim N., Fabrication of Planar Optical Components in Chalcogenide glasses, PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Nottingham, 2013.
5. Guizard S., Mao S.S., Quere F., et al. // Applied Physics A 2004, Vol. 79, p. 1695–1709.
6. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках - М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.

## ЭФФЕКТЫ ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ КОРОТКИХ ПРОБНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО ИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

*Паришков О. М., Кочеткова А. Е, Будяк В. В.*

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.*

Приведены результаты численного анализа эволюции излучений при электромагнитно индуцированной прозрачности в схеме  $J = 0 \rightarrow J = 1 \rightarrow J = 2$  вырожденных квантовых переходов в импульсном режиме взаимодействия полей с учётом доплеровского уширения спектральных линий. Показано, что при линейной поляризации входного управляющего излучения поляризованный по кругу входной пробный импульс в среде распадается на импульсы с взаимно перпендикулярными линейными поляризациями. Направление поляризации одного из этих импульсов совпадает с направлением поляризации входного управляющего поля.

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитно индуцированная прозрачность (ЭМИП) [1] является одним из наиболее известных эффектов когерентной оптики, имеющих как теоретическое, так и прикладное значение. Принципы ЭМИП положены в основу значительного прогресса в областях нелинейной оптики и теории квантовой информации [1–3], квантовых коммуникаций [3–5], оптических систем квантовой памяти [3], систем точной магнитометрии [6] и хронометрии [7].

Изучение ЭМИП на вырожденных квантовых переходах открыло новые черты этого явления, среди которых важное место занимают эффекты изменения состояний поляризации взаимодействующих полей. Так, например, в [8, 9] теоретически и экспериментально исследовалось вращение плоскости поляризации пробного поля при изменении напряжённости управляющего излучения. В [10, 11] теоретически и экспериментально изучалось влияние постоянного магнитного поля на процесс эволюции круговых компонент пробного излучения в условиях ЭМИП. Линейное и круговое двойное лучепреломление пробного поля при ЭМИП изучалось теоретически и экспериментально в работе [12, 13], а нелинейный эффект Фарадея исследовался в работе [14]. В работе [15] предсказана возможность распространения пробного поля ЭМИП в виде двух мод с различными состояниями поляризации.

В нашем сообщении приводятся результаты расчетов, показывающие, что ЭМИП может сопровождаться нестационарным линейным двойным лучепреломлением. Этот эффект проявляется как распад в среде поляризованного по кругу входного пробного импульса на линейно поляризованные субимпульсы в случае линейной поляризации входного пробного излучения. Расчёты проводились для схемы квантовых переходов между вырожденными энергетическими уровнями  ${}^3P_0$ ,  ${}^3P_1^0$ ,  ${}^3P_2$ , изотопа  ${}^{208}\text{Pb}$ , в парах которого наблюдалось ЭМИП поляризованных по кругу лазерных полей [16, 17].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим схему  $J=0 \rightarrow J=1 \rightarrow J=2$  квантовых переходов, образованную уровнями  ${}^3P_0$ ,  ${}^3P_1^0$ ,  ${}^3P_2$  изотопа  ${}^{208}\text{Pb}$ . Выберем ось  $z$  в качестве оси квантования. Пусть  $\phi_k$  ( $k=1, 2 \dots 9$ ) – общие собственные функции операторов энергии, квадрата момента импульса и проекции момента импульса на ось  $z$  для изолированного атома, соответствующие нижнему ( $k=1$ ,  $M=0$ ), верхнему ( $k=2, 3, 4$ ,  $M=-1, 0, 1$ ) и среднему ( $k=5, 6, \dots 9$ ,  $M=-2, -1, 0, 1, 2$ ) уровням. Пусть  $D_1$  и  $D_2$  – приведённые электродипольные моменты переходов  ${}^3P_0 \rightarrow {}^3P_1^0$  и  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3P_1^0$  соответственно, а  $\omega_1$  и  $\omega_2$  ( $\omega_1 > \omega_2$ ) – частоты этих переходов для покоящегося атома. Определим время неоднородного уширения  $T_1$  формулой  $T_1 = 1/\Delta_1$ , где  $\Delta_1$  – полуширина (по уровню  $e^{-1}$  высоты) графика плотности распределения частот  $\omega'_l$  переходов  ${}^3P_0 \rightarrow {}^3P_1^0$  движущихся атомов из-за эффекта Доплера.

Электрическое поле двух лазерных излучений, распространяющихся вдоль оси  $z$ , имеющих несущие частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (пробный и управляющий импульс соответственно), представим в виде суммы плоских волн

$$E = \text{Re} \sum_{l=1}^2 \mu_l (e_+ f_l + e_- g_l) \exp[i\omega_l(t - z/c)], \quad (1)$$

где  $\mu_l = \hbar \sqrt{2l+1} / (|D_l| T_1)$ ,  $e_+ = e_-^* = (\mathbf{i} + j)/2$ ,  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  – орт-векторы осей  $x$  и  $y$ ,  $f_l$ ,  $g_l$  – комплексные амплитуды  $\sigma_-$  и  $\sigma_+$  круговых компонент пробного ( $l=1$ ) и управляющего ( $l=2$ ) полей, зависящие от  $z$  и  $t$ . (Согласно [18]  $\sigma_-$  и  $\sigma_+$  именуется также правой и левой круговыми компонентами, соответственно)

Полагая, что набор функций  $\phi_k$  ( $k=1, 2 \dots 9$ ) является ортонормированным базисом, представим волновую функцию атома в виде

$$\Psi = \bar{c}_1 \phi_1 + \left( \sum_{k=2}^4 \bar{c}_k \phi_k \right) \exp(-i\xi_1) + \left( \sum_{k=5}^9 \bar{c}_k \phi_k \right) \exp[-i(\xi_1 - \xi_2)],$$

где  $\xi_l = \omega_l(t - z/c)$ ,  $l=1, 2$ . Введём величины  $c_l$  по следующим формулам:

$$c_1 = p_1^* \bar{c}_1, \quad c_2 = \bar{c}_2, \quad c_4 = \bar{c}_4, \quad c_5 = p_2 \bar{c}_5, \quad c_7 = (1/\sqrt{6}) p_2 \bar{c}_7, \quad c_9 = p_2 \bar{c}_9, \quad (2)$$

где  $p_l = 2D_l / |D_l|$ ,  $l=1, 2$ . В качестве безразмерных независимых переменных выберем величины  $s$  и  $w$ :

$$s = z/z_0, \quad w = (t - z/c)/T_1, \quad (3)$$

где  $z_0 = 3\hbar c / (2\pi N |D_1|^2 T_1 \omega_1)$ ,  $N$  – концентрация атомов. Исходя из уравнений Максвелла и Шредингера получаем в приближении медленных огибающих для величин, определяемых формулами (1) – (3), следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial s} &= \frac{i}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} c_1 c_2^* \exp(-\varepsilon_1^2) d\varepsilon_1, & \frac{\partial f_2}{\partial s} &= -\frac{i}{\sqrt{\pi}} \xi \int_{-\infty}^{+\infty} (c_4^* c_9 + c_2^* c_7) \exp(-\varepsilon_1^2) d\varepsilon_1, \\ \frac{\partial g_1}{\partial s} &= -\frac{i}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} c_1 c_4^* \exp(-\varepsilon_1^2) d\varepsilon_1, & \frac{\partial g_2}{\partial s} &= \frac{i}{\sqrt{\pi}} \xi \int_{-\infty}^{+\infty} (c_2^* c_5 + c_4^* c_7) \exp(-\varepsilon_1^2) d\varepsilon_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial c_1}{\partial w} &= -i(f_1 c_2 - g_1 c_4), & \frac{\partial c_2}{\partial w} + i\varepsilon_1 c_2 &= -\frac{i}{4}(f_1^* c_1 + g_2^* c_5 - f_2^* c_7) - \gamma c_2, \\
 \frac{\partial c_4}{\partial w} + i\varepsilon_1 c_4 &= \frac{i}{4}(g_1^* c_1 - g_2^* c_7 + f_2^* c_9) - \gamma c_4, & \frac{\partial c_5}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_5 &= -ig_2 c_2, \\
 \frac{\partial c_7}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_7 &= \frac{i}{6}(f_2 c_2 - g_2 c_4), & \frac{\partial c_9}{\partial w} + i(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) c_9 &= -if_2 c_4,
 \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\varepsilon_1 = (\omega'_1 - \omega_1)/\Delta_1, \quad \varepsilon_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} \varepsilon_1, \quad \xi = 0.75 \frac{\omega_2}{\omega_1} |D_2/D_1|^2.$$

Ввиду правил отбора  $\Delta M = \pm 1$  для переходов под действием круговых компонент поля (1) амплитуды  $\bar{c}_3$ ,  $\bar{c}_6$  и  $\bar{c}_8$  не входят в систему (4). Учёт доплеровского уширения линий квантовых переходов привёл к появлению интегралов в первых четырех уравнениях системы (4). В уравнения для  $c_2$  и  $c_4$  феноменологически введены слагаемые  $-\gamma c_2$  и  $-\gamma c_4$  для учёта спонтанного распада состояний верхнего уровня  ${}^3P_1^0$ . Здесь  $\gamma = T_1/(2\tau)$ , где  $\tau$  – радиационное время жизни этого энергетического уровня.

Для описания излучений используются параметры  $a_l$ ,  $\alpha_l$ ,  $\gamma_l$  эллипса поляризации пробного ( $l=1$ ) и управляющего ( $l=2$ ) излучений. Здесь  $a_l$  – большая полуось эллипса, измеренная в единицах  $\mu_l$ ,  $\alpha_l$  – угол её наклона к оси  $x$ ,  $\gamma_l$  – параметр сжатия ( $a_l \geq 0$ ,  $0 \leq \alpha_l < \pi$ ,  $-1 \leq \gamma_l \leq +1$  [18]). Величина  $|\gamma_l|$  определяет отношение малой оси эллипса к его большой оси. При  $0 < \gamma_l < +1$  ( $-1 < \gamma_l < 0$ ) излучение имеет правую (левую) эллиптическую поляризацию,  $\gamma_l = 0$  соответствует линейной поляризации; при  $\gamma_l = 1$  поляризация правая круговая ( $\sigma_-$  поляризация), при  $\gamma_l = -1$  – левая круговая ( $\sigma_+$  поляризация). При  $|\gamma_l| = 1$  угол  $\alpha_l$  не определён, и в наших расчётах формально полагается равным  $-0.1$ .

Система уравнений (4) дополнялась граничными условиями, описывающими пробное излучение на входной поверхности  $s = 0$  резонансной среды

$$\alpha_1 = -0.1, \quad a_1 = a_{10} \operatorname{sech}[(w - w_0)/\tau_1], \quad \gamma_1 = -1, \quad (5)$$

а входное поле контролирующего излучения задавалось соотношениями

$$\alpha_2 = 0.5, \quad a_2 = a_{20}, \quad \gamma_2 = 0, \quad (6)$$

где  $a_{l0}$ , ( $l=1, 2$ ),  $w_0$  и  $\tau_1$ , – постоянные величины. Равенства (5) описывают входной колоколообразный поляризованный по кругу импульс пробного излучения с длительностью  $1.76\tau_1$  (по уровню половины пикового значения интенсивности) в шкале времени  $w$ . Равенства (6) описывают линейно поляризованное (под углом  $0.5$  радиан к оси  $x$ ) входное управляющее излучение, интенсивность которого не меняется в течение всего процесса взаимодействия волн. Начальные условия, используемые при решении системы (4), заключались в предположении, что в момент времени  $w = 0$  заселено только основное состояние  ${}^3P_0$ .

Расчёты проводились для схемы, образуемой уровнями  ${}^3P_0$ ,  ${}^3P_1^0$ ,  ${}^3P_2$  изотопа  ${}^{208}\text{Pb}$ . Согласно [19], для выбранных переходов  $\omega_2/\omega_1 = 0.7$ ,  $\xi = 2.11$  и (при  $T = 900 - 1000$  К)  $\gamma = 1.5 \times 10^{-2}$ ,  $T_1 = 1.6 \times 10^{-10}$  с. Выбирая для оценок насыщенные пары  ${}^{208}\text{Pb}$  и используя данные [20], находим при той же температуре  $N = 3.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $z_0 = 0.03$  см. Время  $\tau$  радиационного распада уровня  ${}^3P_1^0$ , играющее при низких плотностях паров роль времени необратимой релаксации квантовой системы, составляет около  $6$  нс [19]. Отметим, что параметр  $z_0$  по порядку величины совпадает с расстоянием, на котором за счёт неоднородного уширения интенсивность слабого пробного импульса уменьшается примерно в  $e$  раз при отсутствии управляющего поля.

Для представления результатов расчётов используются безразмерные интенсивности  $I_l$ ,  $l=1,2$  – плотности потока энергии пробного ( $l=1$ ) и управляющего ( $l=2$ ) полей, измеряемые в единицах  $c\mu_1^2/(8\pi)$ . Размерные интенсивности  $\bar{I}_l$  пробного и управляющего полей при температурах вблизи 1000К можно оценить в кВт/см<sup>2</sup> по формулам  $\bar{I}_l = 1.3I_l$ . Пропускание  $Tr$  характеризует прозрачность среды для пробного излучения и определяется формулой  $Tr = W_1(s)/W_1(0)$ , где  $W_1(0)$  и  $W_1(s)$  – энергии (в расчёте на единицу площади поперечного сечения) пробного импульса на входе в резонансную среду и на расстоянии  $s$  внутри среды соответственно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

*А. Мощный входной пробный импульс большой малой длительности.* Положим в (5)  $a_{10} = 1.41$ ,  $\tau_1 = 5$ ,  $w_0 = 20$ , а в (6) будем последовательно полагать  $a_{20} = 4.9$  (ниже расчёт 1) и  $a_{20} = 6.9$  (расчёт 2). В (4) полагаем  $\gamma = 1.5 \times 10^{-2}$ , что реализуется при температуре 950 К паров <sup>208</sup>Pb ( $T_1 = 1.63 \times 10^{-10}$  с). Сделанный выбор исходных данных означает, что при указанной температуре входной пробный импульс имеет длительность 1.5 нс и пиковую интенсивность около 5 кВт/см<sup>2</sup>, при интенсивности входного управляющего излучения примерно в 10 и 20 кВт/см<sup>2</sup> соответственно. Такой пробный импульс далее именуется коротким и мощным.

На рис.1 представлены зависимости от  $w$  величин  $I_1$  и  $I_2$  для нескольких фиксированных значений расстояния  $s$ . Сплошные толстые и тонкие кривые на рис.1,  $a - z$  описывают соответственно интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  в случае расчёта 1. Пунктирные толстые линии описывают величину  $I_1$ , а тонкие пунктирные линии – величину  $I_2$  для расчёта 2. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в обоих случаях входной импульс пробного излучения внутри среды распадается на два обособленных импульса, распространяющихся с различными скоростями. На кривых  $I_2$  имеется “горб”, движущийся со скоростью света в вакууме, а в области каждого пробного импульса – “провал”, причём скорости пробных импульсов значительно меньше скорости “горба”.

Отметим, задача о ЭМИП в  $\Lambda$ - схеме невырожденных уровней без учёта неоднородного уширения была решена аналитически в работах [21, 22] при аналогичных нашим условиям, накладываемых на интенсивности входных излучений. Результатом указанных работ явилось описание специфической импульсной структуры явления ЭМИП, называемой адиабатом [22]. Адиабатон состоит из одного импульса пробного поля, “горба” на кривой интенсивности управляющего излучения и следующего за ним “провала” в области расположения пробного импульса. Пользуясь терминологией работ [21, 22] можно сказать, что в рассматриваемом нами случае в среде возникают два адиабатона.

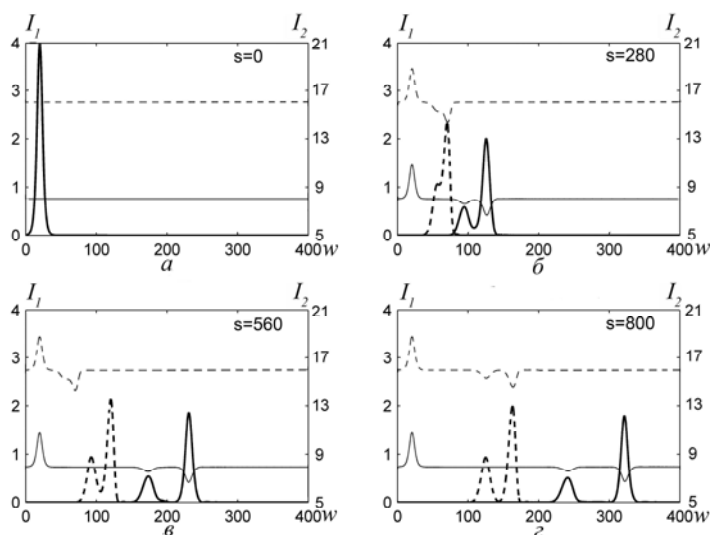


Рис. 1. Эволюция величин  $I_1$  и  $I_2$  при фиксированных значениях  $s$ : толстые и тонкие сплошные (пунктирные) – интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  для расчёта 1 (расчёта 2) соответственно

На рис. 2 совместно с графиками величины  $I_1$  представлены графики поляризационных характеристик  $\alpha_1$  (пунктир) и  $\gamma_1$  пробного излучения для двух фиксированных расстояний  $s$  в случае расчёта 1. Рис. 2, *а* показывает, что на достаточно большом расстоянии в области расположения пробных импульсов  $\gamma_1 = 0$ , т.е. оба этих импульса поляризованы линейно. При этом импульс 1 поляризован в том же направлении, что и входное пробное излучение ( $\alpha_1 = 0.5$ ), импульс 2 – в перпендикулярном направлении ( $\alpha_1 = 2.07$ ). Рис. 2, *б* демонстрирует промежуточную стадию процесса разбиения импульса пробного излучения в среде на меньшем расстоянии. Этот рисунок показывает, что поляризация импульса меняется от линейной ( $\gamma_1 = 0$ ) на его фронтах до круговой ( $\gamma_1 = -1$ ) в его центральной части. При переходе через момент круговой поляризации направление главной оси эллипса поляризации скачком меняется на угол  $90^\circ$ .

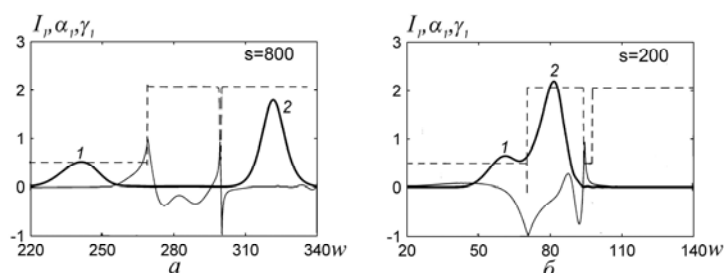


Рис. 2. Эволюция интенсивности  $I_1$  (толстые линии) и величин  $\gamma_1$  (тонкие линии),  $\alpha_1$  (пунктир) для расчёта 1

Сравнение графиков величин  $I_1$  на рис.1, *в* показывает, что уменьшение интенсивности входного управляющего излучения приводит к уменьшению расстояния, требуемого для полного распада входного поляризованного по кругу пробного импульса на импульсы с линейной поляризацией. Рис.1 свидетельствуют о том, что скорости распространения этих импульсов увеличиваются при увеличении интенсивности пробного излучения.. Оценки, сделанные для случая насыщенных паров  $^{208}\text{Pb}$  при  $950\text{ K}$  показали, например, что скорости пробных импульсов 1 и 2 для расчёта 1 (рис. 2) равны приблизительно  $0.024c$  и  $0.018c$ , тогда как для расчёта 2 соответствующие пробные импульсы имеют скорости  $0.055c$  и  $0.038c$ .

*Б. Мощный входной пробный импульс большой длительности.* Положим в (5)  $a_{10} = 1.41$ ,  $\tau_1 = 50$ ,  $w_0 = 200$ , а в (6) будем последовательно полагать  $a_{20} = 4.9$  (расчёт 3) и  $a_{20} = 6.9$  (расчёт 4). Исходные условия расчёта 3 и расчёта 4 отличаются от исходных условий расчёта 1 и расчёта 2 соответственно только тем, что длительность входного пробного импульса  $\tau_1$  увеличена в десять раз, что при  $T = 950\text{ K}$  соответствует импульсу длительностью в 15 нс.

На рис. 3, *а - г* представлены зависимости от  $w$  величин  $I_1$  и  $I_2$  для нескольких значений расстояния  $s$ . Сплошные толстые и тонкие кривые на рис.3, *а - г* описывают соответственно интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  в случае расчёта 3. Пунктирные толстые линии описывают величину  $I_1$ , а тонкие пунктирные линии – величину  $I_2$  для расчёта 4. На рис. 3, *д, е* совместно с графиками величины  $I_1$  (толстые линии) представлены графики величин  $\alpha_1$  (пунктир) и  $\gamma_1$  (тонкие линии) для двух расстояний  $s$  в случае расчёта 3. Рис.3 показывает, что качественная картина разбиения входного пробного импульса на линейно поляризованные компоненты в основном идентична той, что имела место в случае расчётов 1 и 2. Заметное различие состоит в том, что на больших расстояниях больший пробный импульс расчёта 3 (толстые линии на рис. 3, *г, е*) обладает значительной амплитудной модуляцией. Это факт объясняется влиянием неадиабатичности на процесс ЭМИП при достаточно мощном входном пробном импульсе [23].



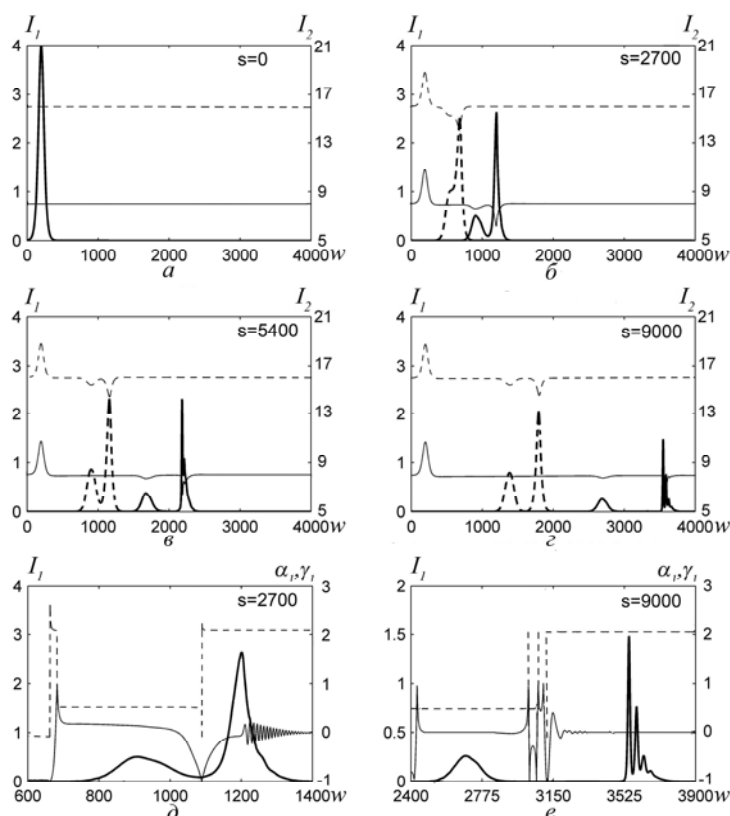


Рис. 3. Эволюция величин  $I_1$  и  $I_2$  при фиксированных значениях  $s$ : толстые и тонкие сплошные (пунктирные) линии описывают интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  для расчёта 3 (расчёта 4) соответственно ( $a - z$ ); эволюция интенсивности  $I_1$  (толстые линии), величин  $\gamma_1$  (тонкие линии) и  $\alpha_1$  (пунктир) для расчёта 3 ( $\vartheta, e$ )

Сравнение результатов расчётов 1, 2 и расчётов 3, 4 показывает, что для распада входного пробного импульса большой длительности на линейно поляризованные компоненты требуется примерно в десять раз большее расстояние. Однако скорости распространения указанных компонент практически не зависят от длительности входного пробного импульса. Это позволяет предположить, что увеличение требуемого для распада расстояния объясняется большей пространственной протяжённостью входного пробного импульса с большей длительностью.

*В. Слабый входной пробный импульс большой длительности.* Положим в (5)  $a_{10} = 0.16$ ,  $\tau_1 = 50$ ,  $w_0 = 200$ , а в (6) будем последовательно полагать  $a_{20} = 4.9$  (расчёт 5) и  $a_{20} = 6.9$  (расчёт 6). В обоих случаях  $\gamma = 1.5 \times 10^{-2}$ . Эти исходные данные отличаются от исходных данных расчётов 3 и 4 тем, что пиковое значение интенсивности входного пробного импульса ( $65 \text{ Вт/см}^2$  при  $T = 950 \text{ K}$ ) примерно в 300 раз меньше интенсивности входного пробного излучения.

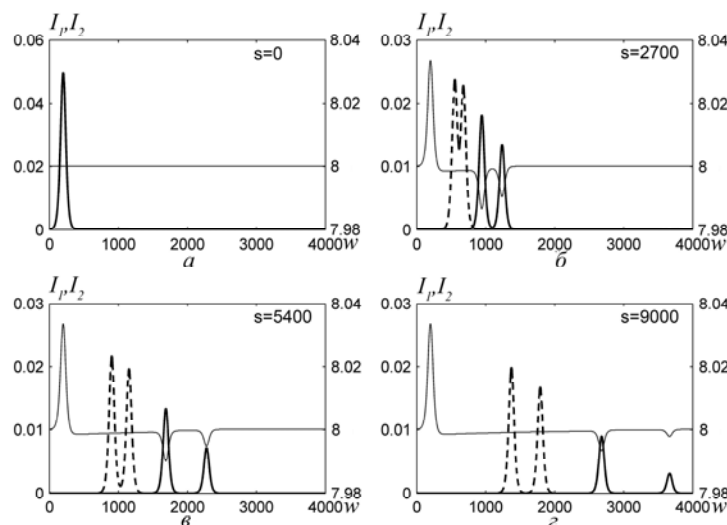


Рис.4. Эволюция величин  $I_1$  и  $I_2$  при фиксированных значениях  $s$  для расчёта 5 (толстые и тонкие сплошные линии соответственно), и величины  $I_1$  для расчёта 6 (пунктир)

На рис. 4 сплошными толстыми (тонкими) линиями представлены зависимости от  $w$  величин  $I_1$  ( $I_2$ ) для нескольких фиксированных значений  $s$  в случае расчёта 5. Пунктирные толстые линии описывают величину  $I_1$  в случае расчёта 6. Качественно эволюция импульсов пробного излучения в среде такая же, как и в случае всех предыдущих расчётов, результаты которых представлены в нашей работе: внутри среды из входного импульса образуются два пробных импульса.

*Г. Обсуждение результатов.* Отметим, что на входной поверхности отсутствует  $\sigma_-$  компонента пробного поля. Однако распад поляризованного по кругу входного пробного импульса на импульсы с линейной поляризацией невозможен без образования этой компоненты внутри среды. Причины возникновения  $\sigma_-$  компоненты пробного поля поясняются рис. 5, на котором представлена схема квантовых переходов. Числа слева от горизонтальных линий – номера состояний, число сверху или снизу – квантовые числа  $M$  состояний, стрелки с левым (правым) наклоном – переходы под действием  $\sigma_+$  ( $\sigma_-$ ) компонент полей. Отсутствующая на входной поверхности  $\sigma_-$  компонента пробного поля изображена пунктирной линией.

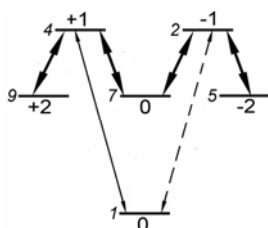


Рис. 5. Схема уровней квантовых переходов

Согласно уравнению для величины  $\partial f_1 / \partial s$  в системе уравнений (4), источником генерации  $\sigma_-$  компоненты пробного поля служит произведение  $c_1 c_2^*$  под знаком интеграла в правой части этого уравнения. В начальный момент времени вблизи входной поверхности  $c_2^*$  равно нулю и указанная компонента не возникает. Однако с течением времени по цепочке квантовых переходов между уровнями 1, 4, 7 и 2 происходит заселение состояния 2 и, следовательно, произведение  $c_1 c_2^*$  становится отличным от нуля. Фаза величины  $c_1 c_2^*$  оказывается при этом благоприятной для усиления  $\sigma_-$  компоненты пробного поля. По мере распространения пробного излучения в среде  $\sigma_-$  компонента нарастает и сравнивается по интенсивности с  $\sigma_+$  компонентой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что при линейной поляризации контролирующего излучения поляризованный по кругу входной пробный импульс распадается в среде на импульсы со взаимно перпендикулярными линейными поляризациями. Этот распад объясняется двумя обстоятельствами. Первое из них заключается в возникновении внутри среды пробного излучения с круговой поляризацией, противоположной по направлению круговой поляризации входного пробного импульса. Второе обстоятельство состоит в различии скоростей линейно поляризованных импульсов пробного излучения в среде.

Описанный в нашей работе распад входного пробного импульса на линейно поляризованные компоненты можно трактовать как эффект двойного лучепреломления при ЭМИП. Эффект носит нестационарный характер и объясняется различием скоростей распространения как целого импульсов с различными поляризационными характеристиками. В то же время двойное лучепреломление в стационарном режиме ЭМИП [12, 13] возникает за счёт различия фазовых скоростей гармонических волн пробного поля с различными состояниями линейной поляризации.

## Литература

1. Harris S. E. // Phys. Today 1997, Vol.50, № 7, p. 36.
2. Lukin M. D. // Rev. Mod. Phys. 2003, Vol.75, №2, p. 457.

3. Duan L.-M., Lukin M. D., Cirac J. I., et al. // Nature 2001, Vol. 414, p. 413.
4. Sinatra A. // Phys. Rev. Lett. 2006, Vol.97, №25, p.253601.
5. Fleischhauer M., Imamoglu A., Marangos J. P. // Rev. Mod. Phys. 2005, Vol. 77, №2, p. 633.
6. Martinelli M., Valente P., Failache H., et al. // Phys. Rev. A 2004, Vol.69, №4, p. 043809.
7. Godon A., Micalizio S., Levi F. // Phys. Rev. A 2002, Vol.66, №6, p. 063807.
8. Wielandy S., Gaeta A. L. // Phys. Rev. Lett. 1998, Vol.81, №16, p. 3359.
9. Bo Wang, Shujing Li, Jie Ma, Hai Wang, et al. // Phys. Rev. A 2006, Vol.73, №5, p. 051801(R).
10. Agarwal G. S., Shubhrangshu Dosgupta // Phys. Rev. A 2003, Vol.67, №2, p.023814.
11. Sautenkov V. A., Rostovtsev Y. V., Chen H., et al. // Phys. Rev. Lett. 2005, Vol.94, №23, p. 233601.
12. Pavone F. S., Bianchini G., Cataliotti F. S., et al. // Opt. Lett. 1997, Vol.22, №10, p. 736.
13. Tai Hyun Yoon, Chang Yong Park, Sung Jong Park // Phys. Rev. A 2004, Vol.70, №6, p. 061803(R).
14. Drampyan R., Pustelny S., Gawlic W. // Phys. Rev. A 2009, Vol.80, №3, p. 033815.
15. Kis Z., Demeter G., Janszky J. // J. Opt. Soc. Am. B 2013, Vol.30, №4, p. 829.
16. Kassapi A., Maneesh Jain, Yin G. Y., et al. // Phys. Rev. Lett. 1995, Vol.74, №13, p. 2447.
17. Maneesh Jain, Merriam A. J., Kassapi A., et al. // Phys. Rev. Lett. 1995, Vol.75, №23, p. 4385.
18. Борн М., Вольф Э. Основы оптики - М.: Наука, 1970.
19. de Zafra R. L., Marshall A. // Phys. Rev. 1968, Vol.170, №1, p. 28.
20. Физические величины. Справочник (Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова.) - М.: Энергоатомиздат, 1991.
21. Grobe R., Eberly J. H. // Laser Phys. 1994. V.5. №3. P. 546.
22. Shakhmuratov R. N., Odeurs J. // Phys. Rev. A 2004, Vol.74, №4, p. 043807.
23. Kozlov V. V., Kozlova E. B. // Opt. Commun. 2009, Vol. 282, №5, p. 892.

## СПЕКТРОСКОПИЯ

СТРУКТУРА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСОВ  
МЕТАЛЛОФОРБИДОВ С ИМИДАЗОЛОМ

*Березин К.В.<sup>1</sup>, Нечаев В.В.<sup>2</sup>, Чернавина М. Л.<sup>1</sup>, Козлов О.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

<sup>2</sup>*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина*

Методом функционала плотности ВЗЛУР с базисным набором 6-311+G(d,p) рассчитаны геометрические параметры и колебательные волновые числа ряда металлофорбидов (Mg-форбид, Zn-форбид, Cu-форбид) и их аксиально-лигандированных комплексов с имидазолом в соотношении (1:1). Проведен анализ изменения геометрических параметров металлофорбидов при образовании пятой координационной связи. В приближении гармонического осциллятора и жесткого ротатора с учетом базисной суперпозиционной ошибки вычислены термодинамические характеристики образования комплексов и константы равновесия.

## ВВЕДЕНИЕ

Все молекулярные системы имеющие в своей основе тетрапиррольный макроцикл такие как порфирины и металлопорфирины, а так же их комплексы с различными лигандами представляют большой научный интерес, так как входят в состав ряда природных макромолекулярных систем, таких как гемоглобин (комплекс протопорфирина IX с двухвалентным железом (гем)), белок цитохром (так же содержит гем), фотосистемы I и II (содержат магниевые комплексы порфиринов (хлорофилл а)). Кроме этого, некоторые замещенные порфиринов, такие как, например, тетраазабензопорфины (фталоцианины) и их комплексы с переходными металлами, особенно с медью, имеют большое практическое значение и используются в качестве красителей, а такие производные как кобальтовые комплексы коррина является основой целого класса биологически активных соединений называемых кобаламинами. Яркими представителями этого класса соединений являются метилкобаламин и 5-дезоксаденозилкобаламин (две конферментные формы витамина В<sub>12</sub>). Современный этап развития теоретических методов, особенно методов теории функционала плотности [1] и компьютерных технологий дает возможность в реальном времени проводить квантово-механические исследования таких больших биомолекулярных систем.

В последние полтора десятилетия таким исследованием молекул порфиринового ряда посвящено много печатных работ. Так в работах [2-6] проводилось исследование колебательных состояний и спектральных свойств молекул свободного основания порфина методами теории функционала плотности, в [7-11] исследованы тетрааза и дигидрозамещенные порфина, строению и различным спектрам молекул порфиринов и их металлокомплексам посвящены книги [12,13]. В работах [14-17] исследовались комплексы с металлами и экстралигандами, в [18,19] рассмотрены колебательные состояния модельных соединений хлорофилла а и бактериохлорофилла а.

Исследование, результаты которого обсуждаются в данной работе, представляет собой часть более объемного проекта, задачей которого, является изучение специальной пары в реакционном центре фотосинтеза. На данном этапе исследования проводится моделирование мономерных моделей хлорофилла и их комплексов с аксиальными лигандами. В качестве модельного соединения хлорофилла была выбрана молекула металлофорбида, обладающая характерными для хлорофилла особенностями - гидрированием одного пиррольного кольца и наличием дополнительного углеродного цикла. Выбор такого модельного соединения значительно упрощает процедуру анализа внутримолекулярной динамики, позволяя изучать влияние различных заместителей и аксиальных лигандов на структуру, колебательные состояния и спектральные характеристики макроциклической системы в реальном масштабе времени. В качестве модели молекулы гистидина, которая координирует хлорофилл в реакционном центре фотосинтеза, была выбрана молекула имидазола.

В данной работе представлены результаты исследования структурных особенностей и термодинамических характеристик ряда аксиально-лигандированных имидазолом металлофорбидов (Mg, Zn и Fe) в соотношении (1:1).

## МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Все расчеты равновесных электронных структур и волновых чисел в колебательных спектрах проводились в рамках теории функционала плотности с использованием функционала B3LYP [20,21] и базисным набором гауссовских функций 6-311+G(d,p). При расчете равновесной электронной конфигурации задавался повышенный критерий сходимости по смещениям и силам для получения более точных значений геометрических параметров. Корректность полученных конфигураций подтверждалась расчетом значений колебательных волновых чисел, которые должны были быть положительными. Расчеты выполнялись с использованием программы Gaussian [22]. Вычисление значений термодинамических характеристик с учетом базисной суперпозиционной ошибки проводился по формулам [23].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Пространственная структура комплексов ряда металлофорбидов с молекулой имидазола показана на рис.1.

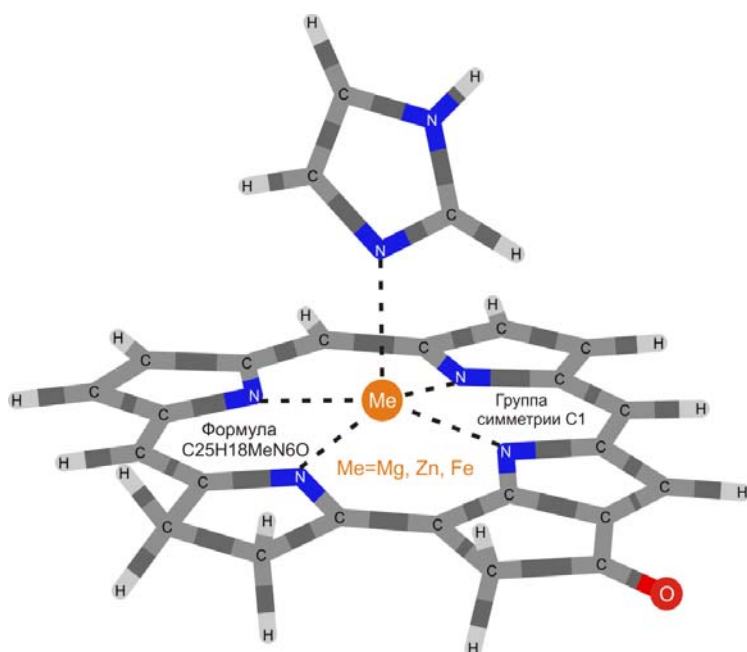


Рис.1. Пространственная структура комплексов металлофорбидов с молекулой имидазола

Как видно из рис.1, аксиально-лигандированные имидазолом Mg, Zn и Fe-форбиды имеют общее пространственное строение. Следует отметить, что координационно-насыщенные Cu и Ni-форбиды в рамках метода DFT/B3LYP пятую координацию с имидазолом не образовывали и соответственно были исключены из нашего рассмотрения. Анализ пространственной структуры комплексов показывает, что возможно несколько стабильных неэквивалентных положения имидазола относительно макроцикла. В этих положениях плоскость имидазольного кольца может располагаться вдоль оси, проходящей через координационные связи азот-металл. При таком расположении имидазола с одной стороны минимизируется стерическое напряжение между концевыми атомами водородами двух молекул, а с другой стороны становится максимальным взаимодействие атомов водорода имидазола с атомами азота пиррольных циклов. Для определения, какое из этих положений является наиболее энергетически выгодным, мы исследовали зависимость полной энергии комплекса от положения имидазола. Для этого мы выполнили процедуру релаксированного сканирования потенциальной поверхности, т.е. проводили полную оптимизацию всех геометрических параметров комплекса при дискретных значениях (с шагом 10 градусов) одного из двугранных углов, определяющего положение имидазола относительно макроцикла. За ноль градусов было выбрано одно из возможных устойчивых положений имидазола полученных в

результате предварительных расчетов электронной структуры. Результаты этого исследования представлены на рис.2 и 3.

Как и ожидалось (см. рис. 2 и 3), при расположении имидазольного кольца приблизительно вдоль координационных связей наблюдаются минимумы энергии. Наиболее выгодными являются положения 1 и 3, первое реализуется, когда N-H связь имидазола смотрит в сторону C=O связи изоцикла, а второе при повороте на 170 градусов против часовой стрелки, если смотреть на металлофорбид со стороны имидазола. Другие две ориентации соответствующие минимумам 2 и 4 являются более высокоэнергетическим, так как, при таком расположении молекула имидазола испытывает стерическое напряжение из-за взаимодействия с атомами водорода гидрированного пиррольного цикла. Небольшой локальный минимум расположенный слева от минимума 2 (см. рис.2), соответствует такой ориентации имидазола, когда плоскость кольца повернута на 60 градусов против часовой стрелки относительно положения 1 (см. рис.3).

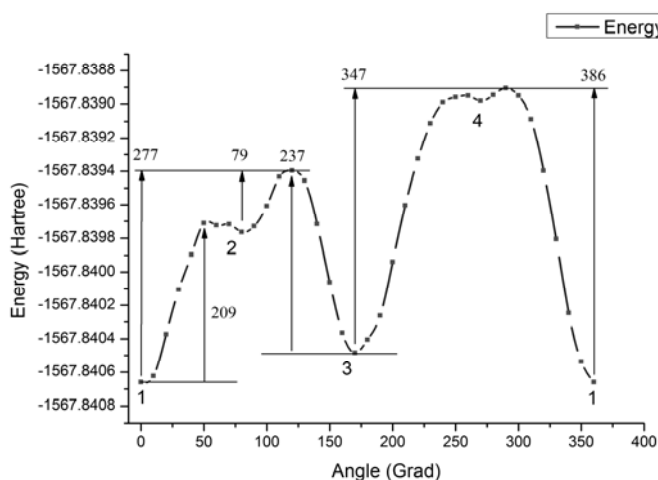


Рис. 2. Зависимость полной энергии комплекса Mg-форбид – имидазол от угла поворота молекулы имидазола относительно оси проходящей через пятую координационную связь и величины потенциальных барьеров в ед. ( $\text{см}^{-1}$ )

Координация металлофорбида имидазолом оказывает влияние, прежде всего на близлежащие координационные связи азот-металл, которые становятся немного длиннее, что свидетельствует об уменьшении силы связи металла с макроциклом при образовании пятой координации. Это объясняется тем, что часть общей электронной плотности тратится на образование еще одной координационной связи. Изменения в длинах связей незначительны и лежат в пределах сотых долей ангстрема. Кроме этого, происходит заметное смещение атома металла из плоскости макроцикла вдоль линии пятой координации. Поскольку молекула металлофорбида в данном случае не является плоской, то мы оценивали среднее значение смещения атома металла относительно плоскостей проходящих через три атома азота ближайших пиррольных колец. Наибольшие значения величины смещения центрального атома металла относительно макроцикла были получены для Mg и Zn-форбидов и составили по величине 0.37 и 0.35 ангстрем соответственно. Для комплекса с железом смещение оказалось менее выраженным – 0.16 ангстрем. Следует заметить, что такое смещение атома металла характерно только для пятикоординированных металлокомплексов. При образовании шестикоординированных комплексов с двумя одинаковыми аксиальными лигандами смещения центрального атома металла не происходит [16]. Вычисленные значения длин координационных связей показывают, что длина пятой координационной связи у Mg и Zn-форбидов практически одинаковая – 2.2 и 2.19 ангстрем соответственно, а у Fe-форбида она заметно больше – 2.89 ангстрем.

Вычисленные значения термодинамических характеристик рассматриваемых комплексов представлены в таблице 3. Как видно из табл.3. максимальное значение суперпозиционной ошибки не превысило 18% от значения полной энергии комплексообразования, что говорит о применимости данного базисного набора для расчета термодинамических характеристик таких систем.

Величина  $T\Delta S$  характеризующая изменение энтропии у всех рассмотренных комплексных соединений получилась приблизительно одинаковой, чего нельзя сказать про изменение

температурной энтальпии. Как видно из табл.3, изменение значения энтальпии при образовании комплекса Mg-форбид-имидазол в полтора раза превышает аналогичное значение для комплекса с железом и в два раза для комплекса с цинком. Преобладание энтальпийного фактора над энтропийным и обуславливает относительно большое значение константы равновесия, полученное для комплекса Mg-форбид-имидазол.

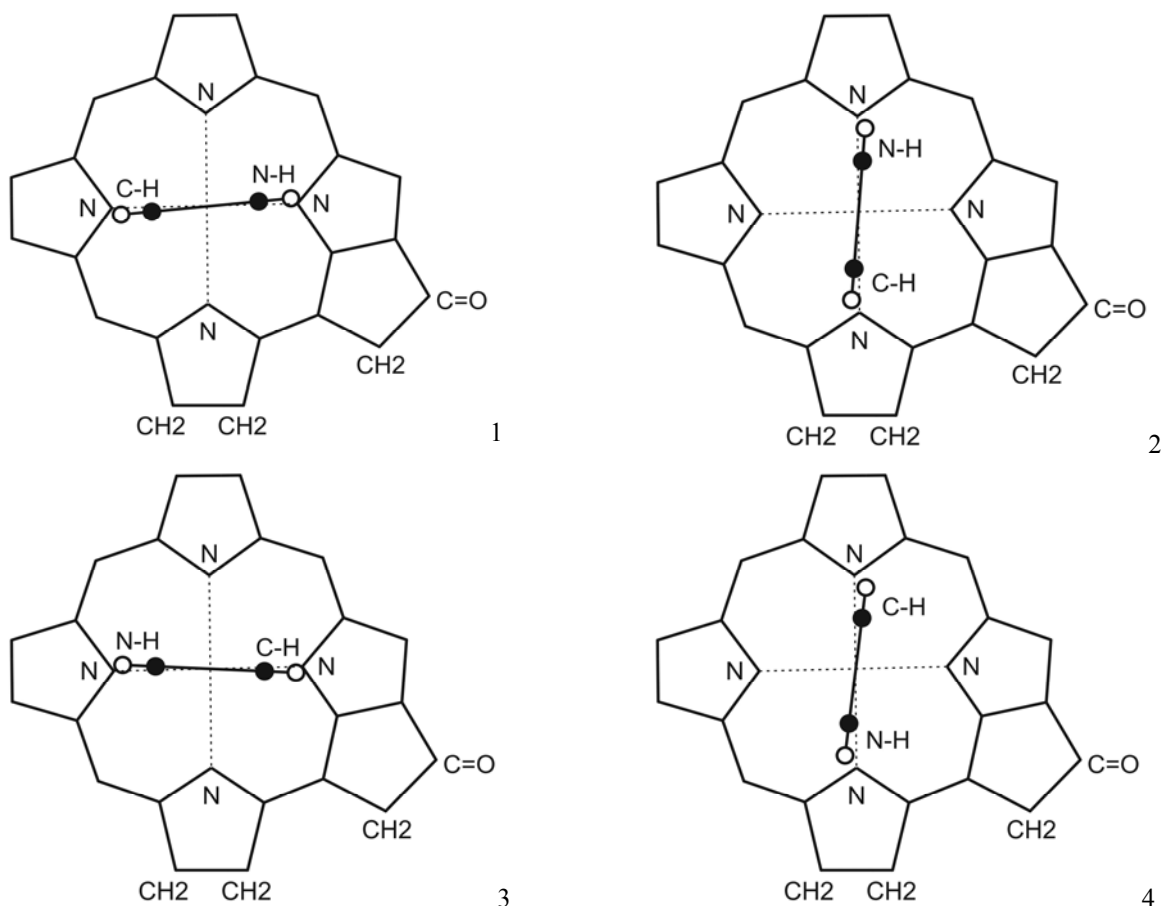


Рис. 3. Пространственные положения имидазола относительно металлофорбида, при которых наблюдаются основные минимумы энергии

Таблица 3. Термодинамические характеристики комплексообразования (кДж/моль) и безразмерная константа равновесия аксиально-лигандированных имидазолом металлофорбидов.

Комплекс	$\Delta E$	$\Delta ZPE$	$BSSE$	$\Delta H_0$	$\Delta H_{298}$	$T\Delta S$	$\Delta G_{298}$	$k_{298} \times 10^3$
Mg-форб....имид.	-73.49	3.05	6.34	-64.11	-61.95	-44.00	-17.95	1393.071
Zn-форб.... имид.	-40.66	2.15	7.29	-31.22	-28.67	-42.29	13.62	0.004
Fe-форб.... имид.	-50.54	0.46	6.51	-43.57	-42.21	-45.68	3.47	0.246

## ВЫВОДЫ

Методом гибридного функционала плотности B3LYP/6-311+G(d,p) рассчитаны равновесные электронные структуры, волновые числа и интенсивности полос в ИК спектрах поглощения ряда металлофорбидов (Mg-форбид, Zn-форбид, Fe-форбид) и их аксиально-лигандированных комплексов с имидазолом в соотношении (1:1). Показано, что наиболее выгодным с энергетической точки зрения является такая пространственная конфигурация комплекса, при которой N-H связь имидазола смотрит в сторону C=O связи металлофорбида. Установлено, что в рамках метода DFT/B3LYP

координационно-насыщенные Cu-, Ni-форбиды не образуют пятую координация с молекулой имидазола. С учетом базисной суперпозиционной ошибки рассчитаны константы равновесий и энтальпии комплексообразования. Относительно большая величина вычисленного значения константы равновесия для комплекса Mg-форбид-имидазол, по сравнению с другими рассмотренными комплексами, объясняется доминированием энтальпийного фактора.

## Литература

1. Кон В. //УФН 2002, Т.72, №3, с. 336-348.
2. Tazi M., Lagant P., Vergoten G. // J.Phys. Chem. 2000, Vol.104A, № 3, p. 618–625.
3. Березин К. В., Татаренко О. Д., Нечаев В. В. // ЖПС 2002, Т.69, № 4, с.462–466.
4. Березин К. В., Нечаев В. В. // ЖПС 2002, Т.69, № 6, с.699–703.
5. Березин К. В., Татаренко О. Д., Нечаев В. В. // Журн. физ. Химии 2003, Т.77, № 1, с.121–126.
6. Березин К. В., Нечаев В. В. // Журн. физ. Химии 2003, Т.77, № 1, с.65– 69.
7. Березин К. В., Нечаев В. В. // ЖПС 2003, Т.70, № 2, с.182– 188.
8. Березин К. В., Нечаев В. В. // ЖПС 2003, Т.70, № 3, с.309–314.
9. Гладков Л. Л., Шкирман С. Ф., Константинова В. К. и др. // ЖПС 2000, Т.67, № 5, с. 551–556.
10. Березин К.В., Нечаев В.В. // ЖПС 2004, Т.71, № 3, с. 283–294.
11. Березин К. В., Нечаев В. В. // Оптика и спектр. 2004, Т. 97, № 5, с. 751–757.
12. К.Н. Соловьев, Л.Л. Гладков, А.С. Старухин и др. Спектроскопия порфиринов: колебательные состояния, – Минск: Наука и техника, 1985 .
13. Б.Д. Березин, Н.С. Ениколопян Металлопорфирины - М.: Наука, 1988.
14. Гладков Л.Л., Соловьев К.Н. // Теор. и эксп. химия 1980, Т.16, № 5, с. 705–710.
15. Kozlowski P.M., Rush T. S.III., Jarzecki A.A., et al. // J. Phys. Chem. A 1999, Vol. 103, № 10, p. 1357–1366.
16. Березин К.В., Нечаев В.В. // Журн. физ. химии 2004, Т.78, № 9, с. 1619–1622.
17. Элькин М.Д., Зиганшина О.Д., Березин К.В. и др. // ЖПС 2004,Т.71, № 5, с. 584–589.
18. Березин К. В., Нечаев В. В., Зиганшина О. Д. // Журн. структ. химии 2004, Т.45, № 2, с. 231–238.
19. Нечаев В. В., Березин К. В. // Оптика и спектр. 2004, Т. 96, № 2, с.267– 270.
20. A. D. Becke // J. Chem. Phys. 1993, Vol.98, №7, p. 5648-5652.
21. C. Lee, W. Yang, and R. G. Parr // Phys. Rev. B 1988, Vol. 37, p. 785-789.
22. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian09, Revision A.02. PittsburghPA: Gaussian, Inc., 2009.
23. Березин К.В., Файфель А.Б. Программа для расчета термодинамических характеристик межмолекулярных комплексов по данным квантово-механических расчетов. Проблемы оптической физики Кн.2. Изд. Гос УНЦ “Коледж” 2004г. с.245-248

## ТЕРМОДИНАМИКА СВЯЗЫВАНИЯ В КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПАРАХ ДНК И РНК

*Березин К.В.<sup>1</sup>, Нечаев В.В.<sup>2</sup>, Козлов О.В.<sup>1</sup>, Лихтер А.М.<sup>3</sup>, Кочергина Д.Д.<sup>3</sup>,  
Чернавина М.Л.<sup>1</sup>, Бондякова А.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина  
<sup>3</sup>Астраханский государственный университет

Методами функционала плотности B3LYP и M062X, WB97XD, B97D, оптимизированных для расчета дальних взаимодействий, проведен теоретический анализ структурных и термодинамических параметров водородо-связанных комплементарных пар оснований аденин-тимин, аденин-урацил и гуанин-цитозин. Вычисленные значения структурных и термодинамических параметров скорректированы на величину базисной суперпозиционной ошибки. Показано значительное преобладание энтальпийного фактора над энтропийным при образовании комплекса гуанин-цитозин, что обуславливает большие значения константы равновесия. Обсуждается конфигурация аминогруппы в молекуле цитозина и применимость функционалов M062X, WB97XD, B97D для описания систем с водородной связью.

## ВВЕДЕНИЕ

Стабильность нуклеиновых кислот ДНК, РНК и их биологическая активность в значительной степени определяются энергией взаимодействия канонических пар оснований за счет водородных связей и межплоскостного стекингового взаимодействия [1]. В связи с этим исследованиям межмолекулярного взаимодействия оснований нуклеиновых кислот было посвящено много



экспериментальных [2] и теоретических работ [3]. Квантово-механические расчеты биомолекул с использованием метода функционала плотности позволяют получать структурные и энергетические параметры молекулярных систем и их комплексов с водородными связями на уровне более трудоемких методов таких, как MP2 и CCSD(T). Они оказываются полезным дополнением к экспериментальным методам, а также для калибровки различных эмпирических силовых полей, применяемых для изучения более сложных комплексов, например, комплексов ДНК-белок-вода, ДНК-лекарство.

Обычно расчеты выполняют с применением ограниченных наборов базисных гауссовых функций, что приводит к необходимости учета суперпозиционной поправки в энергетических и структурных параметрах.

Целью данной работы было вычисление структурных и термодинамических параметров комплементарных пар оснований ДНК и РНК аденин-тимин (А-Т), аденин-урацил (А-У) и гуанин-цитозин (Г-Ц) с учетом базисной суперпозиционной ошибки методом функционала плотности в приближении гибридного функционала B3LYP, и ряда функционалов (M062X, WB97XD, B97D) специально оптимизированных для расчетов Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий.

### МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Для расчета структурных параметров и термодинамических характеристик исследуемых соединений нами были выбраны четыре различных функционала: популярный гибридный функционал B3LYP [4,5] и три менее распространенных функционала M062X [6], WB97XD [7], B97D [8]. Последние три, как утверждают их авторы, оптимизированы для корректного описания Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий.

Представляет интерес сравнить результаты, полученные в рамках метода DFT/B3LYP, который успешно применялся для описания комплексов с водородными связями [9,10] с результатами, полученными в рамках именно этих трех функционалов. Это связано с тем, что при изучении комплексных соединений часто возникает задача одновременного учета нескольких различных видов межмолекулярных взаимодействий, например, водородных связей и Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий, что лежит за рамками возможностей таких функционалов как B3LYP. Кроме этого, использование различных методов и базисных наборов для описания одних и тех же молекулярных соединений позволяет анализировать ошибки методов и выявлять «артефакты», связанные с ограниченностью тех или иных приближений. Все теоретические расчеты проводились по программе Gaussian 09 [11].

Оптимизация электронной структуры рассматриваемых комплексов проводилась стандартным образом и с учетом вычисленной суперпозиционной ошибки. Корректность рассчитанных пространственных молекулярных конфигураций подтверждалась дополнительным расчетом волновых чисел нормальных колебаний комплексов, которые должны быть положительными. В дальнейшем эти волновые числа использовались для расчета значений нулевой колебательной энергии. Для уточнения значения этой энергии при вычислениях термодинамических характеристик с использованием метода DFT/B3LYPc базисными наборами 6-311+G(d,p) и 6-311++G(d,p) мы применили методику линейного масштабирования частот [12]. Это оказалось возможным благодаря тому, что для функционала B3LYPc этими базисными наборами в работах [12, 13] были получены соответствующие значения коэффициентов в линейной масштабирующей функции.

Термодинамические характеристики в приближении жесткого ротатора и гармонического осциллятора для рассматриваемых комплексов вычислялись по методике, описанной в работе [14].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Пары А-Т и А-У*

Пространственное строение комплементарных пар А-Т и А-У показано на рис.1. Как видно из рис.1., эти пары стабилизируются посредством двух водородных связей, показанных пунктирными линиями.

Структура этих комплексов практически одинакова, так как тимин является метил замещенным урацилом. Исходя из этого, можно ожидать, что такие характеристики, как межмолекулярные

расстояния и энтальпия комплексообразования, будут близки между собой. Вычисленные и экспериментальные значения межмолекулярных расстояний показаны в таблице 1. Как видно из табл. 1, значения межмолекулярных расстояний, как и ожидалось, для обоих комплексов оказались очень близки между собой. Для того, чтобы их можно было сравнивать мы привели значения этих параметров с точностью до третьего знака. В качестве критерия качества этих параметров было использовано суммарное (по двум параметрам для А-Т и А-У и по трем для Г-Ц (см. табл.2)) абсолютное отклонение вычисленных значений от средних экспериментальных. Как видно из таблицы, лучшие результаты были получены с помощью тех функционалов, которые специально оптимизировались для расчетов дальних взаимодействий. Учет суперпозиционной ошибки улучшает согласие с экспериментом как раз именно для этих функционалов. Из сравнения вычисленных значений можно отметить, что при переходе от А-Т к А-У межмолекулярное расстояние 14N-2N несколько уменьшается, а 20N-7O практически не меняется.

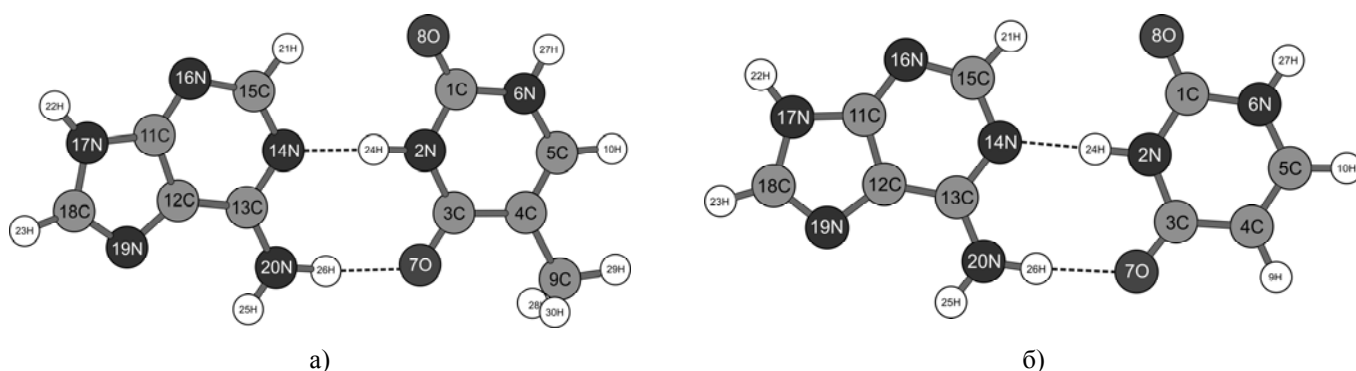


Рис. 1. Пространственное строение комплексов: а) аденин-тимин и б) аденин-урацил

Таблица 1. Межмолекулярные расстояния (ангстремы) в комплексах аденин-тимин и аденин-урацил.

Связь	20N-7O		14N-2N		The total abs. error	
Эксперимент [14]						
A2U1	2.95		2.82			
A1U2	2.93		2.85			
	Average value					
	2.94		2.84			
	A-T	A-U	A-T	A-U	A-T	A-U
B3LYP						
6-311+G(d,p)	2.941	2.942	2.887	2.883	0.06	0.04
correct BSSE	2.956	2.956	2.901	2.897	0.08	0.08
6-311++G(d,p)	2.941	2.942	2.887	2.884	0.06	0.04
correct BSSE	2.956	2.956	2.901	2.897	0.08	0.08
aug-cc-pVDZ	2.919	2.919	2.864	2.859	0.04	0.04
correct BSSE	2.929	2.928	2.883	2.878	0.05	0.05
M062X						
6-311+G(d,p)	2.954	2.956	2.826	2.823	0.02	0.04
correct BSSE	2.970	2.971	2.843	2.838	0.03	0.03
WB97XD						
6-311+G(d,p)	2.931	2.930	2.831	2.828	0.02	0.02
correct BSSE	2.939	2.940	2.841	2.840	0.00	0.00
B97D						
6-311+G(d,p)	2.922	2.924	2.815	2.812	0.05	0.05
correct BSSE	2.936	2.938	2.827	2.824	0.01	0.02

Термодинамические характеристики комплексообразования для пар А-Т и А-У представлены в таблице 2. Как видно из табл. 2 и 3, суперпозиционная ошибка не превысила 9 процентов для пар

А-Т, А-У и бпроцентов для Г-Ц, что говорит о применимости данных базисных наборов для оценки термодинамических характеристик комплексов такого типа. Наименьшая величина базисной суперпозиционной ошибки получилась для базисного набора 6-311+G(d,p). Как видно из табл.1 и 2, результаты полученные в рамках метода B3LYP с базисными наборами более широкими, чем 6-311+G(d,p) не дают улучшения согласия вычисленных параметров с экспериментальными как для величин межмолекулярных расстояний, так и для энтальпии комплексообразования. Исходя из этого, мы посчитали, что использование более широких базисные наборов при расчетах с другими функционалами является не целесообразным. Как видно из сравнения термодинамических параметров, лучшее значение энтальпии получено в рамках метода M062X. Значения энтальпии, полученные в рамках метода B3LYP, оказывается заниженным по абсолютной величине относительно экспериментального значения, а в рамках других трех функционалов - завышенными. Мы считаем, что для последних трех функционалов в табл. 2 наблюдается некоторая переоценка энергии взаимодействия, что скорее всего связано с оптимизацией этих функционалов для описания слабых Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий. В результате для пар А-Т и А-У были получены разные по знаку значения свободной энергии Гиббса, которые зависят от используемого метода расчета. В рамках метода B3LYP получаются положительные значения, которые говорят о том, что реакция комплексообразования при комнатной температуре самопроизвольно не идет, так как энтропийный фактор перевешивает энтальпийный. Рассмотрение в рамках других трех методов дает противоположную картину.

Таблица 2. Термодинамические характеристики (кДж/моль) образования водородосвязанных комплексов аденин-тимин и аденин-урацил.

	$\Delta E$	BSSE	$\Delta ZPE$	TAS	$\Delta G$	$\Delta H_0$	$\Delta H_{298}$	k
А-Т								
Exp. [14]							-50,63	
B3LYP								
6-311+G(d,p)	-52.92	3.00	5.48*	-49.64	5.60	-44.45	-44.04	0.10
6-311++G(d,p)	-52.96	3.04	5.51*	-52.32	8.21	-44.40	-44.10	0.04
aug-cc-pVDZ	-54.80	4.85	6.16	-49.87	6.32	-43.80	-43.55	0.08
M062X								
6-311+G(d,p)	-62.28	3.46	4.23	-47.70	-6.18	-54.59	-53.58	12.1
WB97XD								
6-311+G(d,p)	-68.13	3.28	5.17	-47.41	-11.52	-59.67	-58.93	104.1
B97D								
6-311+G(d,p)	-65.04	3.45	3.91	-46.56	-10.17	-57.67	-56.73	60.60
А-У								
B3LYP								
6-311+G(d,p)	-53.60	2.94	5.54*	-49.46	4.68	-45.12	-44.78	0.15
6-311++G(d,p)	-53.64	2.99	5.60*	-52.19	7.35	-45.05	-44.84	0.05
aug-cc-pVDZ	-55.69	4.87	6.26	-49.89	5.47	-44.56	-44.43	0.11
M062X								
6-311+G(d,p)	-62.85	3.41	4.21	-46.98	-7.53	-55.23	-54.52	20.86
WB97XD								
6-311+G(d,p)	-68.55	3.25	5.20	-47.24	-12.17	-60.09	-59.42	135.6
B97D								
6-311+G(d,p)	-65.50	3.38	4.00	-46.48	-10.80	-58.13	-57.28	77.93

\*При расчете нулевой колебательной энергии вычисленные значения волновых чисел корректировались по методике линейного масштабирования [12].

Таблица 3. Вычисленные значения двугранного угла (градусы), характеризующего выход плоскости аминокруппы из плоскости пиримидинового кольца в молекуле цитозина.

B3LYP			M062X	WB97XD	B97D
6-311+G(d,p)	6-311++G(d,p)	aug-cc-pVDZ	6-311+G(d,p)		
6.9	7.3	0.02	5.7	3.3	9.6

### Пара Г-Ц

Пространственное строение комплементарной пары Г-Ц показано на рис.2. Как видно из рис.2, данный комплекс в отличие от предыдущих стабилизируется уже посредством трех водородных связей.

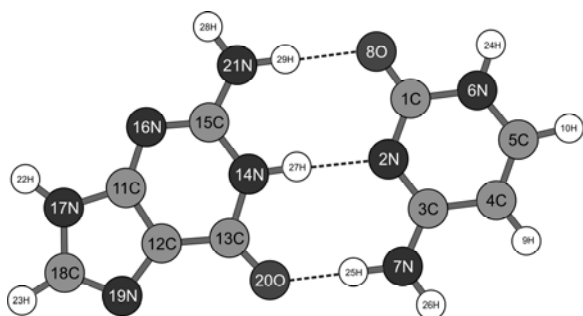


Рис. 2. Пространственное строение комплекса гуанин-цитозин

При оптимизации электронной структуры изолированной молекулы цитозина было найдено, что пространственная конфигурация аминогруппы относительно пиримидинового кольца зависит от типа базисного набора, который используется при расчете. В нашем случае использование базисных наборов 6-311+G(d,p) и 6-311++G(d,p) в методе DFT/B3LYP и 6-311+G(d,p) в других методах приводит к неплоской конфигурации аминогруппы. Значения двугранного угла 2N3C7N25H (см. рис.3), полученные в рамках используемых функционалов и базисным наборов, показаны в таблице 3.

Следует отметить, что при этих расчетах начальная конфигурация аминогруппы всегда задавалась неплоской. Двугранный угол 2N3C7N25H в изолированном цитозине устанавливался равным 30 градусам. Если изначально задать конфигурацию аминогруппы в плоскости пиримидинового кольца, то последующая оптимизация электронной структуры в независимости от типа базисного набора не выводит аминогруппу из плоскости. Это обстоятельство в случае вышеописанных базисов приводит к неоптимальной равновесной конфигурации, что подтверждается отрицательным значением волнового числа, соответствующего веерному колебанию аминогруппы. При использовании другого, более расширенного базисного набора aug-cc-pVDZ оптимальной становится плоская конфигурация аминогруппы. Этот факт так же подтверждается расчетом профилей потенциальной энергии, которые показаны на рис.3.

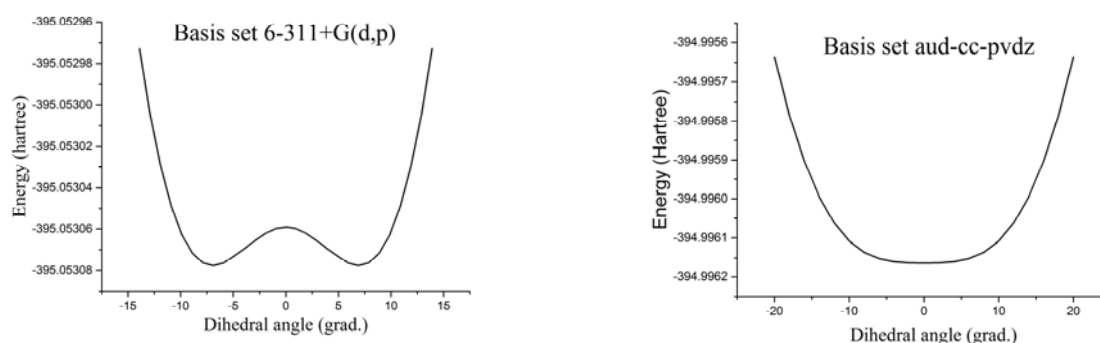


Рис. 3. Профили потенциальной энергии полученные при изменении двугранного угла 2N3C7N25H в молекуле цитозина методом B3LYP с базисными наборами 6-311+G(d,p) и aug-cc-pVDZ.

Как видно из рис.3, в базисе 6-311+G(d,p) мы имеем двухямный потенциал с очень малой высотой барьера ( $4 \text{ см}^{-1}$ ). С расширением базисного набора барьер исчезает и остается один пологий минимум. Мы провели ряд дополнительных расчетов молекулы цитозина в рамках метода B3LYP с различными базисными наборами, которые показали, что в рамках этого метода плоская конфигурация аминогруппы получается начиная с базисного набора 6-311++G(df,p), который

отличается от используемого нами 6-311++G(d,p) наличием дополнительных f- функций, локализованных на «тяжелых» атомах.

Численные значения межмолекулярных расстояний для пары гуанин-цитозин представлены в таблице 4. В рамках метода B97D/6-311+G(d,p) нам не удалось вычислить равновесную электронную конфигурацию этого комплекса, что подтверждалось наличием в значениях волновых чисел одного отрицательного значения, которое соответствует деформационному межмолекулярному колебанию. В табл. 4 для этого метода приведены значения, соответствующие неоптимальной конфигурации. Как видно из табл.4, лучшее согласие с экспериментом получено в рамках методов B3LYP/6-311+G(d,p)/6-311++G(d,p) и M062X/6-311+G(d,p), при этом лучшего всего описывается расстояние 14N-2N. Коррекция значений на базисную суперпозиционную ошибку в большинстве случаев улучшает согласие с экспериментальными данными.

Значение термодинамических параметров комплексообразования пары Г-Ц показаны в таблице 5. Как видно из табл.5, вычисленные в рамках всех теоретических методов значения энтальпии комплексообразования пары Г-Ц оказались завышенными относительно экспериментального значения. Наименьшая ошибка составляет около 9 процентов для функционала B3LYP. Если сравнить между собой термодинамические параметры образования комплексов А-Т и Г-Ц, то сразу видно, что энтальпия образования последнего значительно выше по абсолютному значению, а энтропийный фактор в обоих случаях примерно одинаков. Таким образом, мы имеем для пары Г-Ц большую отрицательную величину свободной энергии Гиббса, что в свою очередь приводит к большому значению константы равновесия.

Таблица 4. Межмолекулярные расстояния (ангстремы) в комплексе гуанин-цитозин

	21N - 8O	14N - 2N	20O - 7N	The total abs. error
Experiment [14]				
GpC	2.91	2.95	2.86	
B3LYP				
6-311+G(d,p)	2.94	2.95	2.81	0.08
correct BSSE	2.96	2.96	2.82	0.10
6-311++G(d,p)	2.94	2.95	2.81	0.08
correct BSSE	2.96	2.96	2.81	0.11
aug-cc-pVDZ	2.92	2.93	2.78	0.11
correct BSSE	2.93	2.94	2.79	0.10
M062X				
6-311+G(d,p)	2.92	2.94	2.80	0.08
correct BSSE	2.94	2.95	2.81	0.08
WB97XD				
6-311+G(d,p)	2.91	2.92	2.78	0.11
correct BSSE	2.92	2.93	2.79	0.10
B97D*				
6-311+G(d,p)	2.92	2.91	2.77	0.14
correct BSSE	2.93	2.93	2.78	0.1

\*Для данного метода приведены значения геометрических параметров, полученные в неоптимальной электронной конфигурации.

## ВЫВОДЫ

Методами функционала плотности, с использованием функционала B3LYP с базисными наборами 6-311+G(d,p), 6-311++G(d,p), aug-cc-pVDZ и функционалов M062X, WB97XD, B97D с базисным набором 6-311+G(d,p) проведен теоретический анализ структурных и термодинамических параметров канонических комплементарных пар оснований аденин-тимин, аденин-урацил гуанин-цитозин. Показано, что учет базисной суперпозиционной ошибки в большинстве случаев улучшает согласие вычисленных значений с соответствующими экспериментальными. Сделан вывод о возможности применения функционалов, оптимизированных для расчетов слабых Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий, к описания водородо-связанных комплексов. Исключение составляет функционал B97D, в рамках которого не удалось получить оптимальную конфигурацию для пары Г-Ц. Установлено, что плоская относительно пиримидинового кольца конфигурация аминокруппы в

молекуле цитозина получается в рамках метода DFT/B3LYP начиная с базисного набора 6-311++G(df,p). Показано, что стабилизация комплекса гуанин-цитозин обусловлена значительным преобладанием энтальпийного фактора над энтропийным.

Таблица 5. Термодинамические характеристики (кДж/моль) образования водородо-связанного комплекса Г-Ц.

	$\Delta E$	BSSE	$\Delta ZPE$	$\Delta S$	$\Delta G$	$\Delta H_0$	$\Delta H_{298}$	k
Exp. [14]							-87.87	
B3LYP								
6-311+G(d,p)	-107.61	3.98	7.20*	-49.82	-46.72	-95.45	-95.64	$10.6 \times 10^7$
6-311++G(d,p)	-107.62	4.02	6.58*	-48.26	-48.54	-97.02	-96.80	$31.9 \times 10^7$
aug-cc-pVDZ	-110.12	6.01	9.73	-55.85	-40.01	-94.38	-95.87	$1.02 \times 10^7$
M062X								
6-311+G(d,p)	-118.03	4.48	5.85	-45.71	-61.68	-107.7	-107.39	$6392 \times 10^7$
WB97XD								
6-311+G(d,p)	-126.39	4.35	7.89	-51.84	-63.00	-114.16	-114.84	$10896 \times 10^7$
B97D**								
6-311+G(d,p)	-117.53	4.46	-	-	-	-	-	-

\*При вычислении значений нулевой колебательной энергии волновые числа масштабировались по методике [12].

\*\*Для данного метода приведены только те параметры, в расчете которых не используются значения волновых чисел.

## Литература

1. Зенгер В. Принципы структурной организации нуклеиновых кислот - М.: Мир, 1987.
2. Yakovchuk P., Protozanova E., Frank-Kamenetskii M.D. //Nucleic Acids Research 2006, Vol.34, № 2, p.564-574.
3. Spomer J., Jurecka P., Hobza P. // J.Am.Chem.Soc. 2004, Vol.126, № 32, p.10142-10151.
4. Lee C., Yang W., Parr R. G. // Phys. Rev. B 1988, Vol. 37, p. 785-789.
5. Becke A. D. // J. Chem. Phys. 1993, Vol. 98, p. 5648-5652.
6. Zhao Y. and Truhlar D. G. // J. Phys. Chem. 2006, Vol. 110, p. 5121-29.
7. Chai J.-D. and Head-Gordon M. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2008, Vol.10, p.6615-6620.
8. Grimme S. // J. Comp. Chem. 2006, Vol. 27, p. 1787-1799.
9. Березин К. В., Нечаев В. В., Зотов С. Н. // Журн. структ. химии 2004, Т. 45, № 3, с. 412-418.
10. Березин К.В., Нечаев В.В. // Оптика и спектроскопия 2005, Т.99, №4, с. 574-581.
11. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian09, Revision A.02. PittsburghPA: Gaussian, Inc., 2009.
12. Yoshida H., Ehara A., Matsuura H. // Chem. Phys. Lett. 2000, Vol. 325, № 4, p. 477-483.
13. К.В. Березин, В.В. Нечаев // ЖПС 2004, Т.71, № 2, с. 152-159.
14. Ce'lia Fonseca Guerra, F. Matthias Bickelhaupt, Jaap G. Snijders, et al. // J. Am. Chem. Soc. 2000, Vol. 122, p. 4117-4128.

## ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕНЗОЛА С ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ, ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Березин К.В.<sup>1</sup>, Нечаев В.В.<sup>2</sup>, Козлов О.В.<sup>1</sup>, Чернавина М.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

В рамках теории функционала плотности с использованием функционалов, SAM-B3LYP, WB97XD и M062X, выполнены расчеты ряда комплексных соединений бензола с атомами инертных газов. Проведен анализ изменения геометрических параметров бензола при комплексообразовании. Вычислены энергии диссоциации и расстояния между взаимодействующими системами с учетом базисной суперпозиционной ошибки. Обсуждается применимость различных функционалов для расчета такого типа взаимодействий.

## ВВЕДЕНИЕ

Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия характеризуются низкой энергией диссоциации, большими расстояниями между взаимодействующими системами, наличием низкочастотных колебательных состояний. При этом из-за слабого взаимодействия сохраняются и многие свойства

изолированных систем. При взаимодействии между неполярными системами преобладают дисперсионные силы, которые определяют универсальный тип взаимодействия и проявляются всегда. Такого рода взаимодействия определяют многие структурные, спектральные и другие характеристики веществ. Так, например они обуславливают наличие у инертных газов агрегатных состояний и наряду с водородными связями отвечают за пространственное строение биологических макромолекул.

Рассмотрение молекулярных комплексов с атомами инертных газов играет важную роль, в частности, при детальной интерпретации тонкоструктурных колебательных спектров молекул, зарегистрированных при низкой температуре в условиях матричной изоляции. Высокое разрешение таких спектров позволяет наблюдать полосы сателлиты или искажения контуров фундаментальных полос, которые могут быть обусловлены как молекулярными самоассоциатами, так и взаимодействием молекул с инертной матрицей. Такие взаимодействия могут приводить к одинаковому по порядку величины смещению колебательных полос. Таким образом, для определения природы этих смещенных колебательных полос необходим полный учет всех рассмотренных типов взаимодействий. Интерес к комплексным системам бензола с инертными газами довольно значителен, так в работе [1] из вращательной структуры вибронных полос были найдены расстояния между взаимодействующими системами бензол – (Ne, Ar, Kr, Xe, N<sub>2</sub>) для основного и первого возбужденного электронного состояния. В работе [2] выполнен расчет комплекса бензол-аргон методами *ab initio* и методом DFT/B3LYP [3,4]. В работе [5] методами теории функционала плотности с функционалами B97D [6] и WB97XD [7] выполнены расчеты димеров бензола и комплексов бензол-аргон.

Целью нашей работы было провести расчет структуры и термодинамических характеристик комплексов бензола с инертными газами в рамках метода теории функционала плотности с использованием функционалов CAM-B3LYP [8], M062X [9] и WB97XD с базисными наборами 6-311+G(d,p) и aug-cc-pVDZ. Учесть влияние базисной суперпозиционной ошибки и дать оценку применимости используемых функционалов для расчета дисперсионных взаимодействий.

#### МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Все расчеты структурных параметров и волновых чисел, выполнялись в рамках теории функционала плотности с использованием функционалов CAM-B3LYP, WB97XD и M062X с базисными наборами 6-311+G(d,p) и aug-cc-pVDZ по программе Gaussian 09 [10]. Исходная пространственная конфигурация задавалась таким образом, чтобы атом инертного газа находился точно над центром бензольного кольца. Именно такая конфигурация является наиболее энергетически выгодной [11] и для нее в работе [1] были экспериментально определены структурные параметры. Для подтверждения стабильности вычисленных конфигураций комплексов и расчета нулевой колебательной энергии дополнительно были вычислены значения волновых чисел, как самих комплексов, так и молекулы бензола.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строение комплекса бензола с атомами инертного газа принадлежит к группе симметрии показано на рис.1. Полученная конфигурация комплекса принадлежит к группе симметрии C<sub>6v</sub>. В таблице 1. представлены экспериментальные и вычисленные значения геометрических параметров комплексов бензола с инертными газами. Как видно из табл.1. наилучшее согласие с экспериментом, было получено в рамках метода DFT/WB97XD. Так для комплекса бензол-неон вычисленное значение расстояния оказалось завышенным на 0.037 ангстрема, а для комплексов с аргоном и криптоном заниженным на 0.027 и 0.007 ангстрема соответственно. В среднем наихудшие результаты получились в рамках метода CAM-B3LYP. Для комплекса бензол-неон расстояние в лучшем случае оказалось заниженным на 0.156 ангстрем, а для комплексов с аргоном и криптоном, сильно завышенным на величины 0.283 и 0.323 ангстрема соответственно. Вычисленные значения расстояний в рамках метода M062X являются систематически заниженными относительно экспериментальных. Особенно это заметно для комплекса бензола с атомом неона, где разница с

экспериментом составляет величину порядка 0.5 ангстрема. Как видно из табл.1., использование расширенного базисного набора aug-cc-pvdz, не приводит к систематическому улучшению вычисленных значений. Это связано с тем, что все применяемые функционалы имеют эмпирическую составляющую.

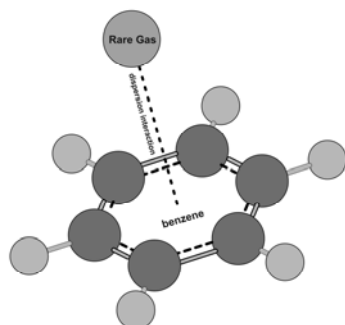


Рис.1. Пространственное строение ван-дер-Ваальсовых комплексов бензола с атомами инертных газов.

Таблица 1. Экспериментальные [1] и вычисленные различными теоретическими методами значения расстояний (в ангстремах) между плоскостью бензольного кольца и атомами инертных газов.

Комплекс	Benzene- <sup>20</sup> Ne	Benzene- <sup>40</sup> Ar	Benzene- <sup>84</sup> Kr
Эксперимент [1]	3.460(1)	3.581(1)	3.676(1)
Расчет*			
SAM-B3LYP			
aug-cc-pvdz	3.304(0)	3.909(7)	4.061(6)
6-311+G(d,p)	3.212(9)	3.863(6)	3.998(9)
M062X			
aug-cc-pvdz	3.100(7)	3.398(7)	3.500(8)
6-311+G(d,p)	2.951(8)	3.409(9)	3.533(0)
WB97XD			
aug-cc-pvdz	<u>3.497(2)</u>	3.542(2)	<u>3.669(2)</u>
6-311+G(d,p)	3.403(6)	<u>3.553(8)</u>	3.624(2)

\*Оптимизация электронной структуры проводилась с учетом базисной суперпозиционной ошибки. Подчеркиванием отмечены величины, имеющие наименьшее расхождение с экспериментальными данными.

Вычисленные значения изменений в структуре молекулы бензола при образовании комплексов с инертными газами представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2. изменения геометрических параметров бензола при образовании комплексов с инертными газами очень незначительны. При переходе к расширенному базисному набору aug-cc-pvdz величины изменений в большинстве случаев уменьшаются или меняют знак. Наибольшее изменение длин СС и С-Н связей получено в рамках метода SAM-B3LYP/6-311+G(d,p) для комплекса бензола с атомом аргона. Наблюдается корреляция знаков изменений длин связей бензола в рамках одного теоретического метода при расчете комплексов с различными инертными газами. Так, например, метод SAM-B3LYP с базисным набором 6-311+G(d,p) предсказывает упрочнение СС связей при взаимодействии со всеми рассматриваемыми атомами инертных газов, а с базисом aug-cc-pvdz их ослабление. Аналогичные корреляции наблюдается и для других методов. Из всех использованных теоретических методов, только метод WB97XD в обоих базисах предсказывает стабильное уменьшение длин связей СС и С-Н, что соответствует упрочнению молекулярной структуры бензола при таком типе взаимодействия.

Экспериментальные и вычисленные значения энергий диссоциаций комплексов бензола с инертными газами показаны в табл.3. Все представленные значения энергий диссоциаций были скорректированы на соответствующие величины базисных суперпозиционных ошибок. Как видно из табл.3. для комплекса бензол-аргон наилучшее согласие с экспериментом было получено в методах M062X и WB97XD. Так в определении энергии диссоциации  $D_0$  методом M062X/6-311+G(d,p)



ошибка составила 3.8%, а в определении  $D_e$  методом WB97XD/aug-cc-pvdz 7.5%. В обоих случаях вычисленные значения оказались меньше чем соответствующие экспериментальные. Вычисленные в рамках метода CAM-B3LYP значения энергий диссоциаций оказались сильно заниженными по сравнению с экспериментальными. Дополнительный учет суперпозиционной ошибки и поправки на нулевую колебательную энергию, привел к тому, что энергия диссоциации получились с другим знаком. Это обстоятельство, наряду с плохим описанием геометрической структуры комплексов позволяет сделать вывод о неприменимости этого метода для расчета дисперсионных взаимодействий. При расчете комплекса бензол-неон методом WB97XD с базисом aug-cc-pvdz было получено отрицательное значение волнового числа соответствующего трансляционному межмолекулярному колебанию, поэтому в табл.3. не представлены для этого расчета значения нулевой колебательной энергии и энергии диссоциации  $D_0$ . Как видно из табл.3. замена базисного набора 6-311+G(d,p) на более расширенный aug-cc-pvdz приводит к уменьшению величины суперпозиционной ошибки только для комплекса бензол-неон. Во всех других случаях суперпозиционная ошибка для базиса aug-cc-pvdz оказалась больше чем для 6-311+G(d,p). Это можно объяснить тем, что величина суперпозиционной ошибки не зависит однозначно только от размера базисного набора. Как показывает практика расчетов термодинамических параметров различных комплексных соединений, величина суперпозиционной ошибки зависит от структуры базисного набора, расстояния между комплексообразующими системами [12] и в значительной степени от относительного размера (в смысле числа базисных функций описывающих распределение электронной плотности) систем образующих комплекс.

Таблица 2. Вычисленные в рамках различных функционалов изменения геометрических параметров бензола (в ед.  $10^3$  ангстрем) при образовании комплексов с инертными газами.

Комплекс Метод	Benzene- <sup>20</sup> Ne		Benzene- <sup>40</sup> Ar		Benzene- <sup>84</sup> Kr	
	$\Delta(CC)$	$\Delta(C-H)$	$\Delta(CC)$	$\Delta(C-H)$	$\Delta(CC)$	$\Delta(C-H)$
CAM-B3LYP						
6-311+G(d,p)	-0.83	-0.20	-0.29	-0.10	-0.28	-0.11
aug-cc-pvdz	0.02	-0.03	0.05	-0.04	0.04	-0.05
M062X						
6-311+G(d,p)	0.01	0.11	0.10	0.02	0.16	0.02
aug-cc-pvdz	0.02	-0.02	0.11	-0.02	0.07	-0.05
WB97XD						
6-311+G(d,p)	-0.54	-0.16	-0.53	-0.18	-0.50	-0.20
aug-cc-pvdz	-0.26	-0.12	-0.03	-0.06	-0.08	-0.17

Таблица 3. Экспериментальные и вычисленные значения энергий диссоциации (в ед.  $\text{см}^{-1}$ ), нулевой колебательной энергии и вычисленные значения базисной суперпозиционной ошибки для комплексов бензола с инертными газами.

	Benzene- <sup>20</sup> Ne				Benzene- <sup>40</sup> Ar				Benzene- <sup>84</sup> Kr			
	<i>BSSE</i>	<i>AZPE</i>	$D_e$	$D_0$	<i>BSSE</i>	<i>AZPE</i>	$D_e$	$D_0$	<i>BSSE</i>	<i>AZPE</i>	$D_e$	$D_0$
Эксперимент[5]	–	–	–	–	–	59.2	399	340	–	–	–	–
CAM-B3LYP												
aug-cc-pvdz	38	19	29	10	41	15	11	-4	47	12	8	-4
6-311+G(d,p)	78	40	16	-24	26	33	9	-24	29	32	16	-17
M062X												
aug-cc-pvdz	43	57	225	169	55	83	486	403	95	57	607	550
6-311+G(d,p)	119	78	228	150	40	104	431	<u>327</u>	43	94	529	435
WB97XD												
aug-cc-pvdz	24	–	135	–	54	91	<u>369</u>	277	69	109	554	445
6-311+G(d,p)	85	140	116	-23	35	95	336	241	37	110	521	412

Примечание к табл.: подчеркиванием выделены значения имеющие лучшее согласие с экспериментальными данными; курсивным начертанием выделены значения, получившиеся с обратным знаком.

## ВЫВОДЫ

В рамках теории функционала плотности с использованием функционалов CAM-B3LYP, M063X и WB97XD, а так же базисных наборов 6-311+G(d,p) и aug-cc-pvdz рассчитаны геометрические параметры и энергии диссоциации ван-дер-Ваальсовых комплексов молекулы бензола с инертными газами. Все полученные значения скорректированы с учетом базисной суперпозиционной ошибки. Установлено, что наилучшие результаты в расчете геометрических параметров и энергий диссоциации получаются при использовании функционалов WB97XD и M063X. Анализ изменений геометрических параметров бензола при комплексообразовании показывает неоднозначность в определении знаков этих изменений, которые зависят как от выбора типа функционала, так и от выбора базисного набора. Показана неприменимость метода CAM-B3LYP для численного описания дисперсионного взаимодействия.

### Литература

1. Neusser H. J., Submann R., Smith A. M., et al. // Bunsenges. Phys. Chem. 1992, Vol.96, № 9, p. 1252-1259.
2. Henrik Koch, Berta Fernandez and Ove Christiansen // Journal of Chemical Physics 1998, Vol.108, №7, p. 2784-2790.
3. A. D. Becke // J. Chem. Phys. 1993, Vol.98, №7, p. 5648-5652.
4. Lee C., Yang W., Parr R. G. // Phys. Rev. B 1988, Vol.37, p. 785-789.
5. Hilal Rifaat, Hassan Walid M. I., Alyoubi Abdulrahman, et al. // Indian Journal of Chemistry 2013, Vol.52A, p. 19-27.
6. Grimme S. // J. Comp. Chem. 2006, Vol.27, №15, p. 1787-1799.
7. Chai J.-D. and Head-Gordon M. // Chem. Phys. 2008, Vol.10, p. 6615-6620.
8. Yanai T., Tew D., Handy N. // Chem. Phys. Lett. 2004, Vol.393, №1-3, p. 51-57.
9. Zhao Y., Truhlar D. G. // J. Phys. Chem. 2006, Vol.110, №15, p. 5121-5129.
10. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian09, Revision A.02. PittsburghPA: Gaussian, Inc., 2009.
11. Hobza P., Selzle Heinrich L., Schlag Edward W. // Chem. Rev. 1994, Vol.94, №7, p. 1767-1785.
12. Березин К.В., Березин В.И., Кирносков Н.А. и др. Учёт базисной суперпозиционной ошибки при расчётах межмолекулярных расстояний и термодинамических характеристик водородосвязанных комплексов // Проблемы оптической физики и биофотоники. Саратов. 2009. Изд. "Новый ветер", с. 176-181.

## 9,10-АНТРАХИНОН И ЕГО МОНОАЗАЗАМЕЩЕННЫЕ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

*Березин К.В.<sup>1</sup>, Лихтер А.М.<sup>2</sup>, Чернавина М.Л.<sup>1</sup>, Козлов О.В.<sup>1</sup>, Чумаков Е.Л.<sup>1</sup>,  
Кочергина Д.Д.<sup>2</sup>, Егоренкова Т.А.<sup>2</sup>, Антонова Е.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

<sup>2</sup>*Астраханский государственный университет*

В рамках метода функционала плотности с использованием функционала B3LYP и базисного набора 6-311+G(d,p) рассчитаны равновесные электронные конфигурации, волновые числа и интенсивности полос в ИК и КР спектрах молекулы 9,10-антрахинона и ее моноазазамещенных в положении 1 и 2. Проведен анализ структурных и спектральных изменений при таком замещении. Установлена полная корреляция колебательных мод 9,10-антрахинона и его моноазазамещенных. Определены полосы в ИК и КР спектрах, которые могут быть использованы как идентификаторы при определении такого вида замещения.

## ВВЕДЕНИЕ

Издавна производные 9,10-антрахинона являются соединениями, участвующими в практической деятельности человека. Наиболее широко производные антрахинона используются в качестве красителей, кроме этого с развитием науки и технологий их стали использовать в цветной фотографии и электрофотографии, жидкокристаллических и фотохромных материалах, лазерной технике. При этом некоторые виды антрахинонов обладают биологической активностью. Большое число соединений из ряда антрахинонов содержится в растениях, животных, а также микроорганизмах, среди них -природные антибиотики антрациклины и кидамицины. Учитывая эти обстоятельства интерес к производным антрахинона как соединениям, перспективным для различного использования все увеличивается, что является несомненным стимулом для роста количества исследований этих соединений.

В настоящее время накоплен довольно большой экспериментальный материал по методам синтеза и изучению реакционной способности различных производных антрахинона [1]. Много работ [2-17] посвящены экспериментальному и теоретическому исследованию колебательных состояний антрахинона и родственных ему соединений. Несмотря на это, некоторые виды производных антрахинона, такие как азосоединения, остаются малоизученными.

Целью данной работы было теоретическое исследование влияния моноазазамещения на структурные параметры и колебательные состояния 9,10- антрахинона.

#### МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Все расчеты электронной структуры, колебательных волновых чисел и электрооптических параметров молекул 9,10-антрахинона, 1- и 2-аза-9,10-антрахинона выполнялись методом теории функционала плотности с использованием функционала B3LYP [18,19] и базисного набора 6-311+G(d,p). Расчеты выполнялись по программе Gaussian [20]. Моделирование колебательных ИК и КР спектров проводилось с использованием программы [21]. При моделировании использовались лоренцевы контура, а полуширина всех полос задавалась численно равной  $5 \text{ см}^{-1}$ . Сравнение форм нормальных колебаний проводилось с помощью программы Molekel [22] и вычисленных значений декартовых векторов смещений атомов при нормальных колебаниях.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Строение молекул монозамещенных 9,10- антрахинона показано на рис.1. Эти молекулы являются плоскими и принадлежат к группе симметрии  $C_s$ . Как видно из рис.1 при замещении во внешнем кольце одного атома углерода на атом азота система сопряжения не меняется, и структурные изменения носят локальный характер, ограничиваясь только этим кольцом. Следует заметить, что изменения геометрических параметров 9,10- антрахинона нами считались значимыми, если длины валентных связей изменялись не менее чем на 0.01 ангстрем, а углы не менее чем на один градус. Величины изменений геометрических параметров при замещении в положении 1- и 2- практически одинаковые, с той лишь разницей, что при замещении в положении 1- более значительно уменьшаются расстояния между близлежащими атомами водорода внешнего кольца и атомами кислорода, которые образуют неклассическую внутримолекулярную водородную связь. Наибольшее изменение длины валентной связи в кольце составило по абсолютной величине 0.061 ангстрем, а угла 3.6 градуса.

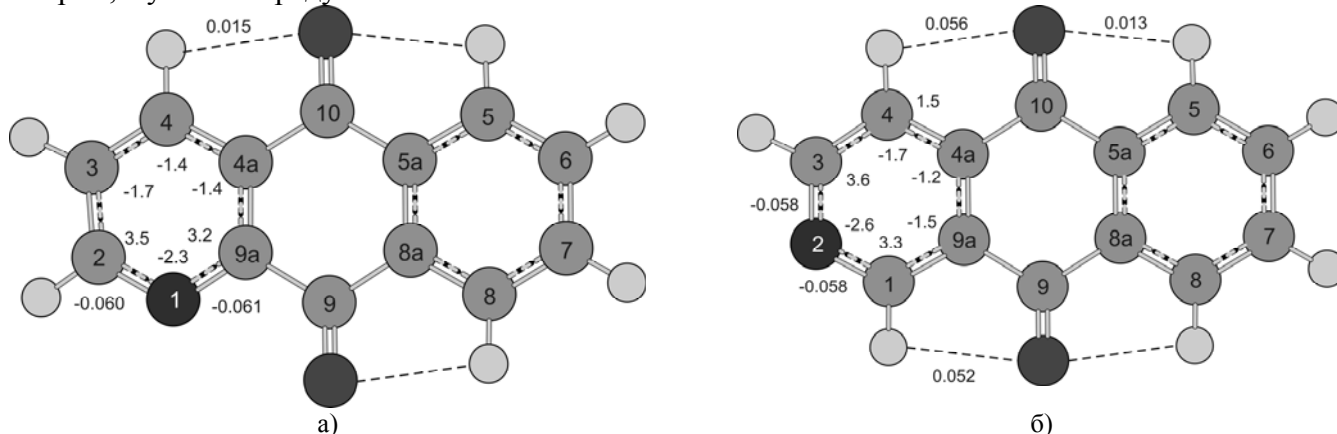


Рис.1. Строение и нумерация атомов 1- а) и 2- б) аза-9,10- антрахинона. Числами на рисунке показаны изменения геометрических параметров (длин связей в ангстремах, углов в градусах) вычисленные методом DFT/B3LYP/6-311+G(d,p) при азазамещении 9,10- антрахинона. Пунктирной линией показаны неклассические внутримолекулярные водородные связи

Теоретические ИК и КР спектры поглощения 9,10-антрахинона и его моноазазамещенных показаны на рис.2. Как видно из рис.2, понижение группы симметрии с  $D_{2h}$  у 9,10-антрахинона до  $C_s$  у моноазазамещенных и соответственно снятие альтернативного запрета, на проявление колебаний в ИК и КР спектрах приводит к тому, что в этих спектрах начинают проявляться колебания, которые у антрахинона были не активны. Так, например, в ИК-спектре замещенных антрахинона в области  $400-500 \text{ см}^{-1}$  проявляются слабоинтенсивные полосы  $\omega_{теор.} = 447, 477 \text{ см}^{-1}$  в 1-аза-9,10-антрахиноне и

$\omega_{теор.} = 425,502 \text{ см}^{-1}$  в 2-аза-9,10 – антрахиноне. Колебания  $\omega_{теор.} = 447 \text{ см}^{-1}$ ,  $\omega_{теор.} = 425 \text{ см}^{-1}$  и  $\omega_{теор.} = 502 \text{ см}^{-1}$  образованы неплоскими колебаниями колец, а  $\omega_{теор.} = 477 \text{ см}^{-1}$  представляет собой дыхательное колебание центрального кольца. В 9-10-антрахиноне аналогичные по форме колебания принадлежат к типам симметрии  $B_{1g}$ ,  $B_{2g}$ ,  $A_u$  и  $A_g$ , которые не проявляются в ИК-спектре.

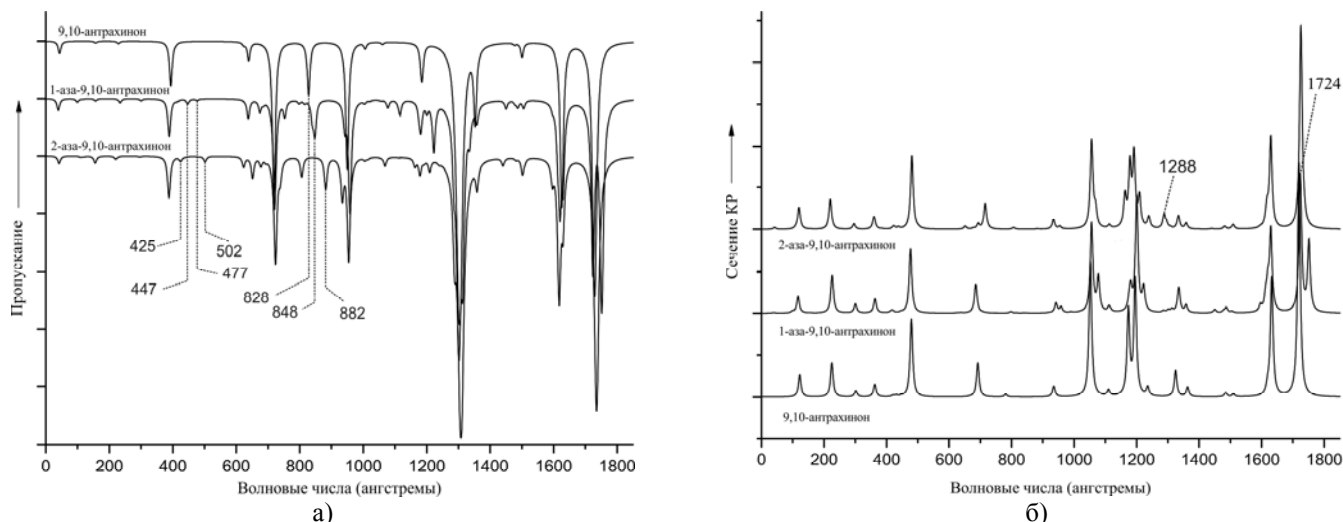


Рис.2. Теоретические ИК а) и КР б) спектры поглощения 9,10-антрахинона и его 1- и 2-азазамещенных в области 0-1800  $\text{см}^{-1}$  рассчитанные методом DFT/B3LYP/6-311+G(d,p). Числами на рисунке показаны значения волновых чисел ( $\text{см}^{-1}$ ) некоторых колебательных полос

В области 800-900  $\text{см}^{-1}$  в спектре 9,10-антрахинона согласно расчету наблюдается полоса средней интенсивности  $\omega_{теор.} = 828 \text{ см}^{-1}$  образованная неплоскими колебаниями С-Н связей. При моноазозамещении эта полоса смещается вправо по шкале волновых чисел на  $20 \text{ см}^{-1}$  при замещении в положении 1- и на  $54 \text{ см}^{-1}$ , в положение 2-. В КР спектре моноазозамещенных 9,10-антрахинона согласно расчету то же начинают проявляться колебания не активные в КР спектре 9,10-антрахинона. Так, например, в КР спектре 1-аза-9,10-антрахинона ярко проявляется противофазное колебание С=О связей, которое в 9,10-антрахиноне относится к типу симметрии  $B_{1u}$ . В КР спектре 2-аза-9,10 – антрахинона согласно расчету наблюдается значительное (вправо по шкале волновых чисел на  $53 \text{ см}^{-1}$ ) смещение полосы образованной плоскими колебаниями С-Н связей. В 9,10 – антрахиноне этому колебанию соответствует  $\omega_{теор.} = 1235 \text{ см}^{-1}$ , а в 2-аза-9,10 – антрахиноне  $\omega_{теор.} = 1288 \text{ см}^{-1}$ .

## ВЫВОДЫ

Методом DFT/B3LYP с базисным набором гауссовских функций 6-311+G(d,p) рассчитаны равновесные электронные конфигурации, колебательные волновые числа и интенсивности полос в ИК и КР спектрах молекул 9,10-антрахинона, 1- и 2-аза-9,10-антрахинона. Проведено моделирование ИК и КР спектров исследованных соединений. Показано, что изменения в структуре 9,10-антрахинона при моноазозамещении носят локальный характер и не выходят за рамки кольца в котором происходит замещение. Наибольшие изменения длин валентных связей не превышает 0.061 ангстрем, а углов 3.6 градуса. Высоочастотный сдвиг ИК полосы  $828 \text{ см}^{-1}$  образованной неплоскими колебаниями С-Н связей в 9,10-антрахиноне, а так же проявление в КР спектре полос  $1724 \text{ см}^{-1}$  и  $1288 \text{ см}^{-1}$  можно использовать в качестве идентификатора моноазозамещенных 9,10-антрахинона.

## Литература

1. Горелик М.В. Химия антрахинонов и их производных - М. : Химия, 1983.
2. Березин К. В., Кривожижина Т. В., Нечаев В. В. // Оптика и спектр. 2004, Т. 97, № 4, с. 559–565.
3. Pecile C., Lunelli B. // J. Chem. Phys. 1967, Vol. 46, № 6, p. 2109–2118.
4. Gazis E., Heim P. //Tetrahedron Lett. 1967, Vol.7, № 13, p. 1185–1189.
5. Singh S.N., Singh R.S. //Spectrochim. Acta 1968, Vol.24A, № 10, p. 1591–1597.
6. Gazis E., Heim P., Meister C., et al. // Spectrochim. Acta 1970, Vol.26A, № 3, p. 497–516.
7. Spanget-Larsen J., Christensen D.H., Thulstrup E.W. // Spectrochim. Acta 1987, Vol.43A, № 3, p. 331–336.

8. Stenman F. // J. Chem. Phys. 1969, Vol. 51, № 8, p. 3413–3414.
9. Miyazaki Y., Ito M. // Bull. Chem. Soc. Japan 1973, Vol. 46, № 1, p. 103–106.
10. Räsänen J., Stenman F. // Phys. Fenn. 1975, Vol. 10, № 4, p. 183–189.
11. Lehmann K.K., Smolarek J., Khalil O.S., et al. // J. Chem. Phys. 1979, Vol. 83, № 9, p. 1200–1205.
12. Строкач Н.С., Шигорин Д.Н., Щеглова Н.А. Электронно-колебательные спектры многоатомных молекул - М.: Наука, 1982.
13. Girlando A., Ragazzon D., Pecile C. // Spectrochim. Acta 1980, Vol. 36A, № 12, p. 1053–1058.
14. Гастилович Е.А., Дементьев В.А., Мишенина К.А. // Журн. физ. химии 1981, Т. 55, № 1, с. 73–77.
15. Гастилович Е.А., Клименко В.Г., Мишенина К.А. // Журн. физ. химии 1982, Т. 56, № 11, с. 2789–2793.
16. А.Н. Аношин, Гастилович Е.А., Клименко В.Г. и др. Колебательные спектры многоатомных молекул - М.: Наука, 1986.
17. Ball B., Zhou X., Liu R. // Spectrochim. Acta 1996, Vol. 52A, № 14, p. 1803–1814.
18. Becke D. // J. Chem. Phys. 1993, Vol.98, №7, p. 5648-5652.
19. C. Lee, W. Yang, and R. G. Parr // Phys. Rev. B 1988, Vol.37, p. 785-789.
20. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Gaussian09, Revision A.02. PittsburghPA: Gaussian, Inc., 2009.
21. Файфель А. Б., Березин К. В., Нечаев В. В. Программа для моделирования и визуализации колебательных ИК и КР спектров по данным квантово-механических расчетов. Проблемы оптической физики. Саратов: Изд. ГосУНЦ “Колледж”. 2003. С. 74–77.
22. Portmann S., Fluekiger P.F. <http://www.cscs.ch/molekel/>

**ФИЗИКА НАНООБЪЕКТОВ****ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «KVAZAR» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ**

*Глухова О.Е., Колесникова А.С., Савостьянов Г. В., Слепченков М.М., Шмыгин Д.С.,  
Зыктин А.А., Курьлева А.С.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В работе представлен программный комплекс «KVAZAR» для компьютерного моделирования объектов молекулярного, супрамолекулярного, нано-, микро- и макроуровней. Описаны функциональные возможности программного комплекса и рассмотрена его архитектура. Приведены основные классы математических моделей, реализуемых в данном комплексе. Рассматриваются вопросы организации параллельных вычислений, а также визуализации результатов расчетов. Представлены результаты апробации реализованных в программном комплексе «KVAZAR» методов и подходов.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время благодаря стремительному развитию таких наукоемких отраслей, как электронная промышленность и медицина возросла потребность в проведении численных прогностических экспериментов на атомарно-молекулярном уровне. Эффективность прогностического моделирования во многом определяется наличием IT-решений, используемых для реализации сложных численных экспериментов. В связи с этим актуальной задачей молекулярного моделирования является разработка гибких, легко расширяемых вычислительных платформ, удобных в эксплуатации, в которых реализовано большинство современных методов и подходов молекулярного моделирования.

К числу основных требований, которым должны удовлетворять современные программные комплексы молекулярного моделирования, принято относить разнообразие реализуемых в программе теоретических методов и подходов, в том числе наличие гибридных математических моделей, позволяющих реализовывать расчеты сразу на нескольких уровнях, поддержка высокопроизводительных вычислений, а также удобство и возможности пользовательского интерфейса. Несмотря на достигнутый прогресс в области разработки пакетов прикладных программ, проблема создания универсального пакета молекулярного моделирования, реализующего широкий класс математических моделей, по-прежнему актуальна. Многие хорошо известные зарубежные программные продукты являются закрытыми, в связи с чем отсутствует возможность адаптации реализуемых в программе подходов для решения конкретной научной задачи. Часть программ с открытым исходным кодом реализованы на языках программирования C/C++/Fortran, которые не очень удобны для гибкого манипулирования возможностями пакета на уровне кода.

Целью данной работы является создание открытого многопроцессорного программного комплекса молекулярного моделирования «KVAZAR», сочетающего преимущества наиболее успешных современных пакетов молекулярного моделирования и обладающего гибкой, легко модифицируемой архитектурой.

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «KVAZAR»**

Разрабатываемый комплекс молекулярного моделирования «KVAZAR» предназначен для решения широкого класса задач биофизики и медицины:

- 1) расчет электропроводности и теплопроводности наноструктур и биосистем с целью создания на их основе высокочувствительных сенсорных устройств;
- 2) моделирование физико-химических процессов в интима артерий на атомно-молекулярно-клеточном уровне с целью выявления механизма проникновения липопротеинов в межэндотелиальное пространство;
- 3) моделирование процессов транспортировки органических и неорганических молекул на графене с целью выявления оптимального способа управления их перемещением;
- 4) моделирование процессов самосборки биомакромолекул с целью развития современных технологий получения бионаноматериалов.

В комплексе «KVAZAR» реализованы как классические подходы молекулярного моделирования, так и новые модификации уже существующих методов математического моделирования для решения описанных выше задач:

- молекулярно-механический метод на основе потенциала REBO [1];
- молекулярно-механический метод на основе потенциала AIRBEO [2];
- алгоритм классической молекулярной динамики с использованием термостатов Берендсена и Нозе-Гувера [3];
- крупнозернистая модель с использованием силового поля MARTINI [4].
- адаптированный квантово-химический метод сильной связи для исследования электронных и механических свойств углеродных наноструктур, а также их поведения в электрическом поле [5-7];
- модифицированная модель гибридного метода ММ/QМ (молекулярная механика/квантовая механика) с оригинальным способом выявления активной и буферной областей в исследуемой молекулярно-атомной системе [8];
- полуэмпирический квантово-химический метод PM6 [9].

Разрабатываемый программный комплекс ориентирован на использование гибридной параллельной архитектуры, сочетающей различные технологии параллельного программирования (MPI, OpenMP), что позволяет в несколько раз сократить время моделирования физико-химических процессов на атомарно-молекулярном уровне.

#### АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «KVAZAR»

Архитектура разрабатываемого программного комплекса «KVAZAR» изображена на рис. 1. Основу комплекса составляют вычислительный и графический модули.

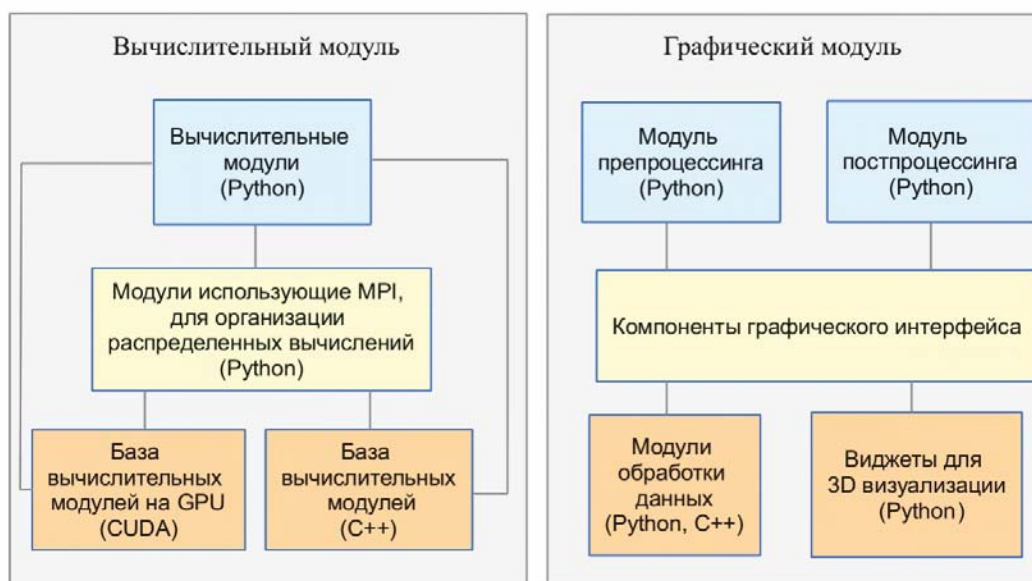


Рис. 1. Архитектура программного комплекса «KVAZAR»

Вычислительный модуль представляет собой набор подмодулей, позволяющих проводить вычисления с помощью различных подходов (молекулярная динамика, молекулярная статика, квантовые вычисления энергетических характеристик и т.д.). Эти подмодули выполнены в виде документированных Python скриптов, позволяющих производить расчеты на основе конфигурационных файлов. Иерархия подмодулей проектируется таким образом, чтобы обеспечить полный доступ ко всем возможностям вычислительного модуля путем написания пользовательских скриптовых сценариев.

Вычислительный модуль имеет трехуровневую иерархию. На нижнем уровне иерархии находятся модули, критичные к производительности. Часть этих модулей реализуется на C++ с использованием библиотеки Boost-Python и формирует базу для произведения вычислений на CPU.

Другая часть этих модулей реализуется с использованием CUDA SDK и формирует базу для произведения вычисления на GPU.

На следующем уровне иерархии находятся модули, использующие MPI, которые позволяют объединить модули нижнего уровня иерархии, для возможности работы на вычислительных платформах кластерного типа как на CPU, так и на GPU. На самом верхнем уровне иерархии располагаются интерфейсные модули, обеспечивающие пользовательский доступ к возможностям комплекса. Также на этом уровне есть возможность написания пользовательских скриптов для организации расчетов

В настоящее время разрабатываемый графический модуль имеет следующую концепцию. Графический интерфейс пользователя состоит из двух подмодулей, один из которых выполняет функцию препроцессинга, другой - постпроцессинга. Препроцессинг ориентирован на выполнение следующих операций: структурная модификация молекулярных объектов, задание условий постановки численного эксперимента, выбор метода компьютерного моделирования и подготовка входных файлов для вычислительного модуля. Постпроцессинг будет ориентирован на работу с выходными файлами, формирующимися в результате работы вычислительного модуля.

Графический модуль программы «KVAZAR» характеризуется трехуровневой иерархией. Нижний уровень иерархии составляют модули, реализующие операции по работе с данными, а также элементы интерфейса для 3D визуализации молекулярных структур, использующие библиотеку PyOpenGL. На втором уровне иерархии располагаются следующие элементы графического интерфейса: модули проектирования молекулярных структур и их отображения в трехмерной конфигурации. Данные модули служат базовыми для модулей пре- и постпроцессинга, находящиеся на следующем уровне иерархии.

В рамках выполнения данной работы для описанного графического модуля программы «KVAZAR» разрабатывался блок визуализации атомных орбиталей Слейтера в рамках реализации метода MO. Как известно, основу большинства квантово-химических методов составляет процедура разложения молекулярных орбиталей по линейным комбинациям базисных функций, в качестве которых выбираются волновые функции орбиталей атомов, составляющих рассматриваемую молекулу. Эта процедура, получившая в специальной литературе название метод ЛКАО (линейная комбинация атомных орбиталей) [10], позволяет осуществлять расчеты энергетических термов, давать оценку вероятности переходов между уровнями энергии для простых и сложных молекул, определять термодинамическую устойчивость и реакционную способность молекул, а также проводить поисковые исследования возможностей синтеза новых молекулярных соединений.

Реализация модуля визуализации атомных орбиталей проходила следующим образом. С помощью полярных координат  $\varphi_i$  и  $\square_i$ , задающих радиальную составляющую волновой функции, осуществлялось построение минимального фрагмента сферической поверхности - четырехугольного полигона. Каждый четырехугольный полигон характеризуется указанными выше параметрами и описывает сегмент поверхности атомной орбитали в интервале  $\varphi_i + \Delta\varphi$ ,  $\square_i + \Delta\square$  (рис. 2). С учетом периодичности волновой функции с помощью данного сегмента выполнялось построение всей сферической поверхности атомной орбитали. Число элементарных сегментов разбиения поверхности определяется выражением  $N_\varphi \times N_\theta$ , где  $N_\varphi = \frac{2\pi}{d\varphi}$ ,  $N_\theta = \frac{2\pi}{d\theta}$ .

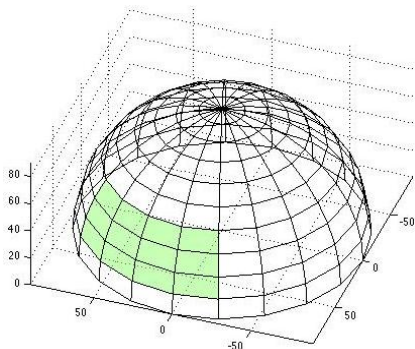


Рис. 2. Разбиение сферической поверхности атомной орбитали на элементарные сегменты – четырехугольные полигоны



С помощью описанной выше процедуры построения сферической поверхности атомных орбиталей были выполнены построения базовых типов атомных орбиталей в рамках метода ЛКАО. Программный модуль, реализующий эту функцию, был написан с помощью языка программирования Python. Полученные результаты построений представлены на рис. 3.

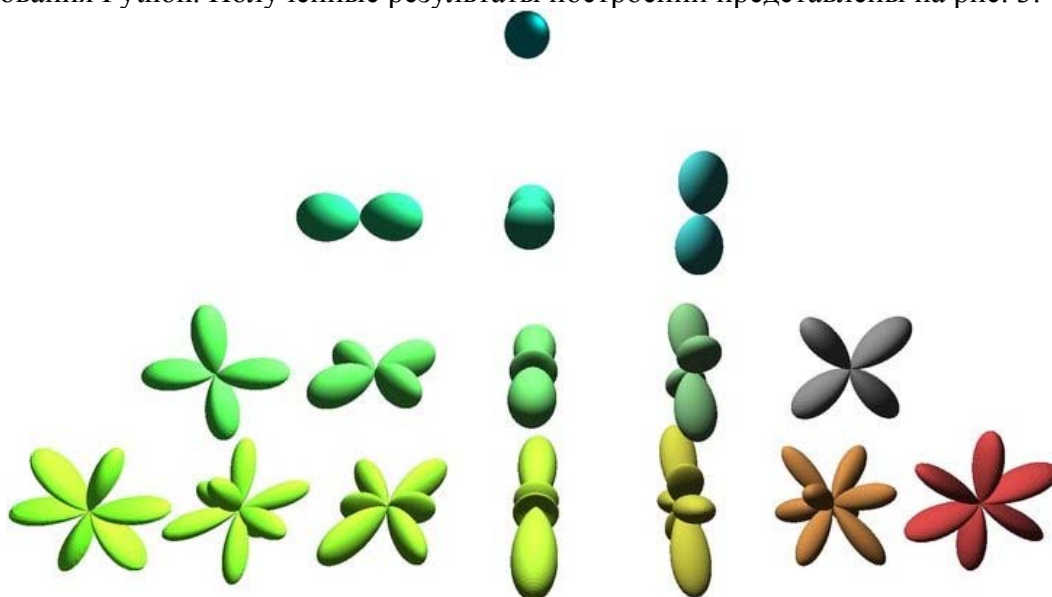


Рис. 3. Примеры построения атомных орбиталей с помощью разработанного модуля.

#### АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ, РЕАЛИЗУЕМЫХ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «KVAZAR»

Апробация методов и подходов, реализуемых в программном комплексе «KVAZAR», осуществлялась на примере решения нескольких тестовых задач. Рассмотрим некоторые из них.

1) Расчёт энергии отталкивания углеродных наноструктур в рамках полуэмпирического метода PM6.

В ходе апробации полуэмпирического метода PM6 в качестве первого этапа тестирования проводился расчёт энергии отталкивания для пар атомов углерода. Результаты расчета представлены на рис. 4. Из графика видно, что по мере удаления атомов углерода друг от друга энергия их отталкивательного взаимодействия достигает насыщения.

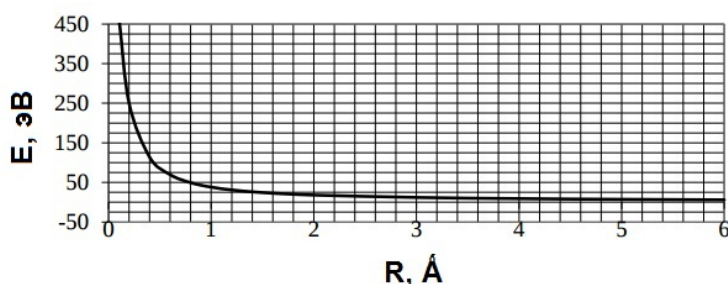


Рис. 4. Зависимость энергии отталкивания между парой атомов углерода от расстояния между ними

Вторым этапом апробации стал расчет энергии отталкивания пары углеродных нанотрубок armchair с индексами хиральности (10,10), который осуществлялся по следующей формуле:

$$E = E_{rep} - (E_1 + E_2), \quad (1)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$  - энергии отталкивания между атомами отдельно первой и второй нанотрубок соответственно,  $E$  - энергия отталкивания между углеродными нанотрубками,  $E_{rep}$  - полная энергия отталкивания всех атомов системы. Результаты расчетов представлены на рис. 5. На графике четко прослеживается та же зависимость, что и установленная ранее для пары атомов углерода.

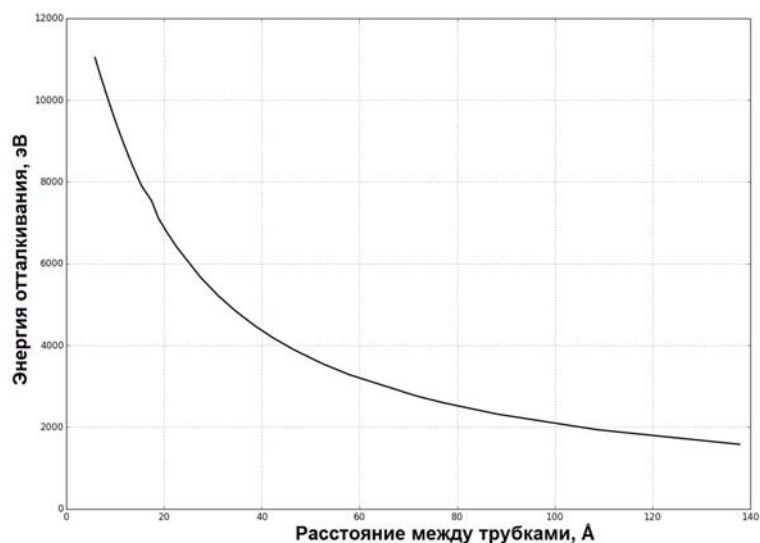


Рис. 5. Зависимость энергии отталкивания между парой углеродных нанотрубок от расстояния между ними

2) Для апробации модифицированной гибридной модели QM/MM с оригинальной методикой выявления областей, требующих высокоточных расчетов, была решена тестовая задача процесса растяжения углеродных нанотрубок. В качестве объектов исследования были выбраны бездефектная трубка zigzag и трубка с дефектом атомного каркаса. Процесс равномерного растяжения трубки моделировался с шагом по времени 1 фс. Скорость растяжения составляла  $0.02 \text{ \AA}/\text{фс}$ . В результате расчетов получены корректные с физической точки зрения данные об атомном строении и свойствах углеродной нанотрубки. В ходе анализа полученных данных установлено, что бездефектная нанотрубка является более прочной. Выявлено, что при растяжении трубки разрыв наступает с краев углеродной наноструктуры. При этом трубка, содержащая дефект атомного каркаса, разрушается быстрее, а разрушение начинает происходить в области разрыва. Процесс разрушения нанотрубки представлен на рис. 6-9.

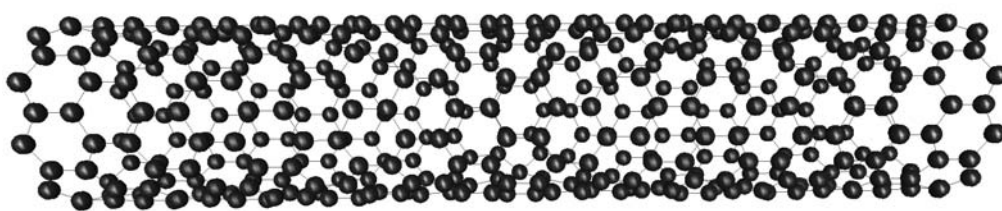


Рис. 6. Атомная структура нанотрубки zigzag без дефекта

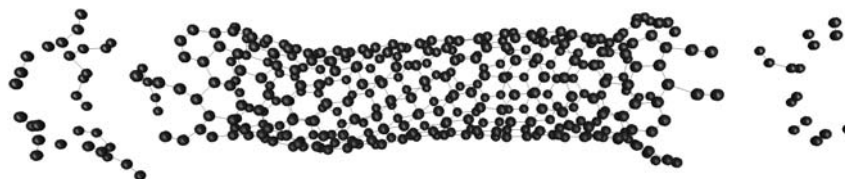


Рис. 7. Атомная структура бездефектной нанотрубки zigzag в процессе растяжения

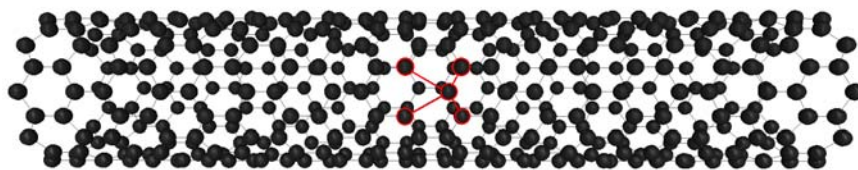


Рис. 8. Атомная структура нанотрубки с первоначальным дефектом



Рис. 9. Атомная структура нанотрубки с четырьмя дефектами

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многопроцессорный программный комплекс «KVAZAR» – инструментальное средство для проведения численного эксперимента на всех его стадиях. Архитектура программы предусматривает выполнение обработки данных и вычислений в параллельном режиме в процессе решения задачи. Уникальными особенностями представленного комплекса являются сочетание большого количества вычислительных методов и подходов, позволяющих проводить исследования объектов на различных уровнях от атомарного до макроуровня, а также гибкая, легко модифицируемая архитектура. Перспективы использования созданного продукта в наноструктур и биосистем определяются растущими потребностями в применении распределённых вычислительных систем для моделирования современных биотехнологических процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-31429, 14-01-31508).

### Литература

1. Brenner D.W., Shenderova O.A., Harrison J.A., et al. // *J. Phys.: Condens. Matter* 2002, Vol. 14, p. 783–802.
2. Stuart S.J., Tutein A.B., Harrison J.A. // *J. Chem. Phys.* 2000, Vol. 112, p. 6472.
3. J.M. Haile, *Molecular dynamics simulation*, Wiley (1992).
4. Marrink S.J., Risselada H.J., Yefimov S., et al. // *Phys. Chem. B* 2007, Vol. 111, p. 7812–7824.
5. Глухова О.Е., Колесникова А.С. // *Нано- и микросистемная техника* 2013, № 5, с. 2-5.
6. Глухова О.Е., Жбанов А.И. // *Физика твердого тела* 2003, Т. 45, №1, с.180-186.
7. Глухова О.Е. // *Нано- и микросистемная техника* 2008, № 7, с.8-12.
8. Glukhova O.E., Savostyanov G.V., Slepchenkov M.M. // *Procedia Materials Science* 2014, Vol. 6, p. 256–264.
9. Stuart S.J. // *J Mol Model* 2007, Vol. 13, p. 1173–1213.
10. Харрисон У. *Электронная структура и свойства твердых тел Т.1.* – М: Мир, 1983.

## МЕТОДИКА ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ПОЛНОЙ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ДЛИННОЦЕПОЧЕЧНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР НА ПРИМЕРЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Бокарев А.Н., Пластун И.Л.

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

В работе описана новая методика экстраполяции полной поляризуемости молекулярной структуры для протяженных однослойных углеродных нанотрубок.

В настоящее время объектами большого количества исследований являются углеродные нанотрубки, что обусловлено уникальностью их оптических, физико-химических и механических свойств, которые предоставляют возможность для создания принципиально новых устройств и материалов в различных сферах науки.

Углеродные нанотрубки, открытые Сумио Иидзимой в 1991 году [1], представляют собой протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей (в зависимости от количества плоскостей различают однослойные и многослойные нанотрубки) [2].

Однослойные углеродные нанотрубки – это подвид углеродных нановолокон со структурой, образованной сворачиванием графена в цилиндр с соединением его сторон без шва таким образом, что образуется свёрнутая в цилиндр графитовая плоскость, выложенная правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода. Сворачивание графена в цилиндр без шва возможно только конечным числом способов, отличающихся направлением двумерного вектора, который соединяет две эквивалентные точки на графене, совпадающие при его сворачивании в цилиндр. Этот вектор называется вектором хиральности однослойной углеродной нанотрубки [2]. Результат свёртки зависит от угла ориентации графитовой плоскости относительно оси нанотрубки  $\Theta$ , который задаёт хиральность нанотрубки, определяющую её электрические характеристики.

Хиральность нанотрубок представляется набором символов  $(n, m)$ , определяющих число единичных векторов в двух направлениях кристаллической решётки графита. Два полученных вектора задают вектор хиральности  $\vec{C}$  (рис.1), который определяет направление сворачивания графитовой плоскости [3]:

$$\vec{C} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad (1)$$

Для формирования нанотрубки с индексом хиральности  $(3,3)$  необходимо свернуть ограниченную пунктирными линиями графитовую плоскость в направлении вектора  $\vec{C}$  (рис.1).

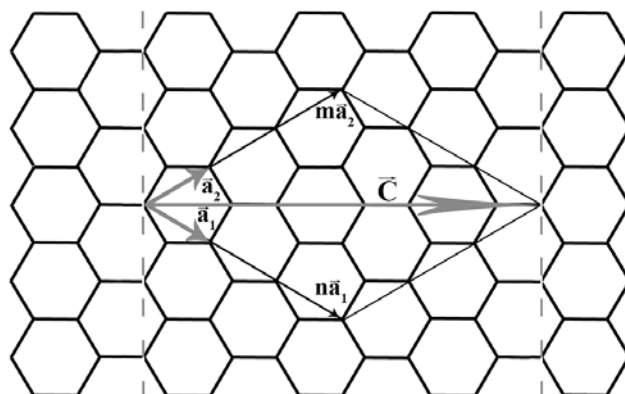


Рис. 1. Графитовая плоскость с обозначенными геометрическими параметрами, необходимыми для описания нанотрубки

Существуют различные типы нанотрубок в зависимости от их хиральности. Существует два вида ахиральных нанотрубок: нанотрубки с индексом хиральности  $(n,0)$ , называемые нанотрубками

типа «зигзаг» («zigzag») (рис.2), и с индексом хиральности (n,n) – нанотрубки типа «кресло» («armchair») (рис.3), все остальные называются хиральными или спиралевидными нанотрубками.

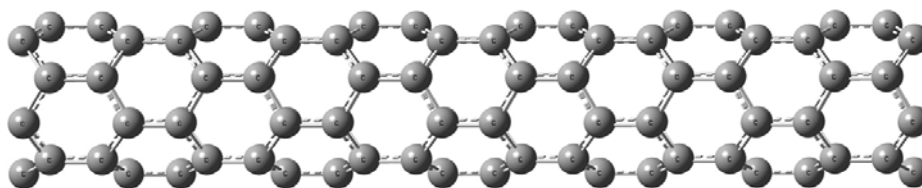


Рис. 2 Структура нанотрубки типа «зигзаг»

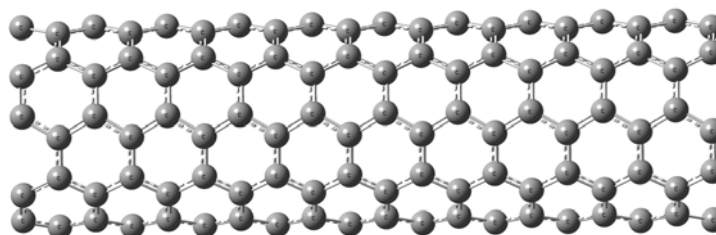


Рис. 3 Структура нанотрубки типа «кресло»

Благодаря различиям в структуре углеродных нанотрубок они приобретают совершенно различные электрооптические свойства, определяемые их хиральностью.

Одним из важных исследуемых параметров нанотрубок, как объектов с новыми электрооптическими свойствами, является тензор поляризуемости, который описывает изменение оптических свойств вещества в зависимости от направления распространения электромагнитного (лазерного) излучения [4]:

$$b_{ij} = \begin{vmatrix} b_{xx} & b_{xy} & b_{xz} \\ b_{yx} & b_{yy} & b_{yz} \\ b_{zx} & b_{zy} & b_{zz} \end{vmatrix} \quad (2)$$

В тензоре (2) каждый элемент  $b_{ij}$  является дипольным моментом, индуцируемым в направлении оси  $i$  при действии электрического поля вдоль оси  $j$ . При этом недиагональные элементы попарно равны за исключением случая вращения плоскости поляризации света.

Полная поляризуемость молекулярной структуры определяется как сумма диагональных элементов тензора (2):

$$b = b_{xx} + b_{yy} + b_{zz} \quad (3)$$

Основными целями данной работы являются: расчёт полной поляризуемости одностенных углеродных нанотрубок различной конфигурации с разными значениями длины; вывод новой методики экстраполяции полной поляризуемости молекулярной структуры для протяженных ОУНТ.

Различные длины нанотрубок рассматриваются по той причине, что в процессе производства, которое, как правило, основано на процессах горения [2], чётко откалиброванной длины нанотрубки зачастую достичь невозможно, и образец будет состоять из нанотрубок различной длины.

Численное моделирование, включающее вычисление компонент тензора поляризуемости, проводилось методами квантовой физики с помощью программного комплекса Gaussian 09 [5], который традиционно используется для решения задач молекулярного моделирования в различных сферах вычислительной физики и химии, в том числе и для расчёта параметров углеродных нанотрубок [6].

Процедуры расчёта компонент тензора поляризуемости для одной нанотрубки в зависимости от сложности её структуры требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени. Поэтому встаёт вопрос о возможности экстраполяции значения полной поляризуемости

протяженных структур по уже вычисленным менее длинным молекулярным структурам. По этой причине подобные исследования достаточно редки и являются весьма актуальными.

Расчёт компонент тензора поляризуемости выполнялся на основе метода B3LYP, который представляет собой гибридный метод, основанный на теории функционала плотности (Density Functional Theory (DFT)) (см, например, [7]). В данном методе применяется представление молекулярных орбиталей в виде линейной комбинации линейно-независимых функций, которые называются базисными [8]. В качестве базисных функций используется гауссовский тип функций в валентно-расщепленном базисном наборе. Такие базисы отличаются повышенной точностью, что достигается представлением валентных орбиталей двумя наборами функций. Валентно-расщепленные базисы обозначаются M-NPG [8], где M - количество простых гауссовых функций, описывающих внутренние атомные орбитали. M принимает значения от 3 до 6. Сжатая часть валентной функции определяется числом N, обычно равным 2 или 3. Наконец, диффузная часть валентной функции P чаще всего описывается одной гауссовой примитивой. В данной работе расчёт тензора поляризуемости производился с использованием одного из наиболее популярных и экономичных базисных наборов 3-21G, в котором атомные орбитали электронов внутренней оболочки аппроксимируются тремя гауссовыми функциями, M = 3, а орбитали валентной оболочки описываются соответственно двумя (N = 2) и одной (P = 1) гауссовой функцией.

В ходе моделирования были рассмотрены открытые одностенные углеродные нанотрубки различных длин конфигурации «кресло» с диаметром 6,8 Å и хиральностью (5,5), а также нанотрубки конфигурации «зигзаг» с диаметром 3,96 Å и хиральностью (5,0).

Приращение длины каждого типа нанотрубок происходило на равномерные величины, значения которых определены структурными особенностями нанотрубок «кресло» и «зигзаг» (рис. 4).

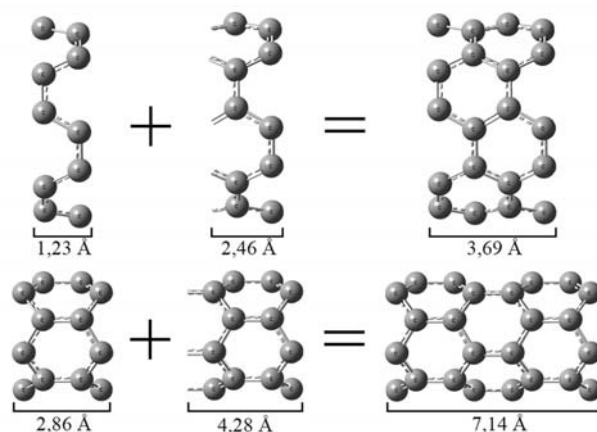


Рис. 4 Схема приращения длин нанотрубок типа «кресло» (вверху) и типа «зигзаг» (внизу)

Таким образом, с каждой итерацией численного моделирования длина нанотрубок конфигурации «кресло» увеличивалась на 2,46 Å, а конфигурации «зигзаг» на 4,28 Å. Данные величины обусловлены длиной одного слоя нанотрубки каждого типа, условно называемого «кольцом», с добавлением углеродных связей между слоями (рис.4).

Для каждого варианта были рассчитаны компоненты тензора поляризуемости, по которым была вычислена полная поляризуемость. Полученные значения, рассчитанные для нанотрубок различной длины и различных типов, представлены в таблицах 1 и 2. Из анализа полученных результатов видно, что с увеличением длины нанотрубки резко возрастает степень поляризуемости, что приводит к существенному изменению оптических свойств.

Увеличение длины нанотрубок приводит к существенному увеличению времени вычислений в программном комплексе Gaussian, что в случае длинноцепочечных соединений приводит к невозможности расчёта компонент тензора поляризуемости средствами персональных компьютеров. В связи с этим возникает необходимость использования некоторой полуаналитической методики

расчёта оптических параметров соединений большой длины, к которым относятся и углеродные нанотрубки.

Таблица 1. Значения полной поляризуемости для «armchair» нанотрубок различных длин		Таблица 2. Значения полной поляризуемости для «zigzag» нанотрубок различных длин	
Длина, Å	Полная поляризуемость	Длина, Å	Полная поляризуемость
1,23	1065,171	2,86	555,294
3,69	1302,758	7,14	1258,759
6,15	2423,41	11,42	2284,945
8,61	2807,559	15,7	3773,778
11,07	3350,104	19,98	5518,093
13,53	5067,949	24,26	7562,705
15,99	7094,94	28,54	10115,606
18,45	8647,51	32,82	12103,02
20,91	9844,42	37,1	18284,02
23,37	12593,75	41,38	22338,47
25,83	13738,14		
28,29	16739,69		

В качестве приемлемого и достаточно простого подхода к расчёту полной поляризуемости углеродных нанотрубок большой длины можно предложить полуаналитическую методику, основанную на экстраполяции численно рассчитанных компонент для различного количества слоёв на большее количество «колец».

Для экстраполяции полной поляризуемости нами была выбрана функция линейной регрессии, в которой коэффициент регрессии рассчитывался с использованием метода наименьших квадратов [9]. Для повышения точности расчётов мы усовершенствовали функцию экстраполяции путём добавления дополнительного уточняющего слагаемого. Каждое экстраполируемое значение рассчитывалось по формуле:

$$y = b_0 + b_1x + c, \tag{4}$$

где

$$b_0 = y_{cp} - b_1x_{cp}, \tag{5}$$

$$b_1 = \frac{\sum(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sum(x_i - x_{cp})^2}, \tag{6}$$

$x$  – значение длины, для которой производится экстраполяция,  $x_{cp}$ ,  $y_{cp}$  – средние значения исходных данных для длины нанотрубки и элемента тензора поляризуемости соответственно,  $c$  – уточняющее слагаемое:

$$c = y_{cp} / 10 \tag{7}$$

При этом следует отметить, что для достижения более высокой точности экстраполяции при расчёте каждого следующего значения полной поляризуемости стоит использовать только три предыдущих значения длины и полной поляризуемости, а не все имеющиеся исходные данные.

На основе подсчитанных данных для небольшого числа слоёв, приведённых в таблицах 1 и 2, были рассчитаны значения полной поляризуемости для нанотрубок большей длины. Полученные результаты представлены на рисунках 5 и 6.

Погрешность предложенной методики составляет от 3 до 10 % в зависимости от конфигурации углеродной нанотрубки. Повышение точности экстраполяции может быть достигнуто на основе использования более широкого множества исходных данных.

Таким образом, по результатам применения предложенной методики к полной поляризуемости одностенных углеродных нанотрубок и на основании данных о погрешности расчётов можно сделать вывод, что данная методика может быть использована для качественной оценки значений полной поляризуемости одностенных углеродных нанотрубок конфигураций

«зигзаг» и «кресло», а также различных длинноцепочечных соединений, например, биомолекул или молекул других органических веществ, размеры которых не превышают 60-80 Å.

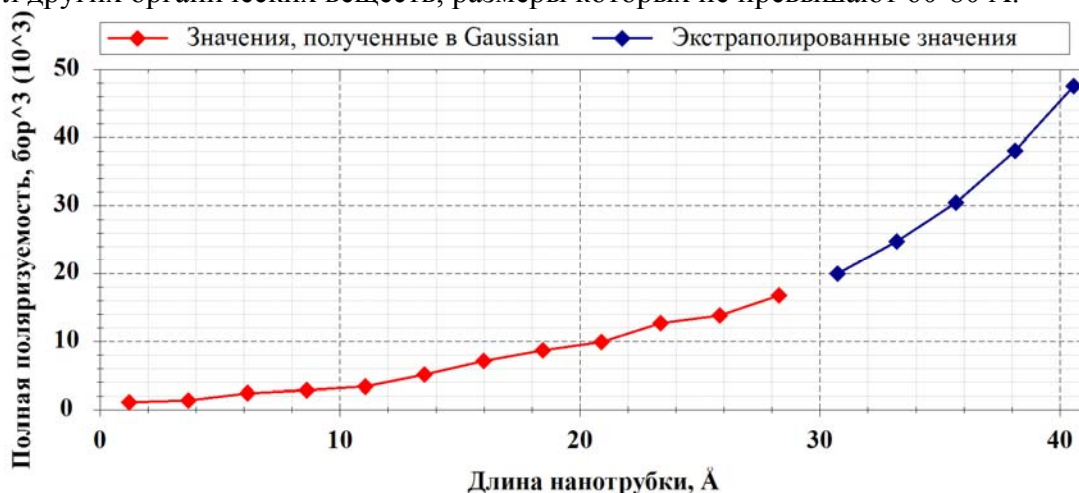


Рис. 5. Результаты экстраполяции полной поляризуемости для нанотрубок типа «кресло»

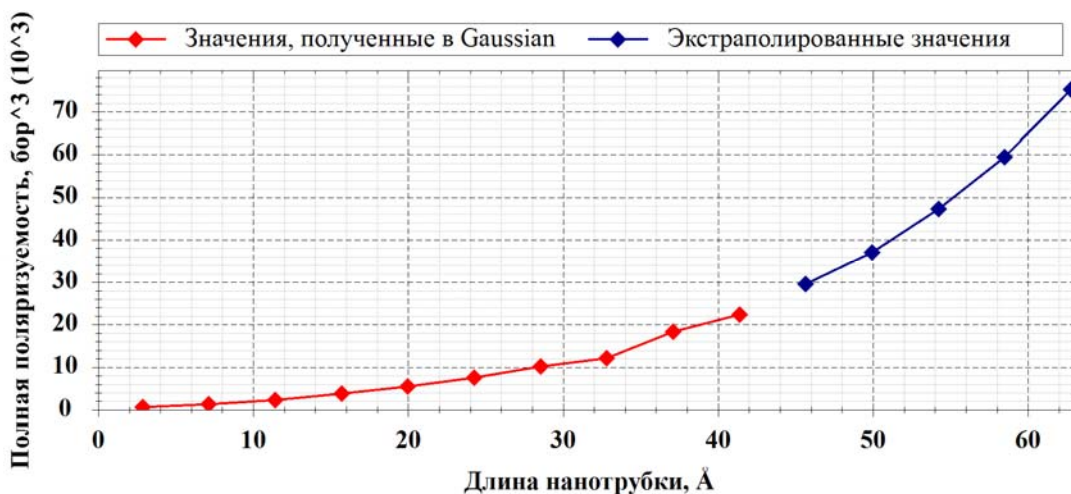


Рис. 6. Результаты экстраполяции полной поляризуемости для нанотрубок типа «зигзаг»

#### Литература

1. Iijima S. // Nature 1991, Vol. 354, p. 56-58.
2. Елецкий А.В. // УФН 1997, Т. 167, № 9, с. 945-972.
3. Фёдоров А.С., Сорокин П.Б., Аврамов П.В. и др. Моделирование свойств, электронной структуры ряда углеродных и неуглеродных нанокла-стеров и их взаимодействия с легкими элементами –Новосибирск: Издательство СО РАН, –2006. <http://test.kirensky.ru/master/articles/monogr/Book/book.htm>.
4. Верещагин А.Н. Поляризуемость молекул - М.: Наука, 1980.
5. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., et al. Gaussian 09, revision A.02. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
6. Chelmecka E., Pasterny K., Kupka T., et al. //Journal of Molecular Modelling 2012, Vol.18, p.1463–1472.
7. Хурсан С.Л. Квантовая механика и квантовая химия. Конспекты лекций–Уфа: ЧП Раянов, 2005. <http://www.qchem.ru/lectures/>.
8. Бутырская Е.В. Компьютерная химия: основы теории и работа с программами Gaussian и GaussView. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011.
9. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Руководство для экономистов –М.: Финансы и статистика, 1983. –302 с.



## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АНСАМБЛЕЙ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫЧИСЛЕНИЯМ

Бокарев А.Н., Пластун И.Л.

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.*

В статье предложена методика вычисления поляризуемости ансамбля нанотрубок, исходя из значений поляризуемости для одной нанотрубки.

Множество современных исследований в различных сферах науки связано с углеродными нанотрубками, что обусловлено уникальностью их оптических, физико-химических и механических свойств.

Одностенные углеродные нанотрубки представляют собой протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной свёрнутой в трубку графеновой плоскости. Структура графеновой плоскости представляет собой совокупность правильных шестиугольников, в вершинах которых расположены атомы углерода. Направление сворачивания графена в цилиндр задаётся двумерным вектором, который соединяет две эквивалентные точки на графене, совпадающие при его сворачивании. Такой вектор называется вектором хиральности однослойной углеродной нанотрубки [1]. Хиральность нанотрубок представляется набором символов  $(n, m)$ , определяющих число единичных векторов в двух направлениях кристаллической решётки графита. Два полученных вектора задают вектор хиральности  $C$  (рис.1).

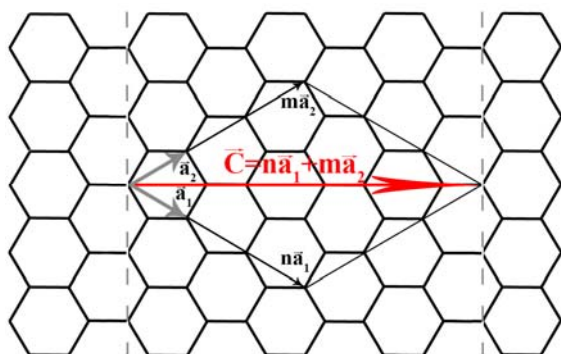


Рис. 1. Графитовая плоскость с обозначенными геометрическими параметрами, необходимыми для описания нанотрубки

На рисунке 1 показан пример формирования одностенной углеродной нанотрубки с индексами хиральности  $(3,3)$ , для этого необходимо свернуть ограниченную пунктирными линиями графитовую плоскость в направлении вектора  $C$ .

В зависимости от индексов хиральности существуют различные типы нанотрубок: нанотрубки с индексами хиральности  $(n,0)$  называются нанотрубками типа «зигзаг» («zigzag») (рис.2), с индексами хиральности  $(n,n)$  – нанотрубками типа «кресло» («armchair»), все остальные называются хиральными или спиралевидными нанотрубками. Благодаря различиям в структуре углеродных нанотрубок они приобретают совершенно различные электрооптические свойства, определяемые их хиральностью.

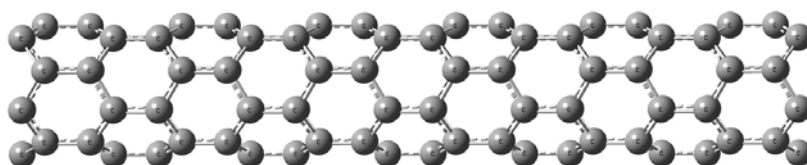


Рис. 2. Структура нанотрубки типа «zigzag»

Важным исследуемым параметром одностенных углеродных нанотрубок, как объектов с новыми электрооптическими свойствами, является тензор поляризуемости, который описывает изменение оптических свойств вещества в зависимости от направления распространения электромагнитного (лазерного) излучения [2]:

$$b_{ij} = \begin{vmatrix} b_{xx} & b_{xy} & b_{xz} \\ b_{yx} & b_{yy} & b_{yz} \\ b_{zx} & b_{zy} & b_{zz} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $b_{ij}$  - дипольный момент, индуцируемый в направлении оси  $i$  при действии электрического поля вдоль оси  $j$ . В тензоре (1) недиагональные элементы попарно равны за исключением случая вращения плоскости поляризации света. Поляризационные свойства молекулы характеризуются значением её полной поляризуемости, которая определяется как сумма диагональных элементов тензора (2):

$$b = b_{xx} + b_{yy} + b_{zz} \quad (2)$$

Основными целями данной работы являются: исследование оптических свойств ансамблей углеродных нанотрубок на примере расчёта полной поляризуемости ансамблей одностенных углеродных нанотрубок конфигурации «zigzag» различного состава; вывод новой методики экстраполяции полной поляризуемости ансамблей нанотрубок.

Ансамбли нанотрубок рассматриваются по той причине, что в процессе производства получают образцы, состоящие из различного числа нанотрубок с произвольной ориентацией относительно друг друга. По этой причине в большинстве экспериментов используются смеси нанотрубок, а не их конкретные экземпляры.





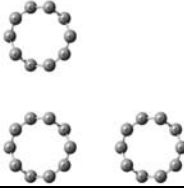

Вычисление тензора поляризуемости проводилось методами квантовой физики с помощью программного комплекса Gaussian 09 [3], который традиционно используется для решения задач молекулярного моделирования в различных сферах вычислительной физики и химии, в том числе и для расчёта параметров углеродных нанотрубок [4]. Процедуры расчёта тензора поляризуемости ансамбля нанотрубок в зависимости от числа нанотрубок в ансамбле требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени. Поэтому встаёт вопрос о возможности экстраполяции значения полной поляризуемости больших ансамблей одностенных углеродных нанотрубок по уже вычисленным значениям полной поляризуемости меньших ансамблей. По этой причине подобные исследования являются весьма актуальными.

Расчёт тензора поляризуемости выполнялся с помощью гибридного метода B3LYP, основанного на теории функционала плотности (Density Functional Theory (DFT)) (см, например, [5]). В данном методе применяется представление молекулярных орбиталей в виде линейной комбинации линейно-независимых функций, которые называются базисными [6]. В качестве базисных функций использовался гауссовский тип функций в валентно-расщеплённом базисном наборе. Такие базисы отличаются повышенной точностью, что достигается представлением валентных орбиталей двумя наборами функций. В данной работе расчёт тензора поляризуемости производился с использованием базисного набора 3-21G.

В ходе моделирования были рассмотрены ансамбли открытых одностенных углеродных нанотрубок типа «zigzag» длиной 2,86 Å, диаметром 3,96 Å и хиральностью (5,0). Для исследования брались ансамбли с различным числом и расположением нанотрубок.

Для каждого варианта были рассчитаны компоненты тензора поляризуемости, по которым была вычислена полная поляризуемость. Полученные значения, рассчитанные для различных вариантов ансамблей, представлены в таблицах 1 и 2. По результатам видно, что полные поляризуемости ансамблей №2 и №3 практически тождественны. Кроме того, примерно одинаковы между собой и полные поляризуемости ансамблей №4, №5, №6. Таким образом, полная поляризуемость ансамбля нанотрубок не зависит от конкретного расположения нанотрубок в нём. Стоит также заметить, что по сравнению с полной поляризуемостью ансамбля №1 полные поляризуемости ансамблей №2 и №3 примерно в 2 раза больше, а полные поляризуемости ансамблей №4, №5 и №6 больше примерно в 3 раза, т.е. полная поляризуемость ансамбля нанотрубок прямо пропорциональна числу нанотрубок в нём.

Таблица 1. Значения компонент и полной поляризуемости для различных ансамблей, включающих в себя от одной до трёх «zigzag» нанотрубок

№	Поляризуемость, бор <sup>3</sup>				Вид ансамбля
	xx	yy	zz	полная	
1	179,729	179,729	195,836	555,294	
2	443,353	338,398	363,413	1145,164	
3	418,158	365,11	363,383	1146,651	
4	730,296	495,305	529,065	1754,666	
5	606,194	602,718	524,013	1732,925	
6	640,722	574,841	527,651	1743,21	

Отмеченные для таблицы 1 зависимости прослеживаются и для результатов из таблицы 2. Видно, что полные поляризуемости ансамблей №1, №2, №3 и №4 практически равны между собой.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что полная поляризуемость ансамбля нанотрубок прямо пропорциональна числу нанотрубок в нём и не зависит от конкретных позиций нанотрубок в ансамбле.

Увеличение числа нанотрубок в ансамбле приводит к существенному увеличению времени вычислений в программном комплексе Gaussian, что в случае больших ансамблей приводит к невозможности расчёта компонент тензора поляризуемости средствами персональных компьютеров. В связи с этим возникает необходимость использования некоторой методики экстраполяции полной поляризуемости больших ансамблей.

В качестве приемлемого подхода к расчёту полной поляризуемости больших ансамблей углеродных нанотрубок можно предложить полуаналитическую методику, основанную на экстраполяции численно рассчитанной полной поляризуемости для ансамблей нанотрубок с меньшим составом нанотрубок на большие ансамбли.

Для выполнения процедуры экстраполяции предлагается функция линейной регрессии, в которой коэффициент регрессии рассчитывается с использованием метода наименьших квадратов. Каждое экстраполируемое значение рассчитывалось по формуле [7]:

$$y = b_0 + b_1x, \tag{3}$$

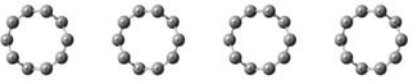
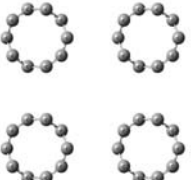


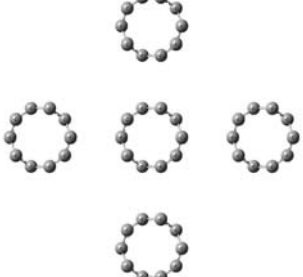
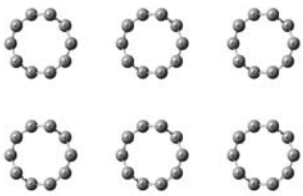
где

$$b_0 = y_{cp} - b_1x_{cp}, \tag{4}$$

$$b_1 = \frac{\sum (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sum (x_i - x_{cp})^2}, \quad (5)$$

$x$  – значение длины, для которой производится экстраполяция,  $x_{cp}$ ,  $y_{cp}$  – средние значения исходных данных для длины нанотрубки и элемента тензора поляризуемости соответственно.

Таблица 2. Значения компонент и полной поляризуемости для различных ансамблей, включающих в себя от четырёх до шести «zigzag» нанотрубок

№	Поляризуемость, бор <sup>3</sup>				Вид ансамбля
	xx	yy	zz	полная	
1	1025,6	651,662	694,12	2371,382	
2	835,264	841,49	662,77	2339,52	
3	818,991	886,634	653,901	2359,526	
4	888,799	763,242	682,97	2335,011	
5	1052,14	1044,96	835,363	2932,463	
6	1399,68	1218,46	957,029	3575,169	

На основе подсчитанных данных для небольших ансамблей углеродных нанотрубок, приведённых в таблицах 1 и 2, были рассчитаны значения полной поляризуемости для ансамблей, состоящих из большего числа углеродных нанотрубок.

Полученные результаты представлены на рисунке 3.

В зависимости от конфигурации ансамбля нанотрубок погрешность предложенной методики составляет около 3 %.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что полная поляризуемость ансамбля нанотрубок прямо пропорциональна числу нанотрубок в нём и может быть экстраполирована; данные о погрешности предложенной методики позволяют рекомендовать её

использование для качественной оценки значений полной поляризуемости ансамблей с большим числом углеродных нанотрубок в составе. Необходимо также отметить, что данная методика может быть применима к ансамблям различной геометрии с разным взаимным расположением нанотрубок. Кроме того, данную методику можно использовать и для смеси углеродных нанотрубок и молекул других органических соединений.

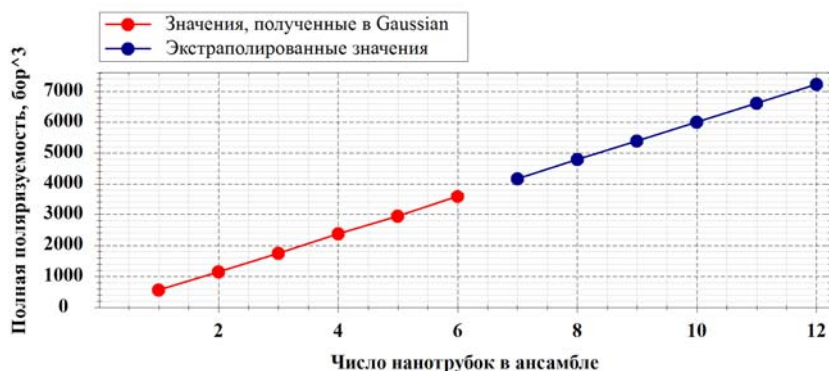


Рис. 3 Результаты экстраполяции полной поляризуемости для ансамблей нанотрубок

#### Литература

1. Елецкий А.В. // УФН 1997, Т. 167, № 9, с. 945-972.
2. Верещагин А.Н. Поляризуемость молекул - М.: Наука, 1980.
3. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., et al. Gaussian 09, revision A.02. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
4. Chelmecka E., Pasterny K., Kupka T., et al. //Journal of Molecular Modelling 2012, Vol.18, p.1463–1472.
5. Хурсан С.Л. Квантовая механика и квантовая химия. Конспекты лекций –Уфа: ЧП Раянов, 2005.  
<http://www.qchem.ru/lectures/>.
6. Бутырская Е.В. Компьютерная химия: основы теории и работа с программами Gaussian и GaussView - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. -224с.
7. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Руководство для экономистов –М.: Финансы и статистика, 1983.

**ФИЗИКА И ТЕХНИКА МАГНЕТИЗМА**

**АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРОВ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

*Маслов А.А., Проскуряков Г.М., Игнатъев А.А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Предложены рабочие алгоритмы геомагнитной ориентации в пространстве. Проведен расчет погрешностей предложенных алгоритмов. Предложена методика калибровки сенсоров, а также алгоритмическая компенсация выявленных погрешностей, путем корректировки показаний.

Ориентация подвижных объектов в магнитном поле Земли крайне актуальна. Это, прежде всего системы, автономные от спутниковых сигналов навигации GPS/Глонасс. Такие системы и пути их реализации обсуждались достаточно давно. В настоящее время появились мощные вычислительные средства, технологии создания миниатюрных многомерных магнитометров, акселерометров и гироскопов, позволяющие создавать автономные системы ориентации.

Блок-схема построения 3-х осевой системы ориентации показана на рис. 1. Показания аналоговых датчиков трехосного блока магнитометров (ТБМ), трехосного блока акселерометров (ТБА), трехосного блока гироскопов (ТБГ) преобразуются АЦП в дискретный код (цифровой сигнал), далее обрабатываются микроконтроллером по специальным алгоритмам и передаются на внешнее устройство по заданному интерфейсу.

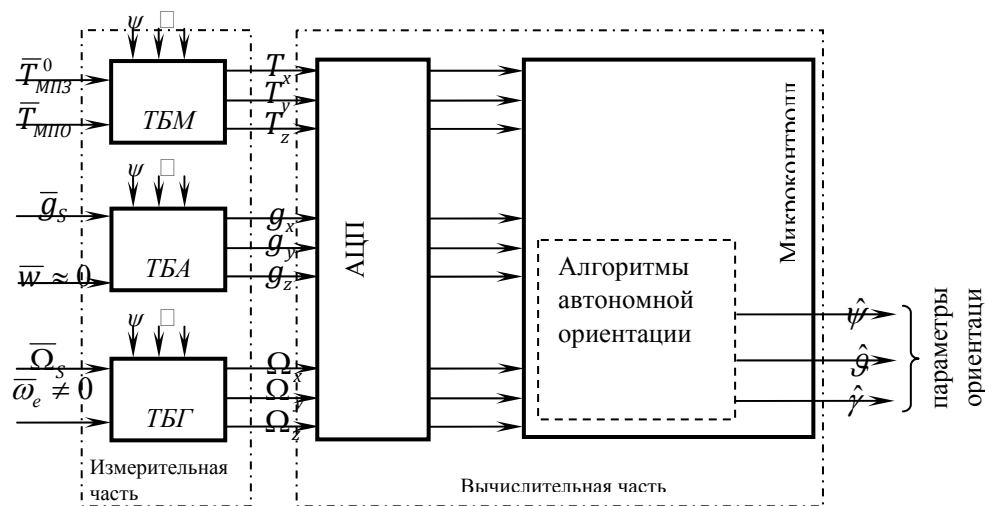


Рис. 1. Общий вид системы автономной ориентации

Для построения системы ориентации с учетом требований автономности, малогабаритности (и даже миниатюрности), необходимости достижения высоких показателей точности, надежности, долговечности и отказоустойчивости на практике чаще всего применяются аналитические и полуаналитические БСО на основе использования показаний ТБМ, ТБА и ТБГ.

Рассмотрим систему, построенную в виде миниатюрной измерительно-вычислительной системы на основе использования информации от двух блоков – ТБМ и ТБА. Расчеты показывают, что угловая разрешающая способность блоков ТБМ и ТБА по углам курса ( $\psi$ ), крена ( $\gamma$ ) и тангажа ( $\theta$ ) с учетом их пороговых чувствительностей до 100 нТл и  $10^{-3}g$  составляет несколько угловых минут, что вполне приемлемо для решения практических задач ориентации.

Показания ТБМ и ТБА могут быть описаны с помощью уравнения Пуассона для магнитного квазистационарного основания векторно-матричного уравнения преобразования координат вектора напряженности поля тяжести Земли (ПТЗ)  $g$ :

$$\bar{T} = (S + E) \cdot A_\gamma \cdot A_\theta \cdot A_\psi \cdot \bar{T}_{МПЗ} + \bar{T}_{МПО}^{\Pi}, \quad (1)$$

$$\bar{g}_m = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi \cdot \bar{g}_s \quad (2)$$

причем

$$\bar{T}_{МПЗ} = [T_{xg} T_{yg} T_{zg}]^T, \quad (3)$$

$$\bar{T}_{МПО}^{\Pi} = [PQR]^T, \quad (4)$$

$$\bar{T} = [T_x T_y T_z]^T, \quad (5)$$

$$\bar{g}_s = [O - gO]^T, \quad (6)$$

$$\bar{g}_m = [g_x g_y g_z]^T, \quad (7)$$

где  $\bar{T}_{МПЗ}$  - вектор напряженности МПЗ;  $\bar{T}_{МПО}$  - вектор напряженности МПО;  $\psi, \vartheta, \gamma$  - углы Эйлера-Крылова (углы истинного (географического) курса, тангажа и крена);  $T_x, T_y, T_z$  - проекции вектора напряженности МПЗ на оси приборного трехгранника ТБМ;  $g$  - ускорение свободного падения  $9,80665 \text{ м/с}^2$ ;  $\bar{g}_s$  - вектор напряженности ПТЗ;  $g_x, g_y, g_z$  - проекции вектора напряженности ПТЗ на оси приборного трехгранника ТБА;  $A_\gamma, A_\vartheta, A_\psi$  - матрицы углов крена, тангажа (дифферента) и истинного курса;  $S$  - матрица коэффициентов Пуассона (3Х3);  $E$  - единичная матрица (1Х3).

Векторы  $\bar{T}$  и  $\bar{g}_m$  соответствуют показаниям блоков ТБМ и ТБА, соответственно.

Из уравнения Пуассона (1) видно, что показания ТБМ зависят не только от параметров МПЗ ( $\bar{T}_{МПЗ}$ ), но и от параметров МПО ( $S, \bar{T}_{МПО}^{\Pi}$ ) и параметров ориентации основания ( $\psi, \vartheta, \gamma$ ). Следовательно, ТБМ может рассматриваться как гетеромагнитный модуль, реагирующий на магнитные ( $\bar{T}_{МПЗ}, S, \bar{T}_{МПО}^{\Pi}$ ) и немагнитные ( $\psi, \vartheta, \gamma$ ) величины.

Приведем показания ТБМ к немагнитному основанию:

$$\tilde{\bar{T}} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_x \\ \tilde{T}_y \\ \tilde{T}_z \end{bmatrix} = (S + E)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} T_x - P \\ T_y - Q \\ T_z - R \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Тогда уравнение (1) и (2) можно привести к системе векторно-матричных уравнений:

$$\begin{cases} \tilde{\bar{T}} = A \cdot \bar{T}_{МПЗ} \\ \bar{g}_m = A \cdot \bar{g}_s \end{cases}. \quad (9)$$

Причем матрица ориентации имеет вид

$$A = A_\gamma \cdot A_\vartheta \cdot A_\psi = [a_{ij}]_{3 \times 3}. \quad (10)$$

Разрешая систему уравнений (9) с учетом соотношения (10) относительно направляющих косинусов  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ), получим:

$$\begin{cases} a_{11} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{xg} \cdot (g_x \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_x) - T_{zg} \cdot (g_y \cdot \tilde{T}_z - g_z \cdot \tilde{T}_y)] \\ a_{12} = -g_x / g \\ a_{13} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{zg} \cdot (g_y \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_x) - T_{zg} \cdot (g_y \cdot \tilde{T}_z - g_x \cdot \tilde{T}_y)] \\ a_{21} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{xg} \cdot (g_y \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_y) - T_{zg} \cdot (g_z \cdot \tilde{T}_x - g_x \cdot \tilde{T}_z)] \\ a_{22} = -g_y / g \\ a_{23} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{zg} \cdot (g_y \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_y) + T_{xg} \cdot (g_z \cdot \tilde{T}_y - g_y \cdot \tilde{T}_x)] \\ a_{31} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{xg} \cdot (g_z \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_z) - T_{zg} \cdot (g_x \cdot \tilde{T}_y - g_y \cdot \tilde{T}_x)] \\ a_{32} = -g_z / g \\ a_{33} = (g \cdot T_x^2)^{-1} [T_{zg} \cdot (g_z \cdot T_{yg} + g\tilde{T}_z) + T_{xg} \cdot (g_x \cdot \tilde{T}_y - g_y \cdot \tilde{T}_x)] \end{cases}. \quad (11)$$

Направляющие косинусы  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ), вычисленные по формулам (11), должны удовлетворять условиям коллинеарности осей:

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij}^2 = 1, i, j = 1, 2, 3, \quad (12)$$

условиям ортогональности осей:

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij}^2 \cdot a_{kj} = 1, i, j, k = 1, 2, 3, \quad (13)$$

условиям их связанности, а так же условиям не вырожденности и нормированности матрицы ориентации:

$$\begin{aligned} \det A &= 1; \\ \det A &\neq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Алгоритмы ориентации (алгоритмы работы МКВ) позволяют вычислить функции углов ориентации основания через направляющие косинусы  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ):

- по каналу курса:

$$\begin{cases} \sin \psi = a_{13} / \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} \\ \sin \psi = a_{13} / \sqrt{a_{11}^2 + a_{13}^2} \\ \cos \psi = a_{11} / \sqrt{a_{11}^2 + a_{13}^2} \\ \cos \psi = a_{11} / \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} \end{cases} \quad (\text{канал курса}) \quad (15)$$

- по каналу крена:

$$\begin{cases} \sin \gamma = -a_{32} / \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} \\ \sin \gamma = -a_{32} / \sqrt{a_{11}^2 + a_{13}^2} \\ \cos \gamma = a_{22} / \sqrt{a_{11}^2 + a_{13}^2} \\ \cos \gamma = a_{22} / \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} \end{cases} \quad (\text{канал крена}) \quad (16)$$

- по каналу тангажа (дифферента):

$$\begin{cases} \sin \vartheta = a_{12} \\ \cos \vartheta = \sqrt{a_{11}^2 + a_{13}^2} \\ \cos \psi = \sqrt{a_{22}^2 + a_{32}^2} \end{cases} \quad (\text{канал тангажа (дифферента)}) \quad (17)$$

Проведенный численный анализ выражений (11)-(17) показал, что алгоритмы функционирования МКВ-МИ, описываемые соотношениями (8), (11)–(17) являются нелинейными, многомерными, а иногда плохо обусловленными (в определенных режимах качки основания дают неустойчивые расходящиеся решения).

Для проверки правильности вычислений по алгоритмам ориентации (11) - (17) в конце сеанса обработки необходимо проводить контроль по алгоритму нормировки тригонометрических функций углов курса, крена и тангажа:

$$\begin{cases} \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \equiv 1 \\ \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma \equiv 1 \\ \sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta \equiv 1 \end{cases} \quad (18)$$

Для немагнитного или слабомагнитного основания можно получить упрощенные алгоритмы работы МКВ, если положить условие  $S=0$ ,  $\bar{T}_{МПО}^{\Pi} = 0$ , исключить преобразование (2.8) и подставить формулы (11) в соотношения (15) – (17).

Анализ показывает, что в условиях квазигоризонтального положения основания ( $\nu \cong \gamma \cong 0$ ) алгоритмы функционирования МКВ-МИ в виде соотношений (8), (11) – (18) проявляют избирательную чувствительность при различных углах курсов  $\psi \in [0, 360^0]$  к первичным погрешностям датчиков -  $\Delta T$  (ТБМ) и  $\Delta g$  (ТБА).



Для численной оценки чувствительности разработанных алгоритмов к первичным погрешностям датчиков на основе теории функций чувствительностей была произведена линеаризация алгоритмов (11) – (17) путем разложения функций (15) – (17) в степенные ряды Тейлора с ограничением только линейными членами. Таким путем получены формулы для вычисления функций чувствительностей (в настоящей работе не приводятся из-за их громоздкости) и формулы для оценки предельных погрешностей вычисления функций углов ориентации:

$$\begin{cases} (\Delta \sin \psi)_{пред} = F_{g\psi}^{max} \cdot \Delta g + F_{T\psi}^{max} \cdot \Delta T \\ (\Delta \cos \psi)_{пред} = N_{g\psi}^{max} \cdot \Delta g + N_{T\psi}^{max} \cdot \Delta T \\ (\Delta \sin \gamma)_{пред} = M_{g\gamma}^{max} \cdot \Delta g + M_{T\gamma}^{max} \cdot \Delta T \\ (\Delta \cos \gamma)_{пред} = K_{g\gamma}^{max} \cdot \Delta g + K_{T\gamma}^{max} \cdot \Delta T \\ (\Delta \sin \vartheta)_{пред} = P_{g\vartheta}^{max} \cdot \Delta g + P_{T\vartheta}^{max} \cdot \Delta T \\ (\Delta \cos \vartheta)_{пред} = Q_{g\vartheta}^{max} \cdot \Delta g + Q_{T\vartheta}^{max} \cdot \Delta T \end{cases} \quad (19)$$

Предложенные алгоритмы для систем ориентации имеют следующие преимущества:

- более совершенные, по сравнению с концепцией плоских двумерных измерений, в которых углы крена и тангажа принимаются равными нулю,
- позволяют определить истинный (географический) курс, с учетом магнитных и геометрических искажений,
- позволяют учитывать магнитные свойства самого датчика с электроникой и магнитные свойства основания, на котором он установлен (что позволяет избежать методических магнитных погрешностей), а также геометрические свойства, связанные с появлением углов неортогональности при монтаже датчиков системы.

#### Литература

1. Игнатъев А.А., Проскуряков Г.М. Гетеромагнитометрия: Алгоритмы, методики, калибровки блоков магнитометров - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014.
2. Семеновский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия - СПб.: Наука, 2002.
3. Игнатъев А.А., Проскуряков Г.М., Каюшкина Е.А. Проблемы и перспективы развития прецизионной магнитометрии // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. Вып. 15: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 93-104.
4. Проскуряков Г.М. Алгоритмический способ повышения точности, надежности и быстродействия приборных комплексов // Приборы и приборные системы: тез. докл. всерос. НТК, 26-29 сент. 1994 г. / Тульский гос. техн. ун-т. Тула, 1994. С. 97-98.
5. Пат. 134633 Российская Федерация, МПК G01C 23/00. Устройство для персональной навигации и ориентации / заявитель Проскуряков Г.М.; патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ им. Гагарина Ю.А.». - №2013121686; заявл. 08.05.2013; опубл. 20.11.2013.
6. Ignatiev A.A., Lyashenko A.V. Heteromagnetic Microelectronics. Microsystem of Active Type - Springer, New York / Heidelberg, 2010.

## МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Маслов А. А., Косоручкина Е., Игнатъев А.А., Медведев Б.А.  
Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского*

Представлены результаты применения гетеромагнитного первичного преобразователя (ГМПП) для магнитометрического контроля и определения концентрации магнитных наночастиц. Предельная чувствительность детектирования составила 0,5 мг порошка FeCo.

Нанохимия магнитных материалов – одно из наиболее активно развиваемых направлений современной науки, в последние годы привлекает все большее внимание исследователей из различных областей химии, физики, биологии и медицины. Магнитные материалы и феномен магнетизма знакомы человечеству на протяжении долгого времени. За прошедшие чуть более четверти века был сделан колоссальный рывок в понимании феномена «нано». В настоящее время

изготавливаются наночастицы с контролируемым размером, формой и структурой для широкого спектра составов наночастиц.

Повышенный интерес исследователей к нанообъектам вызван обнаружением у них необычных физических и химических свойств, что связано с проявлением так называемых «квантовых размерных эффектов». Эти эффекты вызваны тем, что с уменьшением размера и переходом от макроскопического тела к масштабам нескольких сот или нескольких тысяч атомов, плотность состояний в валентной зоне и в зоне проводимости резко изменяется, что отражается на свойствах обусловленных поведением электронов, в первую очередь магнитных и электрических. Имевшаяся в макро-масштабе «непрерывная» плотность состояний «заменяется» на дискретные уровни, с расстояниями между ними зависящими от размеров частиц. В таких масштабах материал перестает демонстрировать физические свойства присущие макросостоянию вещества или проявляет их в измененном виде.

Другим главным фактором оказывающим влияние на физические и химические свойства малых частиц по мере уменьшения их размеров является возрастание в них относительной доли «поверхностных» атомов, находящихся в иных условиях, чем атомы объемной фазы. За счет этого происходит серьезное изменение свойств «поверхностных» атомов, в результате чего также изменяется характер взаимодействия между атомами, находящимися на поверхности и атомами внутри частицы, что может приводить к кардинальному изменению физических свойств. С энергетической точки зрения уменьшение размеров частицы приводит к возрастанию доли поверхностной энергии в ее химическом потенциале, что делает ее способной эффективно взаимодействовать с любыми химическими соединениями. Глубина взаимодействия с окружающей средой определяется двумя основными факторами: поверхностной энергией и природой химического вещества наночастицы. Так наночастицы кобальта обладают очень сильной способностью к окислению кислородом воздуха, и на их поверхности обычно присутствует слой антиферромагнитного оксида кобальта, который взаимодействуя с металлическим ферромагнитным «ядром» вносит существенный вклад в магнитные свойства, влияя на коэрцитивность, увеличивая/уменьшая ее в зависимости от своей толщины (подобные эффекты называются обменной анизотропией и позволяют управлять коэрцитивностью наночастиц и наноматериалов на их основе).

Показано, что намагниченность (в расчете на один атом) и магнитная анизотропия наночастиц могут быть заметно больше, чем у массивного образца, а отличия в температурах Кюри ( $T_c$ ) или Нееля ( $T_N$ ), т.е. в температурах самопроизвольного установления параллельной или антипараллельной ориентации спинов, наночастиц и соответствующих макроскопических фаз достигают сотен градусов.

По мнению отечественных и зарубежных экспертов, в настоящее время применение наноматериалов в медицине и фармакологии является одним из самых приоритетных направлений, позволяющим решать самые актуальные проблемы в данных областях. Такие технологии трансформируют устоявшиеся научные дисциплины и позволяют создавать новые направления исследований. Объединение научных достижений нанотехнологии и биотехнологии привело к созданию новой дисциплины — нанобиотехнологии, развитие которой обещает привести к созданию наноконструкций, способных управлять биосистемами на молекулярном уровне. По результатам разработки, Дорожной карты развития нанотехнологий, составленной корпорацией RAND (ResearchAndDevelopment, США) и Дорожной карты Европейской комиссии (NanoroadmapMedicalandHealth, 2006 г.) специалисты выделяют следующий спектр приоритетных применений использования нанобиотехнологий в биомедицине:

1. Адресная доставка лекарственных соединений;
2. Молекулярная визуализация;
3. Биочипы («лаборатории на чипе»);
4. Молекулярные биосенсоры

Из наиболее известных, магнитных наночастиц нас привлекают, прежде всего, те, которые обнаруживаются в живых организмах, играют существенную роль в метаболических процессах и могут быть использованы в качестве терапевтических препаратов (например, для лечения

железодефицитной анемии), а также в качестве носителей противоопухолевых лекарственных средств. В этом контексте представляют интерес наночастицы железа  $\alpha$ -Fe с объемно-центрированной кубической решеткой и размером 10–20 нм, две кристаллические модификации оксида железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: ромбоэдрической –  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит) и кубической –  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (маггемит), а также Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит).

Внимание исследователей обращено и на ферритин (водорастворимый белок из неорганического ядра диаметром 7 нм и белковой оболочки толщиной ~ 6 нм) – наиболее распространенную форму негемового железа в живых организмах и растениях, чья основная роль заключается в сохранении биологического запаса железа.

В ходе подготовки лабораторной установки была проведена серия экспериментов, позволивших чётко выработать методику испытаний.

В качестве исследуемого материала использовался нанопорошок Fe–Co, полученный диспергированием макроскопического образца сплава FeCo. Основные свойства этого порошка представлены в табл. 1 (по результатам сканирующей электронной микроскопии (SEM), проведённой на микроскопе TescanMira 3XMUSEM компании Tescan (Чехия) в лаборатории диагностики наноматериалов и структур Саратовского Государственного Университета).

Таблица 1. Химический состав образца нанопорошка

Элемент	O	S	Fe	Co	Eu
Содержание, атм. %	25,99	0,53	53,52	19,77	0,19

Средний размер частицы R = 62 нм. В большом количестве встречаются частицы размером R = (40–56) нм, R = (60–92) нм. В малом количестве присутствует фракция крупных наночастиц размером R = (90–120) нм. Ниже представлены микрофотографии, подтверждающие числовые данные (рис. 1–2).

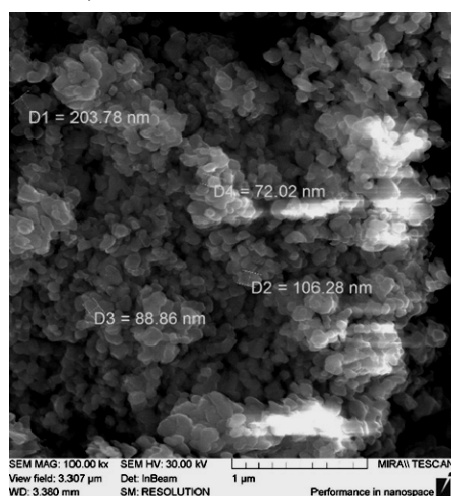


Рис. 1. Увеличение 100000x

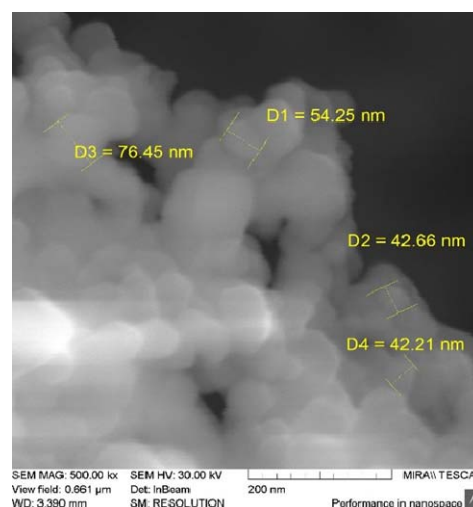


Рис.2. Увеличение 500000x

Также SEM подтвердила значительное слипание наночастиц в конгломераты с линейными размерами D = (0,5–500) мкм, сохранившие сферическую форму, присущую наночастицам данного образца Fe–Co. По результатам химического анализ была выявлена начальная стадия окисления образцов.

Данный порошок был разделен по 8 пробиркам, с разным количеством (табл. 2).

Таблица 2. Масса порошка наночастиц FeCo

Номер пробирки	1	2	3	4	5	6	7	8
Масса, г	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03	0,01	0,005

Для исследования магнитных характеристик был использован гетеромагнитный первичный преобразователь (рис. 3), представляющий из себя автогенератор со сферическим резонатором из железо-иттриевого граната, помещённого в постоянное магнитное поле (ЖИГ-генератор). Постоянное магнитное поле создаётся системой подмагничивания на основе постоянного магнита. Величина индукции постоянного магнитного поля определяет частоту генерации ЖИГ-генератора. При наложении дополнительного внешнего магнитного поля частота генерации будет изменяться на величину, пропорциональную дополнительному магнитному полю.

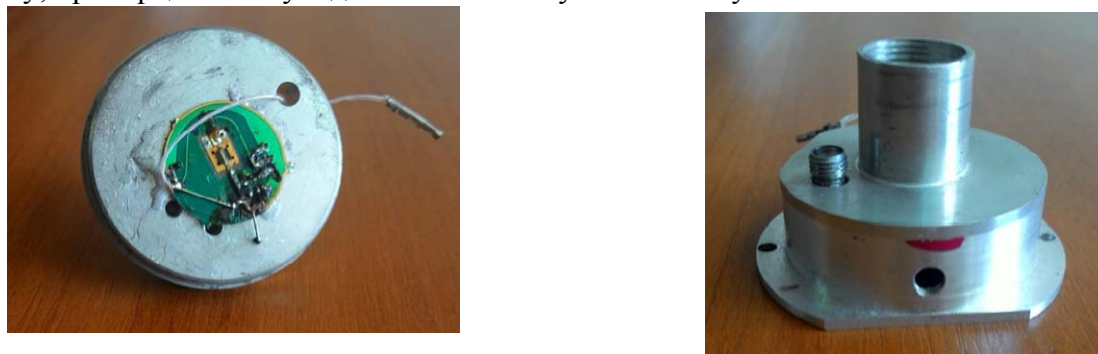


Рис. 3. Гетеромагнитный первичный преобразователь

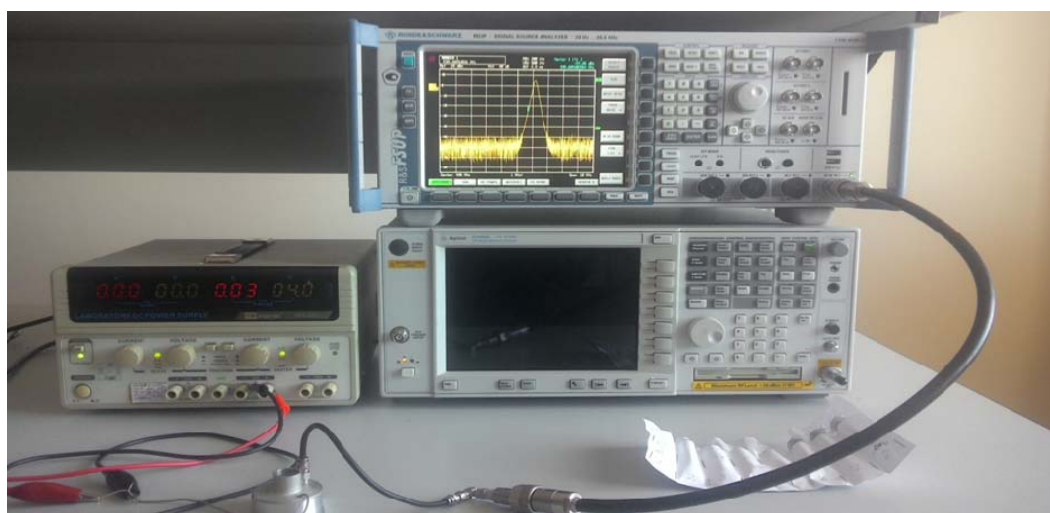


Рис. 4. Лабораторная установка магнитометрического контроля концентрации наночастиц, состоящая из ГМПП, блока питания и анализатора спектра

В ходе эксперимента были получены результаты, показанные в таблице 3 и на рис. 4 и рис. 5. Уход частоты определяется как разница между собственной частотой генерации ГМПП и частотой генерации с искажением магнитного поля, вносимым частицами нанопорошка в поле подмагничивания датчика.

Таблица 3. Уход частоты генерации ГМПП

Номер пробирки	1	2	3	4	5	6	7	8
Уход частоты, кГц	3558	3173	2596	1458	962	750	385	289

Исходя из того, что предельная чувствительность ГМПП порядка 1-5 нТл, можно утверждать, что собранная лабораторная установка позволяет уверенно детектировать массы нанопорошка не менее 0,5-0,1 мг. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования по повышению

чувствительности ГМПП. При положительных результатах можно будет говорить о применении использования данной лабораторной установки в биомедицинских приложениях.

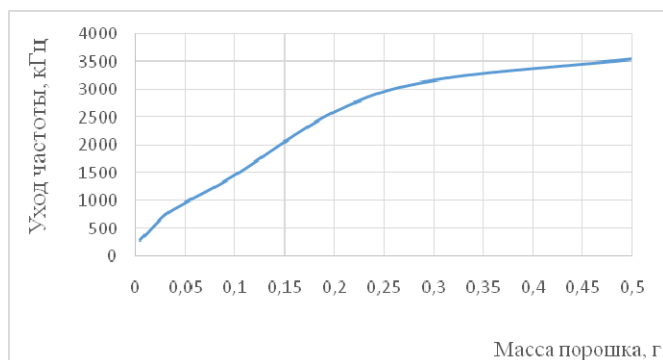


Рис. 4 Зависимость ухода частоты генерации от массы порошка наночастиц

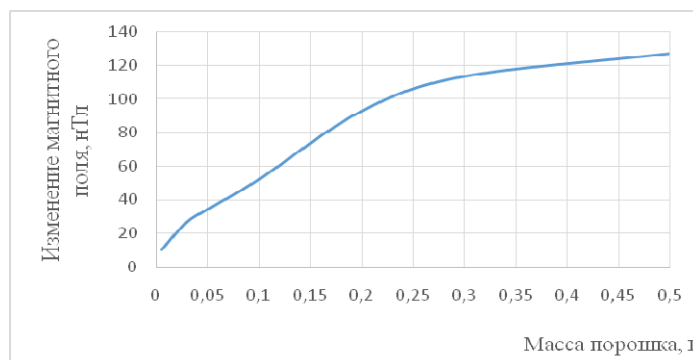


Рис.5. Зависимость измеряемой индукции магнитного поля порошка от массы наночастиц

#### Литература

1. Губин С.П. // Росс. Хим. Журнал 2000, Т. XLIV, №6, с. 23-31.
2. Губин С.П., Юрков Г.Ю., Катаева Н.А. // Неорганические материалы 2005, Т. 41, № 10, с.1159-1175.
3. Игнатъев А. А., Медведев Б. А. Применение магнитоуправляемых наночастиц в онкологии (Информационно аналитический обзор) // Гетеромагнитная микроэлектроника. Вып. 6. Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Системы информационной безопасности. Прикладные аспекты микро- и наноэлектроники: сб. науч. тр. Саратов, 2008. С.150–176.
4. Медведев Б. А., Игнатъев А. А., Маслякова Г. Н., Бочкарева Т. В. Фотодинамическая терапия и магнитная гипертермия в онкологии // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. Вып. 12 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2012. С.60–70.
5. Игнатъев А. А., Ляшенко А. В. Гетеромагнитная микроэлектроника. Микросистемы активного типа - М.: «Наука», 2007.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

*Гунствин А. В., Саяпин К. А., Страхова Л. Л., Игнатъев А. А.  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В статье рассматривается методика исследования зависимости магнитной проницаемости ферритов от частоты в широком диапазоне частот с использованием прецизионного измерителя LCR типа НМ 8118. Проверена эффективность этой методики при определении магнитной проницаемости ферритов, тангенса угла магнитных потерь, критических частот ферритов. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при постановке лабораторной работы в специальном физическом практикуме для обучения бакалавров и магистров.

Отличительной особенностью ферримагнетиков (ферритов) является наличие в них в отсутствие внешнего магнитного поля самопроизвольной атомной магнитной структуры. Обменное взаимодействие в таких веществах приводит к антипараллельной взаимной ориентации магнитных моментов, принадлежащих к разным подрешеткам. Вследствие различия абсолютных величин намагниченностей подрешеток, которое может быть вызвано разным количеством ионов в подрешетках или различием магнитных моментов этих ионов, возникает большой разностный магнитный момент и наблюдается самопроизвольная намагниченность при отсутствии внешнего магнитного поля. По своим магнитным свойствам ферриты близки к ферромагнетикам. Ферриты по своим электрическим свойствам являются полупроводниками или диэлектриками. [1–3].

Наличие сильных магнитных свойств в совокупности с большим удельным электрическим сопротивлением (до  $10^{12}$  Ом м) делает их применение в технике высоких и сверхвысоких частот очень желательным. Широко используется, например, такой ферримагнетик, как железо-иттриевый гранат ( $Y_3Fe_5O_{12}$ ), обладающий узкой резонансной кривой и малой анизотропией [4–5].

В настоящей работе рассмотрена методика исследования магнитной проницаемости  $\mu$  ферритовых образцов в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц. Для определения магнитной проницаемости  $\mu$  на тороидальный сердечник (кольцо) из испытуемого ферромагнитного материала наматывается определенное количество витков  $N$  и с помощью измерителя  $LCR$  типа НМ 8118 измеряются индуктивность  $L$  и добротность  $Q$  полученной катушки (рис. 1). Магнитная проницаемость  $\mu$  и тангенс угла магнитных потерь  $\operatorname{tg} \delta_m$  ферритовых образцов рассчитываются по измеренным значениям индуктивности и добротности.

На рис. 1 представлена катушка с ферритовым сердечником. Силовые линии магнитного поля, если магнитная проницаемость вещества велика ( $\mu \gg 1$ ), замыкаются внутри кольца и, в силу симметрии системы, будут иметь вид концентрических окружностей.

Для расчета [6] напряженности магнитного поля  $H(\mathbf{r})$  внутри кольца применим теорему о циркуляции напряженности магнитного поля по замкнутому контуру, которая имеет вид

$$\oint_{\ell} H_{\ell} dl = \sum I_i, \quad (1)$$

где  $\sum I_i$  – алгебраическая сумма токов, пронизывающих замкнутый контур  $\ell$ .

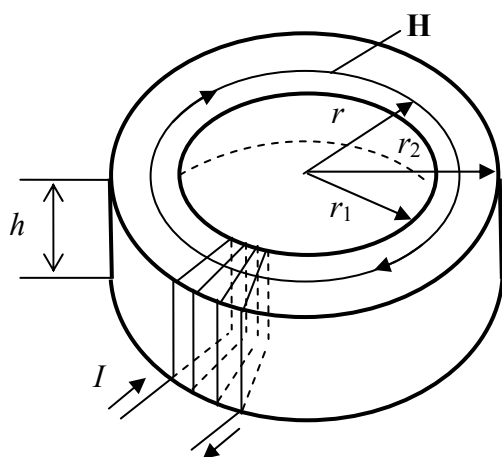


Рис. 1. Катушка с ферритовым сердечником

В качестве контура интегрирования выберем окружность радиуса  $r$ , совпадающую с одной из силовых линий поля. Вектор напряженности магнитного поля  $H(\mathbf{r})$  в этом случае будет направлен по касательной к окружности, так что  $H_{\ell}(r) = H(r)$ , и величина  $H(r)$  во всех точках контура будет одинакова. Тогда из соотношения (1) получим  $H(r) \cdot 2\pi r = N \cdot I$  и

$$H(r) = \frac{N \cdot I}{2\pi r}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока в обмотке.

Индукцию магнитного поля  $B(r)$  найдем из соотношения

$$B(r) = \mu \cdot \mu_0 \cdot H(r) = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{2\pi r}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Если кольцо достаточно тонкое, так что его внешний и внутренний радиусы  $r_2$  и  $r_1$  близки по величине (см. рис. 1), и величина индукции магнитного поля  $B(r)$  по сечению кольца изменяется незначительно, то можно записать

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{NI}{2\pi r_{cp}}, \quad (4)$$

где  $r_{cp} = \frac{r_1 + r_2}{2}$  – средний радиус ферритового кольца. Тогда поток магнитной индукции  $\Phi_m$  через сечение кольца  $S$

$$\Phi_m = \int_{r_1}^{r_2} \mu\mu_0 \frac{NI}{2\pi r_{cp}} h dr = \mu\mu_0 \cdot \frac{NI}{2\pi r_{cp}} h(r_2 - r_1) = \mu\mu_0 \frac{NI}{2\pi r_{cp}} S, \quad (5)$$

где  $S = h(r_2 - r_1)$  – площадь поперечного сечения кольца.

Полный магнитный поток или потокосцепление  $\Psi$ , равный произведению магнитного потока  $\Phi_m$  на количество витков  $N$ , пропорционален току в обмотке  $I$  ферритового кольца

$$\Psi = L \cdot I, \quad (6)$$

где  $L$  – индуктивность катушки.

Из формул (5) и (6) определяем индуктивность  $L$  ферритового кольца с обмоткой

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi_m}{I} = \frac{\mu\mu_0 N^2}{2\pi r_{cp}} S \quad (7)$$

Соотношение (7) позволяет рассчитать магнитную проницаемость  $\mu$

$$\mu = \frac{L 2\pi r_{cp}}{\mu_0 N^2 S} \quad (\text{в системе СИ}), \quad (8)$$

где  $L$  – индуктивность ферритового кольца с обмоткой, полученная из измерений.

Измерения индуктивности  $L$  и добротности  $Q$  ферритовых колец с обмоткой проводились мостовым методом в диапазоне частот от 0,5 кГц до 200 кГц с помощью программируемого измерителя  $LCR$  типа  $HM 8118$  [ 7 ] компании *Rohde & Schwarz*, который позволяет измерять значения индуктивности  $L$  от 10 нГн до 100 кГн с погрешностью 0,05% .

Геометрические параметры ферритовых колец, являющихся сердечниками катушек, такие, как внутренний диаметр  $d_1$ , внешний диаметр  $d_2$ , толщина кольца  $h$ , средний радиус  $r_{cp}$ , площадь поперечного сечения кольца  $S$  и число витков обмотки катушек  $N$ , представлены в табл. 1.

Измерения индуктивности  $L$  и добротности  $Q$  проводились в соответствии с руководством по эксплуатации измерителя  $LCR$  типа  $HM 8118$ . При проведении измерений была автоматически выбрана последовательная внутренняя схема замещения, в которой катушка индуктивности с тороидальным сердечником представлена в виде последовательно соединенных индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R_m$ , потери энергии в котором эквивалентны всем видам потерь в феррите. В этом случае тангенс угла магнитных потерь

$$\text{tg } \delta_m = R_m / \omega L = 1 / Q, \quad (9)$$

где  $Q$  – добротность катушки с исследуемым ферритом.

Таблица 1. Геометрические параметры ферритовых колец (I, II, III) и число витков  $N$  витков обмотки катушек.

Номер кольца	I	II	III
$d_1$ , мм	28	25	9,5
$d_2$ , мм	44,5	39	15,5
$h$ , мм	8	11	4
$r_{cp}$ , мм	18,125	16	6,25
$S$ , мм <sup>2</sup>	66	77	12
$N$	26	9	7

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферритовых образцов рассчитывалась по формуле (8). Результаты расчета представлены на графиках рис. 2 ( $\mu_I$ ,  $\mu_{II}$ ,  $\mu_{III}$  – магнитные проницаемости соответствующих ферритовых колец).

Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости одной из важнейших характеристик является тангенс угла магнитных потерь  $\text{tg } \delta_m$ . Составляющая потерь на вихревые токи в ферритах достаточно мала благодаря их большому удельному сопротивлению. В слабых магнитных полях незначительными являются и потери на

гистерезис. Значение  $\operatorname{tg} \delta_m$  в ферритах на высоких частотах в основном определяется магнитными потерями, вызванными релаксационными и резонансными потерями.

Для оценки частотного диапазона, в котором может использоваться ферритовый материал, вводят понятие критической частоты  $f_{кр}$ . Обычно под  $f_{кр}$  понимают такую частоту, при которой  $\operatorname{tg} \delta_m$  достигает значения 0,1. При частоте  $f_{кр}$  наблюдается довольно значительное уменьшение магнитной проницаемости  $\mu$ .

Частоту, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от её значения в постоянном магнитном поле, называют граничной частотой  $f_{гр}$ . Обычно  $f_{кр} < f_{гр}$ .

Тангенсы угла магнитных потерь  $\operatorname{tg} \delta_{mI}$ ,  $\operatorname{tg} \delta_{mII}$ ,  $\operatorname{tg} \delta_{mIII}$  соответствующих ферритовых колец, рассчитанные по формуле (9), представлены в табл. 2.

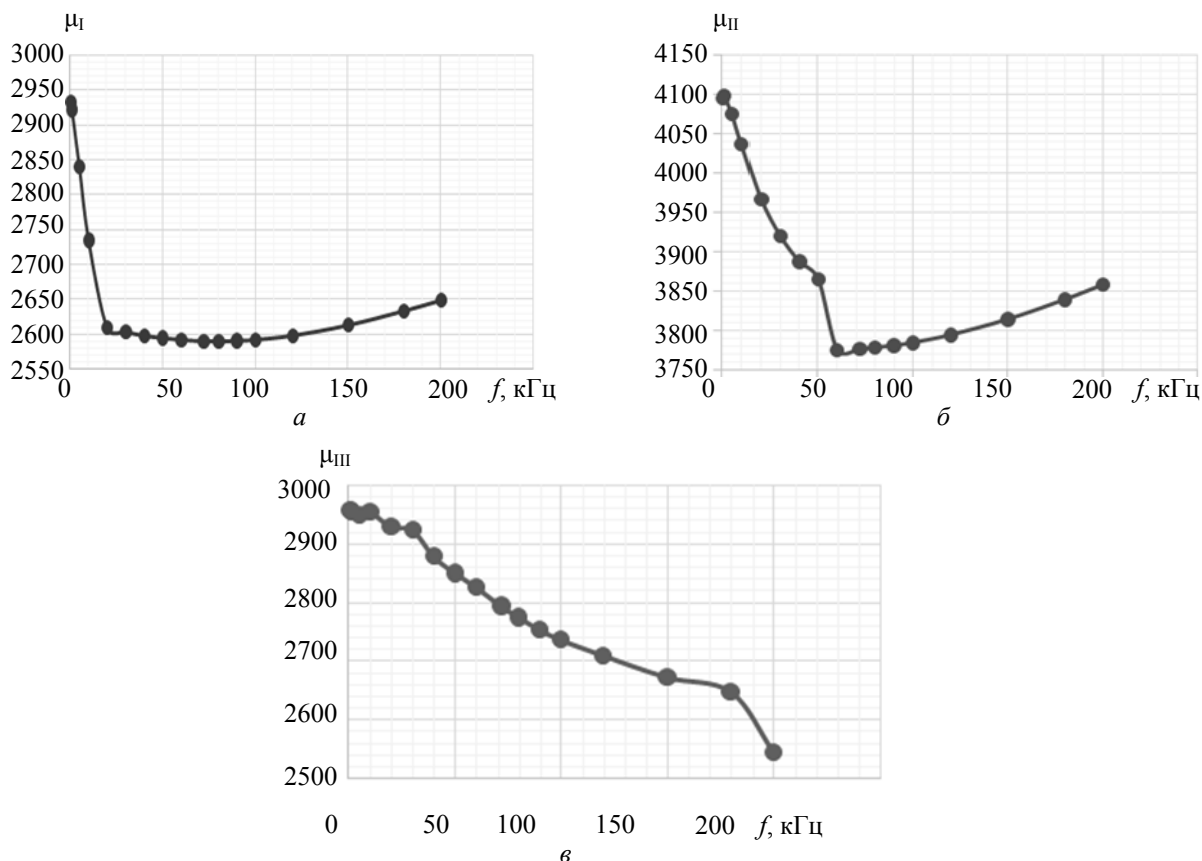


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от частоты  $f$ : а – ферритовое кольцо I; б – II; в – III.

В данной работе получены следующие результаты:

- определены начальные магнитные проницаемости ферритовых колец:  $\mu_1 = (2993 \pm 50,9)$   $\mu_2 = (4095 \pm 52,62)$ ,  $\mu_3 = (2956 \pm 110)$ .
- показано, что магнитная проницаемость ферритов в диапазоне 0,5-200кГц уменьшается с увеличением частоты: для первого кольца – на 9,7 %, для второго – на 8 % и для третьего – на 14 %.
- теоретически рассчитаны значения тангенса угла магнитных потерь испытуемых ферритовых колец в диапазоне 0,5-200 кГц и показано, что с увеличением частоты наблюдается его увеличение;
- определены критические частоты ферритов и показано, что, чем больше начальная магнитная проницаемость, тем меньше критическая частота;
- показано, что граничные частоты  $f_{гр}$  всех исследованных ферритов лежат за пределами частотного диапазона измерений;



– опытным путем определены марки исследуемых ферритовых колец: по величине начальной магнитной проницаемости и критической частоте они близки к магнитомягким марганец-цинковым ферритам, марки которых 3000НМ, 4000НМ.

Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при постановке лабораторной работы в специальном физическом практикуме для обучения бакалавров и магистров.

Таблица 2. Результаты расчета тангенса угла магнитных потерь в диапазоне от 0,5 до 200 кГц

$f, \text{кГц}$	$\text{tg } \delta_{mI}$	$\text{tg } \delta_{mII}$	$\text{tg } \delta_{mIII}$
0,5	0,0402	0,0362	0,2489
1	0,0367	0,0313	0,1510
5	0,0279	0,0292	0,0741
10	0,0279	0,0298	0,0664
20	0,0114	0,0309	0,0646
30	0,0119	0,0329	0,0649
40	0,0121	0,0351	0,0649
50	0,0124	0,0378	0,0678
60	0,0127	0,0303	0,0648
72	0,0132	0,0348	0,0639
80	0,0135	0,0379	0,0636
90	0,0141	0,0417	0,0630
100	0,0148	0,0456	0,0629
120	0,0170	0,0536	0,0632
150	0,0217	0,0665	0,0636
180	0,0297	0,0814	0,0645
200	0,0369	0,0929	0,0684

#### Литература

1. Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. Лекции по магнетизму - М.: Физматлит, 2005.
2. Вонсовский С.В. Магнетизм - М.: Наука, 1971.
3. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985.
4. Игнатьев А.А., Страхова Л.Л., Куликов М.Н., и др. ЖИГ-генераторы с микрорезонаторами на эпитаксиальных пленочных структурах ферритов (анализ патентной документации)//Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. Вып.4. С. 74-84.
5. Игнатьев А.А., Страхова Л.Л., Куликов М.Н., и др. Магнитоуправляемые высокочастотные устройства с резонаторами на ЖИГ-сферах (Анализ патентной документации)//Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. Вып.7. С. 112-135.
6. Руководство к лабораторным работам по курсу «Физика магнитных явлений» // Под ред. проф. Игнатьева А.А.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. <http://static.chipdip.ru/pdf/hameg-2013.pdf>

## НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ЖИГ-РЕЗОНАТОРА

*Васильев А. В., Игнатьев А. А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Приведена нелинейная модель сферического ЖИГ-резонатора для малых (милливаттных) уровней мощности в диапазоне частот от 0,7 до 4 ГГц.

Гетеромагнитные устройства и микросистемы автогенераторного типа имеют в своем составе различные виды и топологии ферритовых резонаторов (ФР) [1], которые представляют собой сферы из монокристаллических ферритов [1], прямоугольные резонаторы из эпитаксиальных пленок ферритов [2], массивы из магнитных углеродных нанотрубок на диэлектрическом основании [3] или сфероиды из различных наноразмерных магнитных материалов [4]. В [5, 6] показан нелинейный характер поглощения входной СВЧ-мощности резонаторами на основе объемных ферритов (сферы, призмы).

В большинстве случаев при проектировании СВЧ-устройств с ЖИГ-резонатором используется линейная эквивалентная схема [7, 8], приведенная на рис. 1.

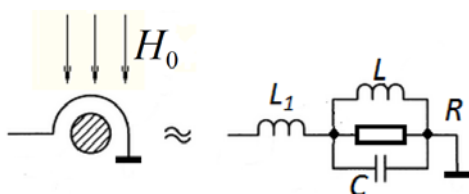


Рис. 1. Линейная эквивалентная схема ЖИГ-резонатора:  $H_0$  – поле подмагничивания ЖИГ-резонатора;  $L_1$  – индуктивность петли связи с ЖИГ-резонатором;  $C$ ,  $R$  и  $L$  – емкость, активное сопротивление и индуктивность ЖИГ-резонатора

Применение в расчетах линейных эквивалентных схем имеет ограниченный характер [1]. При проектировании, например, генераторов, уровень мощности которых близок к такому, что ЖИГ-резонатор проявляет нелинейные свойства, необходима нелинейная модель ЖИГ-резонатора.

Авторами предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора, разработанная в среде САПР *Microwave Office*. Модель построена на основе экспериментально полученных характеристик ЖИГ-резонатора в диапазоне мощностей от 0,1 мкВт (-40 дБм) до 200 мВт (+23 дБм) на частотах от 500 МГц до 4 ГГц.

Для исследований был выбран сферический ферритовый резонатор марки 30КГ диаметром 0,8 мм, с намагниченностью насыщения  $4\pi M_s = 360$  Гс и шириной  $\Delta H = 0,3$  Э линии ферромагнитного резонанса (ФМР). Резонатор размещен в центре петли связи (рис. 1), которая представляет собой один виток (диаметр 0,85 мм) медной проволоки (диаметр 0,1 мм). Виток смонтирован на плате из текстолита размером  $34 \times 19$  мм и толщиной 0,5 мм. Вся конструкция смонтирована в корпусе с СВЧ-разъемами. Для измерения характеристик резонатора устройство устанавливалось в зазор электромагнита, обеспечивающего поле подмагничивания резонатора  $H_0$  так, чтобы линии магнитной индукции лежали в плоскости витка связи (перпендикулярно монтажной плате).

Экспериментально снималась зависимость коэффициента передачи  $K$  резонатора от уровня входной мощности  $P_{вх}$  на частоте ФМР при полях подмагничивания от 180 Э до 1430 Э, что соответствует частотам ФМР от 500 МГц до 4000 МГц. Полученные результаты представлены на рис. 2.

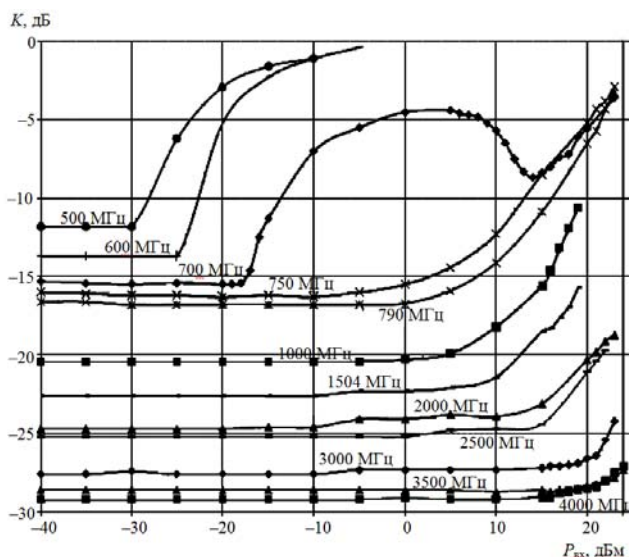


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи  $K$  от уровня мощности входного сигнала на частоте ФМР

Аномальное поведение зависимости  $K(P)$  на частотах 500 МГц, 600 МГц и 700 МГц обусловлено, по всей видимости, ненасыщенным режимом работы ферритового резонатора. Остальные зависимости  $K(P)$  носят качественно предсказуемый характер.

По полученным характеристикам (рис. 2) можно определить области работы ферритового резонатора в линейном (горизонтальные участки зависимости  $K(P)$ ) и нелинейном режимах.

Нелинейная модель ЖИГ-резонатора разрабатывалась на частоте 1 ГГц, исходя из практических потребностей [9]. В качестве модели была использована нелинейная эквивалентная схема ЖИГ-резонатора, показанная на рис. 3. Нелинейность ЖИГ-резонатора выражается в нелинейности активного сопротивления  $R$  модели ЖИГ-резонатора.

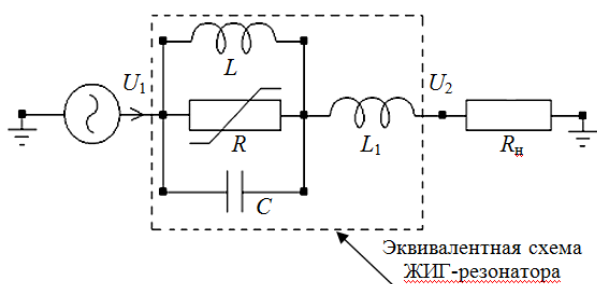


Рис. 3. Нелинейная эквивалентная схема ЖИГ-резонатора:  $U_1$  – напряжение с выхода генератора;  $U_2$  – напряжение с выхода ферритового резонатора;  $R_H$  – сопротивление нагрузки (вход анализатора спектра);  $L_1$  – индуктивность петли связи резонатора с линией передачи СВЧ мощности

Исходя из экспериментальных данных, получена полиномиальная аппроксимация для коэффициента передачи ЖИГ резонатора в зависимости от уровня входного сигнала:

$$K(U) = 0,055U^2 - 0,007U + 0,094. \quad (1)$$

Используя законы Ома, было получено выражение, описывающее вольт-амперную характеристику (ВАХ) сопротивления  $R$  (рис. 4):

$$I(U) = \frac{U}{R_H} \cdot \frac{0,094 + 0,055U^2 - 0,007U}{0,906 - 0,055U^2 + 0,007U}. \quad (2)$$

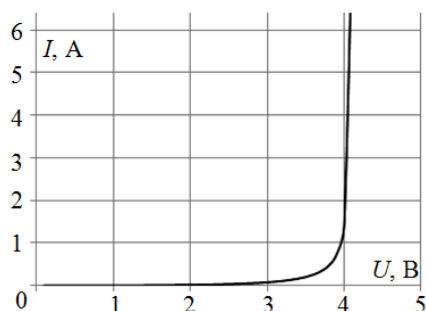


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления  $R$  в нелинейной модели ЖИГ-резонатора

В среде *Microwave Office* можно задать нелинейное сопротивление двумя способами: заданием ВАХ сопротивления кусочно-линейной аппроксимацией или заменой его двумя встречно-параллельными диодами. Можно подобрать ВАХ диодов так, чтобы они совпадали (с точностью погрешности измерений) с ВАХ сопротивления  $RLC$ -контура.

Величина индуктивности  $L_1$  петли связи, подбирается так, чтобы изменение резонансной частоты при изменении уровня входной мощности в модели совпало с экспериментально полученными данными.

Проведенный расчет в среде *Microwave Office* показывает, что предложенная модель для частоты 1 ГГц достаточно корректно работает в полосе  $\pm 10\%$  с точностью методической погрешности измерений параметров ЖИГ-резонатора.

Таким образом, авторами предложена нелинейная модель ЖИГ-резонатора и разработана методика ее расчета. Однако в модели не учтена зависимость коэффициента передачи на частоте ФМР от самой частоты ФМР (от внешнего подмагничивающего поля). Также не учтено и то, что с ростом частоты увеличивается диапазон линейного режима работы ЖИГ-резонатора (растет пороговая мощность [2, 5, 10]), как это видно из рис. 2. Для учета этих эффектов необходимо вводить зависимость величины  $R$  не только от напряжения, но и от частоты (с ростом частоты, сопротивление должно увеличиваться).

## Литература

1. Игнатъев А. А., Ляшенко А. В. Гетеромагнитная микроэлектроника. Микросистемы активного типа - М.: Наука, 2007.
2. Игнатъев А. А., Ляшенко А. В. Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов - М.: Наука, 2005.
3. Игнатъев А. А., Куликов М. Н., Васильев А. В. И др. Экспериментальные исследования возбуждения СВЧ-колебаний в магнитных углеродных нанотрубках на микрополосковых устройствах // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во СГУ. 2008. Вып. 3: Гетеромагнитная микро- и нанозлектроника. Прикладные аспекты. С. 81–85.
4. Глебов В. А., Глебов А. В., Сафронов Б. В. и др. // Цветные металлы 2011, № 1, с. 83–86.
5. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики - М.: Мир, 1965.
6. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках - М.: Наука, 1973.
7. Ильченко М. Е., Кудинов Е. В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ - Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1973.
8. Ollivier P. M. // IEEE J. of solid-state circuits 1972, Vol. sc-7, № 1, p. 54–60.
9. Самолданов В.Н., Луконин И.С. Разработка автогенератора с ЖИГ-резонатором для датчика слабых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во СГУ. 2008. Вып. 5: Прикладные аспекты микро- и нанозлектроники. С. 35–51.
10. Моносов Я. А. Нелинейный ферромагнитный резонанс - М.: Наука, 1971.

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

*Ретунский А.С. Спиридонов Д.М. Игнатъев А.А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Разработан алгоритм для учета температурной зависимости выходных сигналов электронного модуля, предназначенного для измерения магнитных полей. Алгоритм протестирован в эксперименте с использованием зависимостей выходных сигналов электронного модуля от температуры.

Геомагнитный электронный модуль (ГМЭМ) представляет собой законченное функциональное устройство для измерения слабых магнитных полей, в частности, для измерения всех компонентов магнитного поля Земли. ГМЭМ включает в себя 3D гетеромагнитный первичный преобразователь (ГМПП) измеряемого магнитного поля и систему обработки данных, включая коррекцию показаний ГМПП по температурному фактору.

ГМПП представляет собой твёрдотельный автогенератор на основе полевых или биполярных транзисторов, в цепи обратной связи которого содержится ферритный (ЖИГ) микрорезонатор. Ферритовый микрорезонатор находится в поле системы подмагничивания на основе постоянного магнита.

ЖИГ-микрорезонатор и магнит системы подмагничивания имеют температурозависимые параметры. Так ферритовый микрорезонатор обладает температурным коэффициентом частоты порядка  $3 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$  в интервале температур от  $-50$  до  $+50 \text{ C}$ .

Таким образом, существует температурная зависимость частотного выхода ГМПП из ГМЭМ. Поскольку ГМЭМ предназначен для работы при различных условиях окружающей среды, в систему обработки данных необходимо ввести алгоритм, учитывающий температурную зависимость. Алгоритм базируется на показаниях датчиков температуры, введенных в латунный корпус объединенных дифференциальных ГМПП.

Структурная схема ГМПП представлена на рис.1. Частота, генерируемая ГМПП подается на вход счетчика, счетчик подает на вход микропроцессора значение частоты. Значение температуры ГМПП подается на вход микроконтроллера.

Частота, генерируемая ГМПП зависит только от температуры и от угла поворота ГМПП таким образом, если есть зависимость (экспериментальная или теоретическая) частоты от температуры ГМПП, то возможно нивелировать влияние фактора температуры на процесс определения угла поворота ГМПП.



Рис. 1. Структурная схема ГМП

В программе выполняемой микропроцессором, которая определяет значение угла поворота, есть две входные переменные – это текущая температура и текущая частота, которые отцифровываются контроллером в данный момент времени. При этом в памяти контроллера хранится зависимость частоты от температуры для конкретного положения (угла поворота) ГМП. Из текущей частоты при текущей температуре вычитается теоретическая (экспериментальная – хранящаяся в памяти контроллера) частота, значение которой берется в соответствии с теоретической температурой равной температуре текущей. Таким образом, если разница этих частот равна нулю, то ГМП находится в положении, в котором производилось измерение теоретической (экспериментальной, хранящейся в памяти контроллера) зависимости частоты от температуры. В том случае, если разница теоретической и текущей частот отлична от нуля значит ГМП повернут относительно положения, при котором снимались теоретические (экспериментальные) зависимости температуры от частоты. Значение угла поворота пропорционально разнице, эталонной и текущей частот. С помощью данного алгоритма возможно нивелировать влияние температурного фактора на определение угла поворота ГМП.

Погрешность данного метода складывается из нескольких факторов:

- погрешность эталонной кривой – погрешность проведения эксперимента для формирования эталонных зависимостей температуры от частоты;
- погрешность датчика температуры – погрешность измерений температуры термозависимого элемента сильно влияет на качество работы программной корректировки;
- порог срабатывания условия равенства частот – при работе алгоритма разность эталонной и текущей частоты не может быть равна строго нулю в силу того, что должна учитываться погрешность счета самого контроллера погрешность эталонной кривой и погрешность измерений как раз в коридоре допустимых разностей текущей и эталонной частот;
- разность во временах отклика на изменение температуры окружающей среды у датчика температуры и ГМП. Время, через которое изменится частота ГМП и время реакции датчика температуры после изменения температуры окружающей среды разное, и данное рассогласование может внести дополнительные неточности в работу алгоритма корректировки.

Применение данного метода позволило добиться температурной стабильности ГМП в коридоре 0.25 МГц.

#### Литература

1. Ингатъев А. А., Ляшенко А. В. Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов - М.: Наука, 2005.
2. Ингатъев А. А., Ляшенко А. В. Гетеромагнитная микроэлектроника: микросистемы активного типа - М.: Наука, 2007.
3. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике - М.: Сов. радио, 1975.
4. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов – М.: Энергия, 1971.
5. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина – М.: Энергия, 1971.
6. Евграфов А. А., Игнатъев А. А., Ретунский А. С. И др. Сравнение основных характеристик аналогового и цифрового датчиков температуры // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. – Вып. 14 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 4 – 13.
7. Овчинников С. В., Ляшенко А. В. Обобщенная модель для аналитического расчета температурных полей и тепловых сопротивлений элементов твердотельной радиоэлектроники // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под

- ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2012. – Вып. 12: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 11 – 18.
8. Новоселов В.В., Овчинников С.В. Определение решений многомерных неоднородных краевых задач с помощью метода перемножений // Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. – Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 2003. вып. 9. С. 52-53.
9. Овчинников С. В., Самолданов В. Н., Ляшенко А. В. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610993 РФ. Программа расчета стационарного теплового сопротивления многослойных конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора с прямоугольной формой; правообладатель: ОАО «Тантал». – № 2004610421; заявл. 26.02.2004; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.2004.
10. Овчинников С.В., Игнатъев А.А., Ляшенко А.В. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610986 РФ. Программа расчета стационарного теплового сопротивления конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора в виде многослойного цилиндра; правообладатель: ОАО «Тантал». – № 2004610414; заявл. 26.02.2004; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.04.
11. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах – Л.: Энергия, 1968.

## ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IGRF МОДЕЛИ

*Решетников Н.В., Проскуряков Г.М., Игнатъев А.А.  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В статье рассматривается расчет магнитного поля Земли с помощью IGRF модели. Смоделировано поведение модели при движении по фиксированным широтам с вариацией долгот, найдены точки вырождения, построены кривые движения по меридианам.

Задача создания автономной навигации, которая бы не зависела от спутников и в то же время давала достаточный уровень точности, является одной из самых актуальных на сегодняшний день. В то время, как задача автономного позиционирования внутри помещений[1] находит целый ряд решений (WiFi, BLE, PDR), то позиционирование на местности является нерешенной задачей. Предлагается за источник информации о геопозиционировании объекта взять магнитное поле Земли (МПЗ) в точке пространства. Общий процесс позиционирования может быть разбит на следующие шаги:

1. Измерение трех компонент МПЗ
2. Компенсация магнитных помех окружающей среды (к примеру, основание измерительного блока)
3. Сопоставление показаний измерительного блока с заранее известной магнитной картой местности

Последний пункт и является ключевым моментом в решении поставленной задачи. Есть два способа получения магнитной карты. Первый – детальное измерение компонент МПЗ в каждой точке местности, предполагаемой для последующей позиционирования, и прямая привязка полученных показаний к значениям датчика GPS. Таким образом становится возможным восстановить координаты точки по показаниям МПЗ в совокупности с локальными магнитными аномалиями. Данный подход реализован в системе IndoorAtlas [2] и успешно применяется для позиционирования внутри складских помещений, торговых комплексах. Однако данный метод нельзя назвать автономным ввиду того, что он предполагает предварительную съемку местности. Таким образом приходим к второму возможному варианту – использование аналитической модели магнитного поля Земли.

Международное геомагнитное аналитическое поле[3] (IGRF, от англ. International Geomagnetic Reference Field) — международная модель или серия моделей среднего глобального магнитного поля Земли, учитывающая его вековую вариацию.

Таким образом, обладая моделью МПЗ есть возможность определить компоненты магнитного поля в каждой точке пространства, зная географические координаты. Существует теоретическая возможность решения обратной задачи позиционирования. Когда, наоборот, зная лишь исходные компоненты потенциала магнитного поля в точке, можно попытаться восстановить географические координаты.

Первый этап моделирования МПЗ - аналитический расчет рабочих уравнений модели. Для этого, в программном пакете WolframMathematica [4] были заданы исходные выражения (1) и на их базе получены выражения для расчета компонент МПЗ.

$$\begin{aligned}
 T_{xg0}^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \frac{dP_n^m(\sin \varphi)}{d\varphi} \\
 T_{yg0}^H &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\lambda) - h_n^m \sin(m\lambda)] P_n^m(\sin \varphi) \\
 T_{zg0}^H &= -\sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] \frac{P_n^m(\sin \varphi)}{\cos \varphi}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R$  – радиус Земли,  $r$  – расстояние от центра Земли,  $g, h$  – коэффициенты Гаусса,  $\lambda$  – долгота,  $P_n^m$  – нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра,  $\varphi$  – полярный угол.

Аналитическое разложение рядов позволило получить рабочие выражения для вычисления 3х компонент МПЗ.

Был проведен расчет трех компонент МПЗ при варьировании долготы на различных широтах. Были построены кривые с шагом в 10 градусов (рис.1. – пример зависимостей для фиксированной широты в 40 градусов).

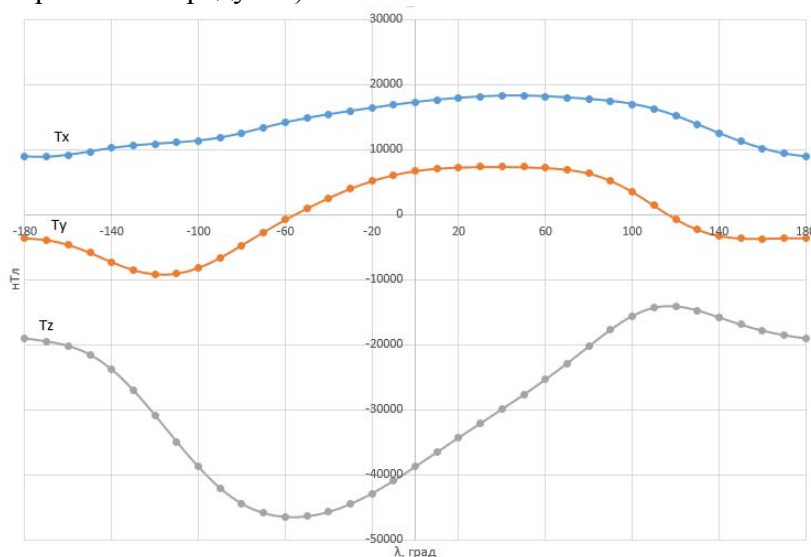


Рис.1. Зависимость компонент  $T_x, T_y, T_z$  от долготы при широте в 40 градусов

Произведенный анализ позволяет нам судить о неповторимости показаний по трем осями виден общий характер кривых. Был произведен более тщательный анализ. С шагом в 1 градус были сравнены все возможные точки в пространстве с допустимой погрешностью  $\epsilon = 0.0001$ . Можно отметить, что точек вырождения как таковых найдено не было. Лишь схожие значения найдены у соседних точек в пространстве. Основываясь на этих данных можно сделать заключение, что в пространстве нет двух точек, показания в которых совпали бы полностью. Таким образом, всегда можно различить 2 точки в пространстве.

Так же было исследовано поведение модели вблизи полюсов (рис. 2). Найден отказ работоспособности модели IGRF при 90 градусах широты.

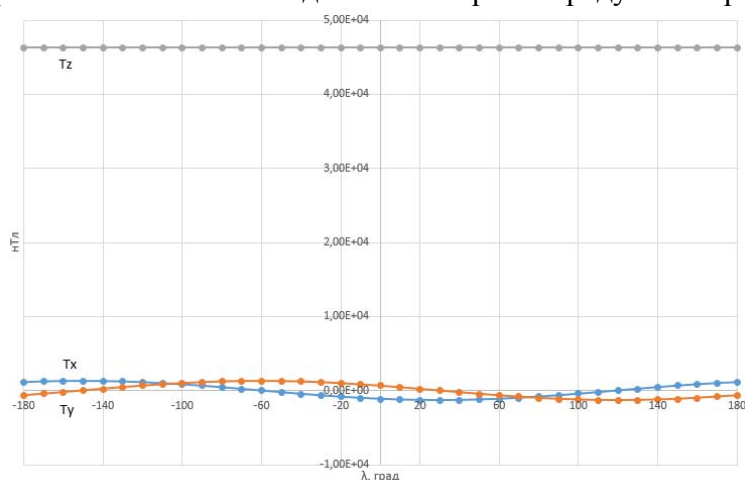


Рис.2. Зависимость компонент  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  от долготы при широте 90 градусов

Как видно из графиков, компонента  $T_z$  вырождается при приближении к 90 градусам. Что является ожидаемым результатом.

Таким образом, была показана теоретическая возможность построения системы автономного позиционирования посредством IGRF модели. Работоспособность системы гарантирована в областях до  $\pm 80$  градусов.

#### Литература

1. Chung Jaewoo, Donahoe Matt, Schmandt Chris, et al. Indoor Location Sensing Using Geo-Magnetism //MobiSys '11 Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services p.141-154
2. <http://venturebeat.com/2015/08/24/indooratlas-delivers-navigation-inside-shopping-malls/>
3. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathematica>

## ОЦЕНКА ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОМЕТРА НА МАГНИТОРЕЗИСТОРАХ

*Игнатъев А.А., Спиридонов Д.М.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В данной работе на примере 3-х осевого магнитометра на отечественных магниторезистивных чувствительных элементах, рассмотрен такой важнейший параметр любой измерительной электронной схемы, как шум выходного сигнала, то есть наложение сигналов различных частот и амплитуд на полезный сигнал, приводящее к его «размытию».

Магниторезистивные чувствительные элементы, построенные на принципе анизотропного магниторезистивного эффекта представляют собой законченное интегральное решение в виде расположенного на одном кристалле моста Уитстона из четырех определенным образом сориентированных магниторезисторов и одной или двух катушек индуктивности, выполняющих различные сервисные функции. При изменении внешнего магнитного поля, действующего на магниторезисторы, меняется их сопротивление и, соответственно меняется разность потенциалов между выходными выводами моста Уитстона [1]. Магнитометры построенные на базе магниторезисторов как правило включают в себя дифференциальный усилитель, для усиления слабого сигнала с выхода моста Уитстона, аналоговый фильтр, для подавления шумов за пределами рабочей полосы частот, аналогово-цифровой преобразователь, управляющий микроконтроллер для обработки сигналов в режиме реального времени (например температурная, геометрическая, магнитная, метрологическая калибровки, цифровая фильтрация и т.д.), формирователь импульсов перемагничивания, подключаемый к одной из катушек индуктивности магниторезистивного датчика, необходимый для периодического восстановления доменной структуры магниточувствительного



материала магниторезистора. Также схема может включать в себя контур обратной связи по подмагничиванию для создания постоянного магнитного поля небольшой величины, позволяющего смещать уровень нулевого сигнала в зависимости от внешней магнитной обстановки.

Как и любой электронный компонент магниторезистивный чувствительный элемент имеет собственные шумы, в процессе обработки сигнала эти шумы могут быть усилены, кроме того на них накладываются собственные шумы усилительного каскада, шум дискретизации АЦП и т.д. Целью данной работы является на основе паспортных данных электронных компонентов, используемых в разрабатываемом в ОАО «Институт критических технологий» магнитометре «MR-2-01», оценить максимально достижимую разрешающую способность (среднеквадратическое отклонение) изделия, с учетом заранее определенных условий: диапазон измерений, полоса пропускания, напряжение питания.

При разработке изделия была использована схема, представленная на рисунке 1, где

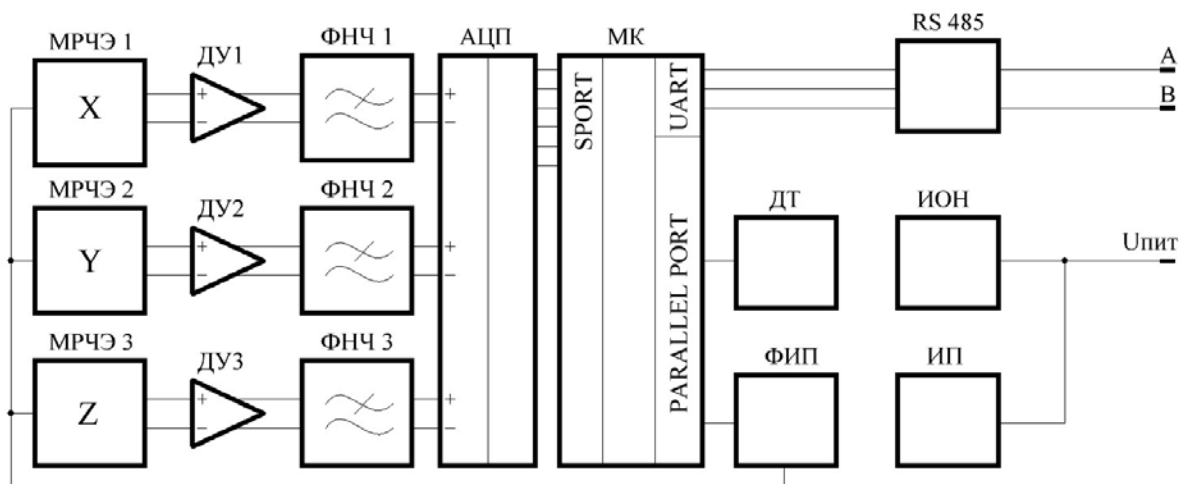


Рис.1. Блок-схема 3-х осевого магнитометра

МРЧЭ – магниторезистивный чувствительный элемент, ДУ – дифференциальный усилитель, ФНЧ – фильтр низких частот, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, ДТ – датчик температуры, ФИП – формирователь импульсов перемангнитивания, RS 485 – выходной интерфейс, ИОН – источник опорного напряжения, ИП – источник питания

При разработке устройства были применены отечественные радиационно стойкие МРЧЭ. Для усиления и фильтрации сигнала были использованы сдвоенные малошумящие операционные усилители фирмы Analog Devices ADA4528-2. Для оцифровывания сигнала применяется 16-ти битный 6-ти каналный АЦП фирмы Analog Devices AD73360, имеющий дифференциальные входы и встроенный источник опорного напряжения. Граничные условия работы магнитометра следующие: диапазон измеряемых магнитных полей  $\pm 65000$  нТл, полоса пропускания – 0,05 - 10 Гц, напряжение питания 5 В.

Ввиду идентичности схемы измерительных каналов, рассмотрели формирование шума в одном из них. Паспортное значение чувствительности МРЧЭ составляет  $3,2 \frac{\text{мВ}}{\text{В} \cdot \text{Гс}}$ . Для обеспечения стабильного напряжения питания МРЧЭ применяется источник опорного напряжения 4,096 В, в диапазоне  $\pm 65000$  нТл полная шкала выходного сигнала НМС1001 составляет 17,04 мВ.

Опорное напряжение АЦП, формируемое встроенным источником опорного напряжения равно 2,25 В. Таким образом, для приведения выходного сигнала МРЧЭ к величине, соответствующей полной шкале входного сигнала АЦП необходимо усилить выходной сигнал МРЧЭ в 132 раза. Поскольку использован дифференциальный выход МРЧЭ, каждая из составляющих дифференциального сигнала должна быть усилена в 66 раз. Ограничение полосы пропускания сигнала в соответствии с заданным значением можно реализовать с помощью фильтра низких частот 4 порядка.

Расчет шума производится для каждого усилителя дифференциальной пары по отдельности ввиду их идентичности. Результирующий шум берется как корень суммы квадратов некоррелированных составляющих шума.

Были рассчитаны шумы источника сигнала (МРЧЭ), усилителя и элементов цепи обратной связи в требуемом диапазоне частот (0,05 -10 Гц). Паспортное значение спектральной плотности шума МРЧЭ соответствует  $29 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 Гц. Шум в заданной полосе частот составит:

$$U_{\text{ш.МРЧЭ}} = e_{\text{ш.МРЧЭ}} \cdot \sqrt{\ln(f_2 / f_1)} = 29 \cdot \sqrt{\ln(10 / 0,05)} = 66,7 \text{ нВ}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ш.МРЧЭ}}$  - среднеквадратическое значение шума в заданной полосе частот,  $e_{\text{ш.МРЧЭ}}$  - спектральная плотность шума.

Для построения дифференциального усилителя использована микросхема прецизионного малощумящего операционного усилителя ADA4528-2. Спектральная плотность шума ОУ в рабочей полосе частот  $e_{\text{ш.ОУ}} = 6,99 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Зная  $e_{\text{ш.ОУ}}$ , нашли значения шума в заданной полосе частот:

$$U_{\text{ш.ОУ}} = e_{\text{ш.ОУ}} \cdot \sqrt{\ln(f_2 / f_1)} = 6,99 \cdot \sqrt{\ln(10 / 0,05)} = 16,1 \text{ нВ}. \quad (4)$$

Вычислили тепловой шум резисторов обратной связи  $R_3$   $R_4$ :

$$U_{\text{ш.}R_3} = \sqrt{(4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 1000 \cdot (10 - 0,05)} = 12,8 \text{ нВ}, \quad (5)$$

$$U_{\text{ш.}R_4} = \sqrt{(4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298 \cdot 66000 \cdot (10 - 0,05)} = 104 \text{ нВ}. \quad (6)$$

Вычислили шумы источника сигнала и усилителя с учетом коэффициента усиления.

$$U_{\text{у.ш.МРЧЭ}} = K_{\text{у.ш}} \cdot U_{\text{ш.МРЧЭ}} = 67 \cdot 66,7 = 4472,2 \text{ нВ}, \quad (7)$$

$$U_{\text{у.ш.ОУ}} = K_{\text{у.ш.ОУ}} \cdot U_{\text{ш.ОУ}} = 67 \cdot 16,1 = 1077,3 \text{ нВ}. \quad (8)$$

В схеме использован ФНЧ 4-го порядка, построенный на двух ОУ ADA4528-2, в рабочей области частот они работают с единичным коэффициентом усиления, следовательно, шум, вносимый ими в выходной сигнал, вычисляется следующим образом:

$$U_{\text{ш.ФНЧ}} = U_{\text{ш.ОУ}} \cdot 2 = 16,1 \cdot 2 = 32,1 \text{ нВ}. \quad (9)$$

Просуммировали вычисленные шумы схемы:

$$\begin{aligned} U_{\text{ш.вых}} &= \sqrt{U_{\text{у.ш.МРЧЭ}}^2 + U_{\text{у.ш.ОУ}}^2 + U_{\text{ш.}R_3}^2 + U_{\text{ш.}R_4}^2 + U_{\text{ш.ФНЧ}}^2} = \\ &= \sqrt{4472,2^2 + 1077,3^2 + 12,8^2 + 104^2 + 32,1^2} = 4600,3 \text{ нВ}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, было рассчитано значение шума, приведенное на каждый из входов АЦП [2], [3]. Поскольку используется АЦП с дифференциальным входом, то синфазная составляющая сигнала подавляется, а не коррелированная усиливается в  $\sqrt{2}$  раз:

$$U_{\text{ш.ДифФ.вых}} = U_{\text{ш.вых}} \cdot \sqrt{2} = 6505,8 \text{ нВ}. \quad (11)$$

Для перевода полученной величины СКО шума в значения от пика до пика воспользовались следующим соотношением:

$$U_{\text{ш.ДифФ.вых(п-п)}} = U_{\text{ш.ДифФ.вых}} \cdot 6,6 = 6505,8 \cdot 6,6 = 42938,5 \text{ нВ} \quad (12)$$

По рассчитанному уровню шума выходного сигнала оценили разрешающую способность магнитометра. Для этого рассчитали разрешающую способность цифровой части устройства. При

условии использования 16-ти битного АЦП полное количество доступных состояний сигнала в цифровой форме равно  $2^{16} = 65536$ . Учитывая заданный диапазон измерений  $\pm 65000$  нТл и величину опорного напряжения АЦП 2,25 В получили разрешающую способность цифровой части магнитометра равную 1,98 нТл или 34,33 мкВ соответственно. Среднеквадратическое отклонение выходного сигнала магнитометра равно 6505,83 нВ, что в 5,27 меньше значения младшего разряда АЦП, а значение шума выходного сигнала от пика до пика соизмеримо с разрешающей способностью АЦП, следовательно, в данной реализации устройства разрешающая способность устройства в целом ограничена разрешающей способностью АЦП.

## Литература

1. [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2012\\_11\\_24.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2012_11_24.php)
2. Бэйкер Бонни Что нужно знать цифровому разработчику об аналоговой схемотехнике – М. : Додэка-XXI, 2010.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х томах: Т.2. – М.: Мир, 1993.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И СХЕМ НА ИХ ОСНОВЕ

*Хвалин А.Л.<sup>1</sup>, Воробьев А.В.<sup>2</sup>, Бондаренко А.С.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, <sup>2</sup>ООО НПП «Ника- СВЧ»*

В представленной статье сформулирована и решена задача оптимизации основных частотных характеристик антенного усилителя диапазона дециметровых волн (ДМВ) на основе биполярного транзистора BFR90. Расчеты выполнены в САПР Microwave Office. При моделировании транзистора использована эквивалентная схема Гуммеля-Пуна. Приведены схема усилителя и результаты расчётов.

В известной научной и технической литературе, посвященной разработке высокочастотных усилителей мощности, практически отсутствуют работы, в которых последовательно рассмотрены шаги по выбору схемных решений, методики расчета элементов, особенности проектирования и настройки усилителей ДМВ-диапазона. Среди наиболее удачных работ по данной тематике можно назвать [1], где представлены конструкции нескольких десятков усилителей. В [1] рассмотрены вопросы построения усилительных схем, приведены эмпирические формулы для расчета элементов, затронуты отдельные вопросы оптимизации.

В статье изложена методика проектирования усилителя мощности дециметровых волн с улучшенными, по сравнению с аналогами, параметрами на основе решения задач структурной и параметрической оптимизации.

Известно, что при разработке практических устройств необходимо формулировать и решать задачи синтеза двух типов: структурные, когда необходимо оптимизировать структуру устройства с целью получить заданные характеристики с минимальными затратами (минимальное число элементов, минимальная стоимость и пр.), и параметрические, при решении которых необходимо изменять численные значения набора варьируемых параметров для достижения наилучших характеристик.

Структурный синтез при разработке усилителя заключается во включении в базовую схему усилителя необходимых согласующих элементов. В качестве активного элемента выбран биполярный транзистор BFR90 фирмы Vishay Semiconductors. Моделирование выполнено по эквивалентной схеме Гуммеля- Пуна [2, 3].

Параметрический синтез связан с решением задачи оптимизации [2] и сводится к отображению пространства варьируемых параметров схемы усилителя (рис. 1) в пространство критериев оптимальности, т.е. к достижению максимальных значений коэффициента усиления, минимальных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) входа и выхода в рабочем диапазоне частот. В качестве варьируемых параметров использованы номинальные значения емкостей, индуктивностей и сопротивлений, использованных в схеме усилителя. Существует множество численных методов оптимизации. У каждого из них свои преимущества и недостатки.

Поэтому при решении задачи оптимизации использовалось сочетание нескольких наиболее эффективных методов: случайного поиска, дифференциальной эволюции, симплекс-метод [2].

Моделирование усилителя проведено в среде САПР Microwave Office. За основу взята схема двухкаскадного антенного усилителя [1], предназначенная для усиления сигналов в телевизионном диапазоне ДМВ.

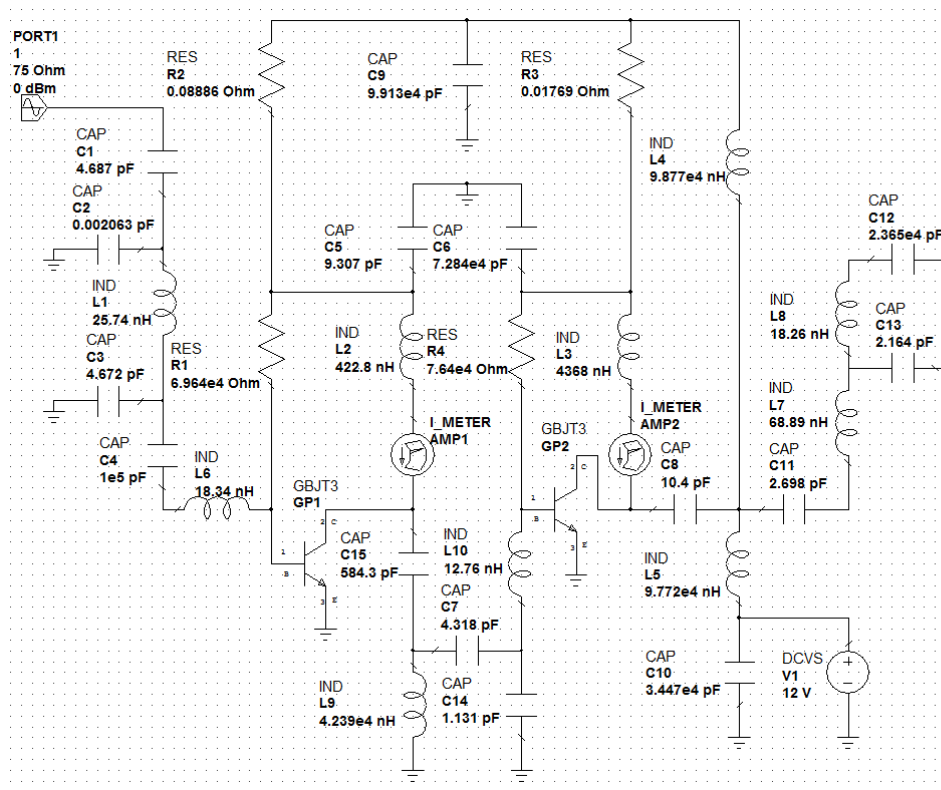


Рис. 1. Полная схема усилителя

На рис. 1 показана схема усилителя, дополненная необходимыми элементами согласования. На входе усилителя включен настраиваемый полосовой фильтр L1, C2, C3 с полосой пропускания в пределах с 21-го по 60-й канал телевизионного диапазона (470 – 790 МГц). Транзисторы VT1 и VT2 включены по схеме с общим эмиттером. Первый каскад определяет такие параметры усилителя, как уровень шума и перекрестную модуляцию. Второй каскад определяет общий коэффициент усиления. Коллекторный ток транзисторов не превышает 25 мА. Базовая схема обеспечивает коэффициент усиления порядка 25 дБ [1].

Вход и выход усилителя несимметричные и рассчитаны на подключение коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 Ом. Возбуждение усилителя осуществляется источником гармонического сигнала (Port 1), сопротивление нагрузки (Port 2) равно 75 Ом. Цепь питания усилителя (на рисунке не показана) состоит из источника питания с напряжением +12 В, двух емкостей и блокировочной индуктивности.

Для контроля коллекторного тока транзисторов в схему включено два амперметра. В базовую схему усилителя внесены ряд изменений с целью получения значений коэффициента усиления выше 25 дБ с минимальным перепадом в рабочей полосе частот и значений КСВН входа и выхода менее 1,5. Для выравнивания частотных характеристик усиления в схему добавлены выходной фильтр L7, L8, C13 и межкаскадная цепь C7, C15, C16, L9, L10 (вместо конденсатора C7 в базовой схеме [1]). Кроме того, для согласования во входную цепь добавлена индуктивность L6.

Для оптимизации схемы усилителя в качестве варьируемых параметров были выбраны номинальные значения всех элементов схемы, за исключением источника питания, транзисторов и портов (табл. 1) [3]. Для значений емкости, индуктивности, сопротивлений использованы единицы измерения соответственно: пФ, нГн, Ом. Компьютерная модель биполярного транзистора BFR90 получена в соответствии с методикой [4].

Моделирование проводилось в диапазоне 0,47 – 0,79 ГГц с шагом 0,01 ГГц. Полная схема усилителя показана на рис. 1. На вход усилителя подается сигнал мощностью 0 дБм (1 мВт). После оптимизации получены основные частотные характеристики усилителя мощности. Оптимальные значения всех элементов схемы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оптимальные номинальные значения элементов усилителя

Параметр	Численное значение	Параметр	Численное значение
C1	4,687025	L1	25,744250
C2	0,002063	L2	422,81200
C3	4,672082	L3	4368,0917
C4	99999,076	L4	98765,493
C5	9,307331	L5	97724,604
C6	72840,574	L6	18,342887
C7	4,3182441	L7	68,894197
C8	10,398491	L8	18,258649
C9	99127,863	L9	42386,900
C10	34469,022	L10	12,756744
C11	2,6975978	R1	69643,118
C12	23649,106	R2	0,0888612
C13	2,1635545	R3	0,0176878
C14	1,1310324	R4	76397,743
C15	584,34613		

На рис. 2 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления.

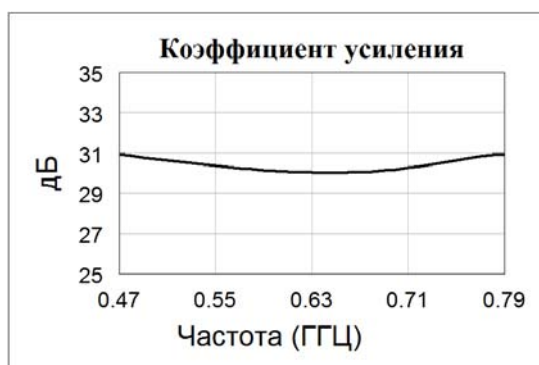


Рис. 2. Оптимальная АЧХ коэффициента усиления

Полученные оптимальные значения КСВН входа и выхода не превосходят 1,5.

В табл. 2 представлены основные характеристики разработанного усилителя в сравнении с известными аналогами. Результаты сравнения позволяют сделать вывод, что на основе решения задач структурной и параметрической оптимизации возможно создание усилителя ДМВ- диапазона с параметрами, не уступающими отечественным и зарубежным аналогам.

Моделирование ДМВ- усилителя проведено в среде САПР Microwave Office. Использованная при расчетах компьютерная модель биполярного транзистора BFR90 создана по его экспериментальным характеристикам по методике [4]. Сформулированы и решены задачи структурной и параметрической оптимизации схемы двухкаскадного антенного усилителя диапазона ДМВ. На основе модели транзистора BFR90 построен компьютерный проект усилителя и рассчитаны его оптимальные характеристики: коэффициент усиления от 30 до 31 дБ, КСВН входа и выхода не более 1,5.

Таблица 2. Сравнение разработанного усилителя с серийно выпускаемыми антенными усилителями ДМВ- диапазона

Модель	Рабочий диапазон, МГц	Коэффициент усиления, дБ	Напряжение питания, В	Производитель
LA-32U	470-862	20±2	+5	Locus, Россия

БРИЗ-1.1	470-862	10-15 (регулировка)	+12	ООО" ПЛАНАР", Россия
AWS-20	470-790	30	+12	Польша
Модель усилителя на BFR90	470-790	30-31	+12	-

## Литература

1. Титов А.А. Транзисторные усилители мощности МВ и ДМВ – М.: Солон- пресс, 2012.
2. Хвалин А.Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах: автореф. дисс. на соискание уч. степени д. техн. н.: 05.12.04. / Поволжская гос. академия телекоммуникаций и информатики: Самара. 2014. 32 с.
3. Хвалин А.Л., Васильев А.В. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика 2010, № 10, с. 29-33.
4. Мещанов В.П., Хвалин А.Л. // Радиотехника 2010, № 5, с.111-115.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ кТ В МАГНИТОБИОЛОГИИ

*Медведев Б.А., Дронкин А.С., Листратова Е.С.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Работа посвящена методическому аспекту проблемы действия слабых и сверхслабых магнитных полей на биологические системы. В качестве мишеней первичной магниторецепции рассматриваются магнитосомы и реакции свободных радикалов.

## Введение

Магнитобиология представляет собой совокупность целого ряда различных дисциплин: медицины, биологии, биохимии и биофизики. Она занимается изучением действия слабых и сверхслабых магнитных полей на биосистемы. Почему это направление исследований на сегодняшний день является актуальным? Прежде чем ответить на этот вопрос введем диапазон соответственно слабых и сверхслабых МП (магнитных полей):

- Слабые МП – это поля, имеющие магнитную индукцию порядка  $10^{-9}$ - $10^{-5}$  Тл. К ним, например, относятся геомагнитное поле и его возмущения, ежесуточные флуктуации, а также магнитный шум от различных электрических приборов.
- Сверхслабые МП– это поля, имеющие магнитную индукцию порядка  $10^{-12}$ - $10^{-10}$  Тл. К ним относятся поля различных биологических систем, например, человеческого мозга и глаз.

Магнитные поля из введенного диапазона постоянно оказывают на нас воздействие, которое обычно не замечается. Какие же биологические эффекты способны вызвать это воздействие, и можно ли найти им применение в медицинской диагностике или в физиотерапии? На все эти вопросы ищет ответы магнитобиология. Но в процессе изучения неизбежно возникают проблемы. Одна из основных таких проблем получила название проблема кТ в магнитобиологии.

## Проблема кТ

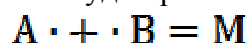
Действие слабых магнитных полей не является ионизирующим или тепловым. Более того, их энергия на несколько порядков меньше тепловой энергии кТ, то есть недостаточна для активации каких-либо биологических эффектов. Например, если мы будем рассматривать энергию действия геомагнитного поля на атом, то получим  $\mu\text{В} \sim 10^{-27}$  Дж, что на шесть порядков меньше средней энергии кТ для человеческого организма. Это ставит под вопрос возможность осуществления воздействия на живые организмы слабых и сверхслабых магнитных полей. Но существует значительное количество экспериментальных данных [5,7,8], подтверждающих их действие. Например, не подвергается сомнению способность некоторых живых организмов к магнитотаксису. В тоже время уже сейчас в медицинской практике используются некоторые биологические эффекты, индуцированные слабым электромагнитным излучением миллиметрового диапазона, действие которого также относят к не тепловым и неионизирующим воздействиям. Например, в лечении онкологических заболеваний, где оно не только способствует разрушению опухоли, но и служит защитой от рентгеновского излучения [11, с. 11-12]. В чем же дело?

На самом деле, наше негласное предположение, что мишенью первичной магниторецепции является атом или молекула в целом, не является исчерпывающим. В живых организмах можно найти и другие возможные мишени. Обсуждая эти положения, мы обнаруживаем, что существуют механизмы воздействия слабых и сверхслабых магнитных полей, которые позволяют разрешить описанную выше проблему кТ.

Подробнее остановимся на следующих мишенях магниторецепции: биохимических реакциях свободных радикалов и магнитосомах.

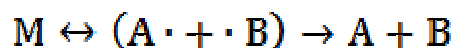
**Мишень номер 1: Биохимические реакции свободных радикалов**

Мы будем рассматривать реакцию рекомбинации свободных радикалов, то есть реакцию вида:

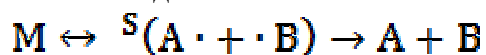


Здесь M – двухатомная молекула, образованная из двух свободных радикалов, имеющих по одному неспаренному электрону. Для осуществления такой реакции необходимо, чтобы электроны, участвующие в образовании химической связи, находились на одинаковых энергетических уровнях, а также, чтобы угловые моменты реагентов совпадали с угловым моментом продукта реакции. Теоретически магнитное поле могло бы влиять на угловые моменты реагентов, например на спин электрона, но этому мешают тепловые флуктуации. Тогда магнитное поле не способно менять скорость течения реакции? Не будем спешить с выводами.

Будем рассматривать не отдельные свободные радикалы, а так называемую радикальную пару:



Радикальная пара выделена скобками, стрелки отображают химические процессы (диссоциация молекул и рекомбинация пары), а также диффузию радикалов. Для образования валентной связи необходимо, чтобы два электрона находились в пространстве между атомами, но, по принципу Паули, это возможно, только если они находятся в разных спиновых состояниях. Поскольку электрон имеет спин  $s=1/2$ , то суммарное значение спинов двух электронов может быть равно либо 1, если они ориентированы одинаково, либо 0, если ориентация не совпадает. В первом случае состояние электронов получило название триплетное, а во втором – синглетное. То есть, для осуществления реакции электроны должны находиться именно в синглетном состоянии. Тогда реакция имеет вид:



Теперь рассмотрим проекцию спинов электрона (см. рис.1). Видим, что синглетному состоянию соответствует только один вариант проекции, в то время как триплетному целых три. То есть в подавляющем числе случаев при столкновении реакция рекомбинации происходить не будет.

Итак, вернемся к дезорганизующему фактору теплового движения. Спины электронов во внешнем магнитном поле способны ориентироваться либо по нему, либо против — при этом данные состояния обладают различной энергией. Тепловое движение приводит к случайным поворотам частиц. Однако в целом электроны заселяют два описанных ранее состояния в соответствии с распределением Максвелла-Больцмана. Таким образом формируется некое равновесное состояние. Теперь, если мы приложим внешнее воздействие, которое выведет систему из стабильного положения, то распределение начнет релаксировать к состоянию равновесия за счет тепловых флуктуаций. Принято выделять два вида релаксации, характеризующих скорость изменения спиновых состояний: спин-спиновую (или продольную) и спин-решеточную (или поперечную). Пока идут эти процессы, система находится в возбужденном состоянии. Для органических и неорганических радикалов характерное время релаксации лежит в интервале  $10^{-5} - 10^{-8}$  с. Одновременно, продолжительность жизни пары свободных радикалов в типичном случае составляет всего  $10^{-9}$  с. Таким образом, тепловое движение просто не успевает оказать никакого влияния на частицы.

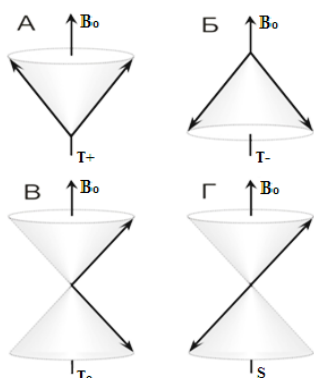


Рис. 1. Проекция спинов электронов радикальной пары на направление внешнего магнитного поля

Итак, мы приходим к логичному выводу, что воздействие слабых и сверхслабых магнитных полей на реакцию свободных радикалов оказывается возможным. Например, если обеспечить электронам различную частоту прецессии, можно перевести радикальную пару из триплетного нулевого состояния (см. рис. 1В) в синглетное (см. рис. 1Г). Этот механизм получил название g-механизм ( $g$  – множитель Ланде) [12], так как разность частот тем больше, чем сильнее различаются множители Ланде. Однако на самом деле достичь необходимых условий достаточно непросто, следует учитывать значительное количество факторов. Поэтому мы не будем подробно останавливаться на данном механизме и перейдем к следующей мишени.

#### Мишень номер 2: Магнитосомы

Магнитосомы – магнитные наночастицы с магнитным моментом, превышающим элементарный на 7-9 порядков. Они состоят в основном из магнетита ( $Fe_3O_4$ ). Наибольшее их количество у человека обнаружено в тканях мозга. В среднем их содержание составляет 10-50 нг/г, а размер варьируется от 10 до 200 нм. Также обнаружено содержание биомagnetита в ДНК, где он принимает участие в изменениях состава нуклеопротеидных комплексов и обеспечивает их магнитные свойства на определенных стадиях клеточного цикла [9]. Впервые магнитосомы были обнаружены в бактериях, способных к магнитотаксису. А в дальнейшем было показано, что именно магнитные наночастицы дают некоторым живым организмам возможность ориентироваться по магнитным силовым линиям [6].

Как было сказано ранее, магнитный момент магнитосом на 7-9 порядков превышает элементарный, благодаря чему их энергия в слабых магнитных полях имеет тот же порядок, что и энергия теплового движения. Таким образом, для них проблема кТ не стоит в столь острой форме. Но какова биологическая значимость магнитосом? Если влияние на жизнедеятельность организма биохимических реакций свободных радикалов давно известно, то для магнитных наночастиц это влияние не столь очевидно.

Магнитосомы в клетке находятся в ассоциации с белками цитоскелета, то есть имеют строгое расположение, которое определяет правильность функций, выполняемых магнитосомами. Помимо участия в магнитотаксисе, магнитосомы предположительно являются внутриклеточными сенсорами хода физического времени [10]. То есть нарушения в расположении наночастиц биомagnetита способны повлечь не только проблемы с ориентацией в пространстве по магнитному полю, что критично не для всех организмов, но и нарушениям клеточных циклов. Однако за счет чего может возникнуть нарушения?

В процессе онтогенеза количество магнетита в тканях организма растет. Это можно связать как с синтезом магнитосом в организме, по тому же механизму, что и у магниточувствительных бактерий, или же с возможностью попадания магнитных наночастиц в органы извне, например, в ткани мозга, преодолев гемато-энцефалический барьер [10]. Так или иначе, происходит увеличение количества и размеров магнитосом с возрастом. В то же время происходит постепенное ослабление их связей с цитоскелетом. К этому предположительно приводят старение кристаллического вещества магнитосом, а так же модификацией белков цитоскелета свободными радикалами. Этому могут способствовать и сами наночастицы, в том случаи, когда они оказываются ассоциированы с механочувствительными кальциевыми каналами посредством филаментов цитоскелета. Изменяя свое



положение в пространстве, магнитосомы способны приводить к активации таких каналов, а увеличение их размеров и количества способствуют этому и вовлекают дополнительные кальциевые каналы. Таким образом, возникает возможность магнитоиндуцированной гиперактивации кальциевых каналов, что влечет к повышению содержания кальция в клетке и усилению его осцилляционных потоков. Это приводит к повышению ферментативной активности кальпаинов, а они, благодаря протеолитическим свойствам способны разрушать белки цитоскелета.

В результате магнитосомы теряют свое положение в клетке и начинают дрейфовать во внутриклеточном пространстве. Это приводит к нарушению не только их расположения, но и всей архитектуры клетки и ее гомеостаза. Более того, вследствие механического стресса также возникает усиление осцилляционных потоков кальция. Это, как уже упоминалось, способствует свободно-радикальному окислению биомолекул, а также приводит к нарушению периодичности выбросов в кровь гормонов, имеющих гидрофильную природу. Вследствие механического стресса возникают и иные нарушения, например, возможно влияние на синтез ДНК. Активные формы кислорода (АФК), стимулирующие свободно радикальное окисление, могут также влиять на пути запуска программы апоптоза. В результате начинаются патологические процессы, например, разрушение клеток мозга способно привести к болезни Альцгеймера и Паркинсона, В пользу этого свидетельствует, что именно в областях мозга, повреждающихся при этих болезнях, обнаружена наибольшая концентрация железа[10].

Одним из не благоприятных последствий накопления магнетита в тканях является также то, что он не однородно накапливается в различных пейсмейкерах. Это влечет за собой десинхронизации биоритмов организма. Например, с возрастом сильно растет магниточувствительность эпифиза, что приводит к смещению циркадного ритма синтеза его основного мелатонина[10].

Итак, очевидно, что магнитосомы имеют биологическую значимость и могут участвовать в образовании патологий. Возможность оказания влияния на них слабыми и сверхслабыми магнитными полями, теоретически открывает для биомедицинских приложений новые возможности в профилактике и диагностике различных патологий. К примеру, мы можем попробовать наблюдать и регулировать концентрацию магнитосом в тканях мозга, или же пытаться контролировать механочувствительные кальциевые каналы.

### Заключение

Рассмотрен методический аспект проблемы кТ в магнитофизиологии.

Проведено обсуждение двух мишенеймагниторецепции слабых и сверхслабых МП, приводящих к магнитным биологическим эффектам - биохимических реакций свободных радикалов и биогенныхмагнитосом.

Введен диапазон слабых и сверхслабых магнитных полей.

Представленная работа может быть полезна для начинающих исследователей данной научной области, а также может быть использована в рамках лекционного курса по применению магнитоуправляемых наночастицдля биомедицинских приложений.

Глоссарий [1-4,10]

А

АПОПТОЗ — регулируемый процесс программируемой клеточной гибели, в результате которого клетка фрагментируется на отдельные апоптотические тельца, ограниченные плазматической мембраной.

Б

БИОРИТМЫ — периодически повторяющиеся изменения характера и интенсивности биологических процессов и явлений. С возрастом происходит десинхронизация биоритмов, что приводит к расстройствам нейрогуморальной регуляции. Предполагается, что одной из причин десинхронизации биоритмов является неодинаковый прирост магнитосомного материала в независимых клетках-пейсмейкерах, что приводит к возрастному увеличению магниточувствительности таких клеток по сравнению с другими и к большей их чувствительности к экзогенным воздействиям.

БОЛЕЗНЬ АЛЬЦГЕЙМЕРА — нейродегенеративное заболевание, наиболее распространенная форма деменции. Основными симптомами болезни Альцгеймера являются прогрессирующее снижение памяти, апатия, нарушение различных видов восприятия (зрительного, звукового, тактильного), оскудение словарного запаса, беглость речи, различные психиатрические проявления.

БОЛЕЗНЬ ПАРКИНСОНА — медленно прогрессирующее хроническое неврологическое заболевание, характерное для лиц старшей возрастной группы. Основными симптомами болезни Паркинсона являются мышечная неэластичность, недостаточная двигательная активность организма, непроизвольные ритмические подергивания конечностей или туловища, неустойчивость принимаемой телом позы.

Г

**ГЕМАТО-ЭНЦЕФАЛИЧЕСКИЙ БАРЬЕР** — физиологический барьер между кровеносной и центральной нервной системой. Его главная функция — поддержание гомеостаза мозга.

**ГОМЕОСТАЗ** — саморегуляция, способность открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия.

Д

**ДЕМЕНЦИЯ** — приобретенное слабоумие, стойкое снижение познавательной деятельности с утратой в той или иной степени ранее усвоенных знаний и практических навыков и затруднением или невозможностью приобретения новых; распад психических функций, происходящий в результате поражений мозга.

И

**ИОННЫЕ КАНАЛЫ КЛЕТКИ** — сложные трансмембранные белковые структуры, пронизывающие клеточную мембрану поперек в виде нескольких петель и образующие в мембране сквозное отверстие (пору).

К

**КАЛЬПАИН** — фермент, расщепляющий связь между аминокислотами в белках, и тем самым разрушающий их. Он участвует в нейродегенеративных процессах и апоптозе. **КЛЕТОЧНЫЙ ЦИКЛ** — период существования клетки от момента ее образования путем деления материнской клетки до собственного деления или гибели.

М

**МАГНЕТИТ** — минерал чёрного цвета из класса оксидов,  $Fe_3O_4$ .

**МАГНИТОСОМА** — мембранная органелла, характерная для магнитотактических бактерий, содержащая моноклинные ферромагнитные кристаллы. Содержание магнитосом в тканях мозга человека составляет около  $5 \times 10^6$ , в мозговой оболочке более  $10^8$  кристаллов на грамм, в среднем 50 нг/г. Около 90% частиц имеют размер 10-70 нм, а 10% обладают размером 90-200 нм. Роль магнитосомы в клетке — ориентирование относительно магнитного поля Земли, задание чувства времени, в процессе онтогенеза — развитие патологий в клетке, вызываемое старением. В клетке магнитосомы закреплены на белках цитоскелета. С течением времени размер магнитосом и их количество увеличиваются, а белковые связи с цитоскелетом ослабевают. Это влечет за собой отрыв магнитосомы и ее хаотический дрейф в клетке, вследствие чего нарушаются гомеостаз, клеточная архитектура и происходящие в клетке процессы.

**МАГНИТОТАКСИС** — способность перемещаться по силовым линиям магнитного поля Земли или магнита. Этот процесс происходит благодаря наличию в клетках организма магнитосом.

**МЕЛАТОНИН** — гормон, регулятор суточных биоритмов. Основные функции: регуляция кровяного давления, периодичности сна, функций головного мозга, регуляция деятельности эндокринной и пищеварительной систем, замедление процессов старения, усиление эффективности функционирования иммунной системы.

**МЕХАНОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ** — ионные каналы клетки, чувствительные к механическому воздействию.

О

**ОНТОГЕНЕЗ** — процесс индивидуального развития организма от оплодотворения (или от момента отделения от материнской особи, при бесполом размножении) и до конца жизни.

П

**ПЕЙСМЕЙКЕРЫ** — нервные скопления, генерирующие ритмические импульсы возбуждений, задающие частоту и, как следствие, частоту сокращений органов.

Ф

**ФИЛАМЕНТЫ** — белковые нити, являющиеся одним из структурных элементов цитоскелета.

Ц

**ЦИТОСКЕЛЕТ** — это клеточный каркас или скелет, находящийся в цитоплазме живой клетки. В его функции входит поддержание и адаптация формы клетки ко внешним воздействиям, экзо- и эндоцитоз, обеспечение движения клетки как целого, активный внутриклеточный транспорт и клеточное деление. Цитоскелет образован белками, из структурных элементов выделяют микротрубочки (полые внутри цилиндры диаметром 25 нм), а также микрофиламенты и промежуточные филаменты (белковые нити).

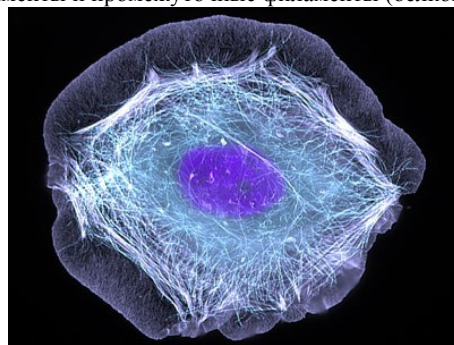
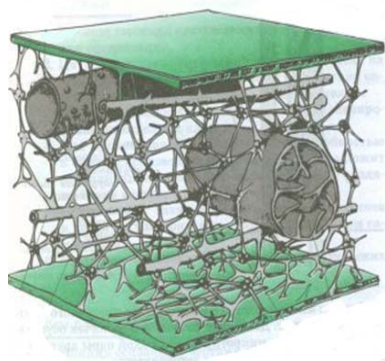


Рис. 2. Цитоскелет

**ЦИРКАДНЫЕ РИТМЫ** — циклические колебания интенсивности различных биологических процессов, связанные со сменой дня и ночи. Несмотря на связь с внешними стимулами, циркадные ритмы имеют эндогенное происхождение, представляя, таким образом, «внутренние часы» организма. Период циркадных ритмов обычно близок к 24 часам.

Э

**ЭПИФИЗ** — (верхний придаток мозга - шишковидное тело) относится к промежуточному мозгу. Железа представляет собой непарное образование по виду напоминающее еловую шишку, серовато-красного цвета, длиной 9 мм, шириной 6 мм и массой 0,2 г. Секреторные клетки эпифиза секретируют в кровь гормоны *мелатонин* и *серотонин*. Синтез и секреция гормонов зависят от освещенности и возраста человека. Снижение освещенности повышает выработку мелатонина – гормона влияющего на биоритмы «сон – бодрствование».

Литература

1. Анатомия человека. В 2 т. / Под ред. Сапина М.Р. - М.: Высшая школа, 2001.
2. Биология. В 2 т. / Под ред. Ярыгина В.Н. - М.: Высшая школа, 2003.
3. Медведев Б.А., Игнатъев А.А., Маслякова Г.Н. и др. Фотодинамическая терапия и локальная магнитная наногипертермия (русско-английский глоссарий)// Сборник научных трудов «Гетеромагнитная микроэлектроника», Вып.7. / Изд-во Саратовского университета, 2009, С. 36-69.
4. База знаний по биологии человека —<http://humbio.ru> — Заглавие с экрана.
5. Биология и медицина —<http://medbiol.ru> — Заглавие с экрана.
6. Бинги В.Н., Миляев В.А., Чернавский Д.С. и др. // Биофизика 2006, Т. 51, № 3, с.553-559.
7. Бинги В.Н. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника 2005, №6, с. 23-27.
8. Бинги В. Н., Савин А. В. // УФН, 2003, Т.173, с.265-300.
9. Бинги В.Н., Рубин А.Б. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника 2007, №(2-4), с.63-76.
10. Хомутов Г. Б. // Биофизика 2004, Т. 49, №1, с. 140-144.
11. Искусных И. Ю., Попова Т. Н. // Биомедицинская химия 2010, Т. 56, № 5, с. 530-539.
12. Бецкий О. В., Голант М. Б., Девятков Н. Д. Миллиметровые волны в магнитобиологии – М.: Знание, 1988.
13. Некоторые размышления о магнитном поле и его возможном влиянии на живое –<http://www.biophys.ru/biomag/217-magnit> – Заглавие с экрана.

## ЗАВИСИМОСТЬ УРОВНЯ ЗАПИСЫВАЕМОГО СИГНАЛА ОТ ТОЛЩИНЫ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

*Бородина Н.А., Кудрявцева С.П.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В статье представлены результаты моделирования магнитных свойств носителя информации от его толщины.

Величину выходящего из носителя внешнего остаточного потока, который взаимодействует с головкой воспроизведения и создает выходной сигнал системы записи, называют уровнем записи или отдачей. При записи гармонических сигналов отдачу определяют амплитудным или эффективным значением остаточного магнитного потока - это амплитуда выходящего из носителя внешнего магнитного потока  $\Phi_m$  [1,2].

В качестве критерия отдачи применяют величину остаточного магнитного потока, приходящегося на единицу поверхности носителя

$$B_y = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{1}{b} \cdot \frac{d\Phi}{dx},$$

где  $B_y$  - поперечная (перпендикулярная) составляющая магнитной индукции на поверхности носителя, которую для краткости называют поверхностной индукцией;  $S = b \cdot dx$  - площадь элементарного участка рабочей поверхности носителя;  $b$  - ширина дорожки записи,  $dx$  - элемент носителя в направлении намагничивания.

Если на носителе записан синусоидальный сигнал, то внешний магнитный поток и поверхностная индукция распределены синусоидально вдоль носителя:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

$$B_y = \frac{1}{b} \cdot \frac{d\Phi}{dx} = \frac{1}{b} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Phi_m \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = B_{ym} \cos \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

где  $B_{ym} = \frac{2\pi}{b\lambda} \Phi_m$  - амплитуда поверхностной индукции,  $\lambda$  -длина волны записи.

Для магнитного поля в окружающем носитель внешнем пространстве справедливы уравнения Максвелла в магнитостатическом приближении.

При условии

$$\frac{\partial B}{\partial z} = 0 \text{ и } B_z = 0$$

уравнения Максвелла имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы уравнений (1) проведено методом разделения переменных:

$$B_x = B_{ym} \cdot e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y} \sin \frac{2\pi}{\lambda}x, \quad (2)$$

$$B_y = B_{ym} \cdot e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y} \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda}x. \quad (3)$$

Выражения (2), (3) указывают на экспоненциальный спад индукции и, соответственно, внешнего магнитного потока с удалением от рабочей поверхности.

Для того, чтобы найти отдачу как функцию намагниченности носителя  $M$ , рассматривается очень тонкий слой синусоидально намагниченного носителя и принимается, что его магнитная проницаемость равна 1 и что намагниченность в нем направлена продольно и распределена однородно по толщине. В очень тонком носителе длина волны записи много больше его толщины  $D$ . Поэтому эффектом саморазмагничивания в сигналограмме можно пренебречь и считать, что внутренняя магнитная индукция в нем равна

$$B_{m(cp)} = \mu_0 M_m$$

где  $B_{m(cp)}$  - амплитуда индукции, усредненная по толщине,  $M_m$  - амплитуда намагниченности и

$$B_x = B_{m(cp)} \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x = \mu_0 M_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x.$$

Внешний магнитный поток для рассматриваемой модели составляет половину внутреннего

$$\Phi = \frac{1}{2} bD \cdot B_{x(cp)} = \frac{1}{2} bD \cdot \mu_0 M_m \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x,$$

так что  $\Phi_m = \frac{bD \cdot \mu_0 M_m}{2}$ , и амплитуда поверхностной индукции

$$B_{ym} = \frac{2\pi}{b\lambda} \cdot \Phi_m = \frac{2\pi}{b\lambda} \cdot \frac{bD \cdot \mu_0 M_m}{2} = \frac{\pi D}{\lambda} \cdot \mu_0 M_m. \quad (4)$$

Из полученных соотношений следует, что у очень тонкого носителя при постоянной амплитуде намагниченности внешний магнитный поток не зависит от длины волны записи, а амплитуда поверхностной индукции обратно пропорциональна длине волн.

Для исследования влияния толщины магнитного носителя на величину поверхностной индукции рассмотрим синусоидально намагниченный носитель произвольной толщины  $D$ , представленный на Рисунке 1.

Примем, что намагниченность в носителе распределена однородно по толщине и магнитная проницаемость постоянна и равна 1. Разобьем носитель по толщине на элементарные слои толщиной  $dy$ . К каждому такому слою применимо соотношение (4), заменив  $D$  на  $dy$ , но только следует учесть изменение амплитуды поверхностной индукции в пространстве над каждым элементарным слоем:

$$dB_y(y) = dB_{ym} \cdot e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y} = \frac{\pi \cdot dy}{\lambda} \cdot \mu_0 M_m \cdot e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y}.$$

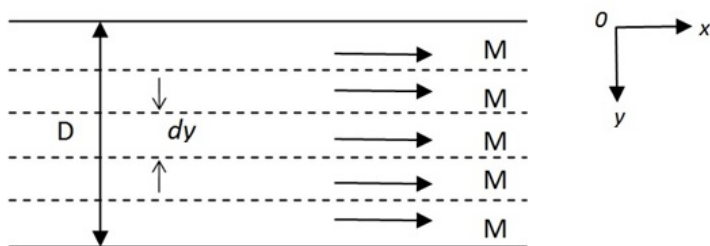


Рис. 1. Синусоидально намагниченный носитель

Тогда по принципу суперпозиции, который можно применять в силу линейности системы, получаем:

$$B_y = \int dB_y(y) = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \mu_0 M_m \cdot \int_0^D e^{-\frac{2\pi}{\lambda}y} dy = \frac{\pi D}{\lambda} \cdot \mu_0 M_m \cdot \frac{1 - e^{-\frac{2\pi D}{\lambda}}}{\frac{2\pi D}{\lambda}}. \quad (5)$$

Сомножитель  $\frac{1 - e^{-\frac{2\pi D}{\lambda}}}{\frac{2\pi D}{\lambda}}$  в выражении (5) представляет собой так называемую функцию

слоиных потерь, которая показывает, что с уменьшением длины волны записи или с увеличением толщины носителя  $D$  всё большая часть потока, создаваемого глубинными слоями носителя, замыкается внутри него и не участвует в образовании результирующей поверхностной индукции.

Результаты расчета по формуле (5) представлены в Таблице 1 и на Рисунке 2. Из анализа Рисунка 2 следует, что при толщине носителя  $\frac{2\pi D}{\lambda} = 1,5$  (величина  $D \approx 0,24\lambda$ ) вклад в поверхностную индукцию нижних слоев составляет 50% и менее. Так как уровень записываемого сигнала находится в прямой зависимости от величины поверхностной индукции, то для его увеличения толщина магнитного рабочего слоя носителя должна быть меньше  $0,24\lambda$ .

Таблица 1. Значения поверхностной магнитной индукции  $\frac{B_y}{\mu_0 M_m}$ .

$\frac{2\pi D}{\lambda}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\frac{B_y}{\mu_0 M_m}$	1	0,9516	0,9064	0,8639	0,8242	0,7869	0,752	0,7192

$\frac{2\pi D}{\lambda}$	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\frac{B_y}{\mu_0 M_m}$	0,6883	0,6594	0,6321	0,5823	0,5382	0,4988	0,4637	0,4323

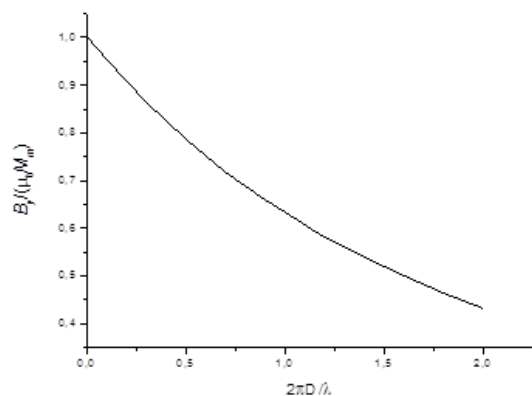


Рис. 2. Зависимость поверхностной магнитной индукции от толщины носителя

Литература

1. Запись аудио- и видеосигналов: учеб. для вузов / под ред. Ю. А. Ковалгина - М.: Изд. центр "Академия", 2010.
2. Гитлиц М. В. Магнитная запись сигналов: Учебное пособие для вузов - М.: Радио и связь, 1990.

ПОДАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОМЕХ

*Зайцева Е.С., Романченко Л.А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Представлен анализ задачи по защите датчика от внешних магнитных помех с одновременным сохранением чувствительности к медленным изменениям магнитного поля может быть решена с применением немагнитных кольцевых экранов.

Магнитометр - прибор для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств веществ (магнитных материалов). Самым главным параметром магнитометра является его чувствительность. Датчики слабых магнитных полей обладают очень высокой чувствительностью к изменению магнитного поля. Измерение слабых магнитных полей, сравнимых со значением магнитного поля Земли, или имеющих меньшие значения, возможно с применением магнитоэлектронных датчиков, относящихся к классу магниторезонансных датчиков. Задача по защите датчика от внешних магнитных помех с одновременным сохранением чувствительности к медленным изменениям магнитного поля может быть решена с применением немагнитных кольцевых экранов. Эффект подавления основан на явлении электромагнитной индукции и проявляется при переменном характере помех.

В данной работе приведены результаты теоретических исследований по оценке эффективности применения немагнитных кольцевых экранов к магнитоэлектронному датчику слабых магнитных полей для снижения влияния внешних магнитных помех на показания датчика.

В результате быстрых изменений внешнего магнитного поля (промышленной помехи) согласно закону электромагнитной индукции в экранирующем кольце возникает ЭДС индукции и индукционный ток  $I$ , который по правилу Ленца будет иметь такое направление, что порождаемый им магнитный поток будет стремиться скомпенсировать действие внешнего быстро изменяющегося магнитного поля  $B_{внеш}$

$$e_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI + \Phi_{внеш}) = -L\frac{dI}{dt} - \frac{d\Phi_{внеш}}{dt}. \tag{1}$$

Согласно 2-му правилу Кирхгофа ЭДС индукции будет равна падению напряжения в кольце (2).

$$IR = -\left(L\frac{dI}{dt} + \frac{d\Phi_{внеш}}{dt}\right), \tag{2}$$

где  $e_{инд}$  – ЭДС индукции,  $I$  – индукционный ток в кольце,  $L$  – индуктивность кольца,  $\Phi_{внеш}$  – внешний магнитный поток,  $R = \rho l / S$  – сопротивление кольца,  $\rho$  – удельное сопротивление, соответствующее материалу кольца,  $l$  – периметр кольца,  $S$  – площадь поперечного сечения кольца.

Если в пределах кольца внешнее магнитное поле однородно, то

$$\Phi_{внеш} \cong \pi \frac{D^2}{4} \cdot B_{внеш}(t),$$

и

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = -\frac{1}{L} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \frac{dB_{внеш}(t)}{dt} \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр кольца.

Общее решение однородного уравнения  $\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I = 0$

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}$$

Частное решение неоднородного уравнения зависит от вида функции  $B_{внеш} = B(t)$ , т.е. от вида помехи.

Если  $B_{внеш}(t) = B_0 \cos \omega t$  (гармоническая помеха), то частное решение (3) имеет вид:

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = I_0 \cos \omega t \cos \varphi_0 - I_0 \sin \omega t \sin \varphi_0$$

Тогда

$$\frac{dI}{dt} = I_0 \cos \varphi_0 (-\omega) \sin \omega t - I_0 \sin \varphi_0 \omega \cos \omega t, \quad (4)$$

и при подстановке полученных выражений в (3) имеем

$$-\omega I_0 \cos \varphi_0 \sin \omega t - \omega I_0 \sin \varphi_0 \cos \omega t + \frac{R}{L} I_0 \cos \varphi_0 \cos \omega t - \frac{R}{L} I_0 \sin \varphi_0 \sin \omega t = -\frac{1}{L} \frac{\pi}{4} D^2 B_0 (-\omega) \sin \omega t.$$

Приравнивая коэффициенты при  $\sin \omega t$  и  $\cos \omega t$ , получаем

$$\begin{aligned} -\omega I_0 \cos \varphi_0 - \frac{R}{L} I_0 \sin \varphi_0 &= -\frac{\omega \pi D^2}{L \cdot 4} B_0 \\ -\omega I_0 \sin \varphi_0 + \frac{R}{L} I_0 \cos \varphi_0 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения такой системы уравнений, где неизвестными являются  $I_0$  и  $\varphi_0$  уравнения возводятся в квадрат и затем попарно суммируются. В результате находим

$$I_0 = \frac{1}{L} \frac{\pi D^2}{4} \frac{B_0}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}}}. \quad (6)$$

Из второго уравнения системы (5) следует, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{R}{\omega L}, \text{ а} \\ \sin \varphi_0 &= \pm \frac{\frac{R}{\omega L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} \text{ и} \\ \cos \varphi_0 &= \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}. \end{aligned}$$

Так как магнитное поле индукционного тока по правилу Ленца должно компенсировать изменение внешнего магнитного поля, то перед  $\sin$  и  $\cos$  должны стоять знаки «-», а  $\operatorname{tg} \varphi_0 > 0$ , так что

$$I(t) = -\frac{1}{L} \frac{\pi D^2}{4} \frac{B_0}{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}} \left( \cos \omega t - \frac{R}{\omega L} \sin \omega t \right) \quad (7)$$

Магнитное поле на оси кругового тока

$$B_{\text{инд}} = \frac{\mu_0}{2 \frac{D}{2}} I = -\frac{\pi \mu_0 D^2}{4DL} \frac{B_0}{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}} (\cos \omega t - \frac{R}{\omega L} \sin \omega t) \quad (8)$$

Тогда суммарное магнитное поле в центре кольца

$$B_{\text{действие}}(t) = B_{\text{внеш}}(t) - B_{\text{инд}}(t) = B_0 \left[ \left( 1 - \frac{\pi \mu_0 D}{4L} \frac{1}{1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}} \right) \cos \omega t - \frac{R}{\omega L} \sin \omega t \right] = \beta B_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (9)$$

где

$$\beta = \sqrt{\left( 1 - \frac{\pi \mu_0 D}{4L} \cdot \left( 1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2} \right)^{-1} \right)^2 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}}, \quad (10)$$

При  $\frac{R^2}{\omega^2 L^2} \ll 1$   $\beta \cong 1 - \frac{\pi \mu_0 D}{4L}$ .

Коэффициент подавления помех является обратной величиной  $\beta$

$$\Gamma = \frac{1}{\beta} \quad (11)$$

Использование немагнитных цилиндрических экранов приводит к подавлению высокочастотных помех, а датчик магнитного поля в результате регистрирует только медленные изменения магнитного поля [1,2].

В работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований эффективности подавления быстропеременных магнитных помех. При экранировании магнитоэлектронного датчика слабыми магнитными полями с геометрическими размерами  $2,5 \times 3 \times 4$  (см), алюминиевым цилиндром с диаметром  $\varnothing = 7,5$  см, высотой  $h = 15,5$  см и толщиной стенок  $\sigma = 0,3$  см, наблюдалось существенное снижение (в 3-4 раза) влияния помех (рис. 1).

При проведении теоретических исследований подавления гармонических магнитных помех с частотой 1000 Гц индуктивность кольца рассчитывалась по приближенной формуле

$$L = \mu_0 b \left( \log \left( \frac{8b}{a} \right) - \frac{7}{4} \right), \quad (12)$$

где  $b$  и  $a$  – радиус и толщина стенок цилиндра соответственно. Радиус цилиндра при расчетах изменялся в пределах от 0,05 до 0,3 м, а толщина стенок принималась равной 2 мм.

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 1. Видно, что наиболее эффективно подавление помех происходит при использовании цилиндров с радиусом 0,07–0,2 м и высотой 0,1 м.

При проведении количественной оценки эффективности подавления гармонических магнитных помех на различных частотах был выбран диапазон от 50 до 1500 Гц. Этот диапазон характерен для естественных помех при измерениях как в лаборатории, так и в полевых условиях. Определенная ранее оптимальная высота цилиндра и толщина стенок составили соответственно 10 см и 2 мм. Диаметр цилиндра изменялся в пределах от 5 до 30 см.



На рис. 2. представлены графики зависимости коэффициента подавления помех  $\Gamma$  от радиуса цилиндра для различных частот. Видно, что при увеличении частоты коэффициент подавления возрастает. Особенно заметно эффект подавления проявляется при частотах выше 1300 Гц [4].

Таким образом, применение немагнитных цилиндрических или кольцевых экранов позволяет снижать влияние внешних магнитных помех на показания датчика слабых магнитных полей.

Необходимо отметить, что такая модель подавления помех является универсальной, так как в основе ее лежит явление электромагнитной индукции, и может применяться к датчикам с различными принципами работы.

Дальнейшее снижение внешнего воздействия на показания датчиков слабых магнитных полей может достигаться применением программных средств обработки результатов измерений.

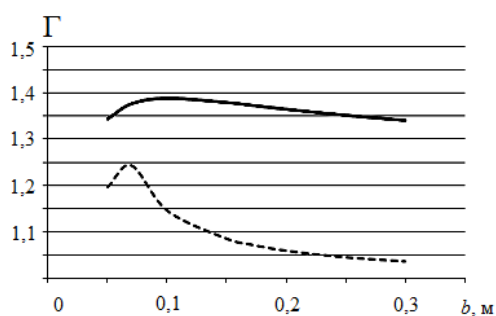


Рис. 1. Зависимость коэффициента подавления внешних гармонических помех от геометрических размеров экрана (сплошной линией показана зависимость коэффициента подавления от радиуса цилиндра при высоте  $h = 0,1$  м, пунктирной – при  $h = 0,2$  м)

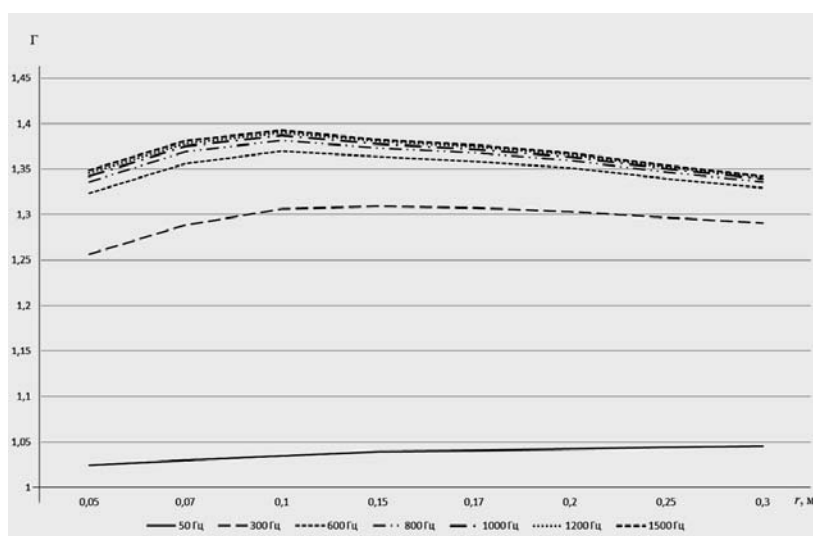


Рис. 2. Зависимость коэффициента подавления помех  $\Gamma$  от радиуса цилиндра для различных частот

#### Литература

1. Романченко Л.А., Куликов М.Н., Игнатъев А.А. и др. Подавление быстропеременных магнитных помех в датчиках магнитного поля / Л.А. Романченко, // Датчики и системы -2006: сб. трудов Всерос.науч.-практ. конф. «Создание и развитие датчиков для систем измерения, контроля, управления и диагностики» (Россия, г. Москва, 30-31 мая 2006 г.). Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006г. – С. 308-310.
2. Куликов М.Н., Романченко Л.А. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика 2007, №5, с.43–46.
3. Игнатъев А.А., Романченко Л.А., Солопов А.А. и др. Применение немагнитных цилиндрических экранов для подавления гармонических магнитных помех //Гетеромагнитная микроэлектроника. Сб. докл. и ст. научн.-техн. совещ. / Изд-во Саратов. ун-та – Саратов, 2014. – Вып. 16 - Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности - С. 37 - 42
4. Романченко Л. А., Зайцева Е. С. Оценка эффективности подавления магнитных помех частотном диапазоне от 50 до 1500 Гц // Математическое моделирование и информационные технологии в научных исследованиях и образовании. // Сб. научн. статей – Саратовская региональная общественная организация Центр «Просвещение», Саратов, 2015, С. 89-92.

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОМАГНИТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

*Ретунский А. С., Игнатъев А. А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Проведено теплофизическое моделирование электронного модуля предназначенного, для измерения магнитных полей. Реализована тепловая модель электронного модуля и решена нестационарная задача теплопроводности. Определены максимальные перепады температур по корпусу устройства и места расположения датчиков температуры.

Геомагнитный электронный модуль (ГМЭМ) представляет собой законченное функциональное устройство для измерения слабых магнитных полей [1, 2], в частности, для измерения всех компонентов магнитного поля Земли. ГМЭМ включает в себя 3D гетеромагнитный первичный преобразователь (ГМПП) измеряемого магнитного поля и систему обработки данных, включая коррекцию показаний ГМПП по температурному фактору.

ГМПП представляет собой твёрдотельный автогенератор на основе полевых или биполярных транзисторов, в цепи обратной связи которого содержится ферритный (ЖИГ) микрорезонатор. Ферритовый микрорезонатор находится в поле системы подмагничивания на основе постоянного магнита.

Плата каждого отдельного автогенератора размещена на латунном основании, представляющем собой вставку в основной корпус. Такие две противоположные вставки с платами интегральных микросхем являются одноосным дифференциальным первичным преобразователем индукции измеряемого магнитного поля. В рассматриваемой конструкции ГМЭМ содержится три таких дифференциальных ГМПП, ориентированных взаимно перпендикулярно.

И ЖИГ-микрорезонатор и магнит системы подмагничивания имеют температурозависимые параметры.

Целями анализа теплового режима ГМЭМ явились определение времени выхода на режим, определение максимальных температурных перепадов в ГМЭМ и выяснение количества и мест расположения датчиков температуры для наиболее адекватного учета температурной зависимости выходных сигналов ГМПП.

Теплофизический анализ проводился на основе численных и аналитических задач теплопроводности для модели ГМЭМ с граничными условиями 3-го рода, описывающими конвективный теплообмен между поверхностью ГМЭМ и окружающей средой. Вычисления проводились на основе оригинальных теплофизических моделей с использованием метода тепловых схем и теории регулярного теплового режима.

Проведенный анализ показал следующее.

Оказалось, выгодным размещать 3D ГМПП внутри внешнего дюралюминиевого замкнутого корпуса – экрана через слой теплоизоляционного материала. Элементы системы управления и обработки информации размещены на внутренней поверхности этого внешнего корпуса. Такая конструкция обеспечивает, во-первых, рассеяние тепловой энергии от системы управления и обработки информации непосредственно в окружающую среду без заметного влияния на ГМПП, так как поверхность этого корпуса используется как радиатор, и, во-вторых, наличие теплоизоляции корпуса ГМПП заметно растягивает во времени нестационарные тепловые процессы в самом 3D ГМПП, что значительно улучшает точность алгоритмической поправки приведения данных ГМПП к опорной температуре. При этом чрезмерного роста температуры в самом 3D ГМПП нет.

Результаты расчета зависимости перегрева центральной области латунного корпуса 3D ГМПП, в которую помещается компактный датчик температуры, относительно температуры внешней поверхности дюралюминиевого корпуса ГМЭМ показали что перегрев составляет примерно 4,5 градуса Цельсия. Расчеты также показывают, что этот перегрев слабо зависит от условий охлаждения рассматриваемой конструкции ГМЭМ в целом.

Время выхода ГМПП на тепловой режим (по уровню 95% от стационарной температуры) составляет около 11000 с (3 час.), однако латунный корпус ГМПП практически прогревается за 4000 с (за счет собственного тепловыделения в шести гетеромагнитных автогенераторах), а дальнейшее увеличение температуры ГМПП происходит за счет роста температуры устройства в целом.

Из проведенных расчетов следует, что стационарные температурные перепады по телу латунного корпуса 3D ГМПП не превышают  $1,5^{\circ}\text{C}$ , а стационарные температуры внутренних поверхностей вставок, в непосредственной близости от которых расположены ЖИГ-микрорезонаторы, и температура центральной части латунного корпуса различаются не более чем на  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

Постоянные магниты, обеспечивающие заданный уровень поля подмагничивания ЖИГ-микрорезонаторов, плотно вделаны во внутреннюю часть латунного корпуса и имеют его температуру. Следовательно, температуры постоянных магнитов и ЖИГ-микрорезонаторов различаются не более чем на  $0,7^{\circ}\text{C}$ , что важно для алгоритмического приведения выходных сигналов всех автогенераторов к опорной температуре

Наконец, в качестве рекомендаций можно предложить следующее.

Замена латунного корпуса 3D ГМПП на медный позволит уменьшить температурные перепады в нем в 4,5 раза за счет более высокой теплопроводности меди. При этом время прогрева медного корпуса с той же геометрией также уменьшится примерно в 4 раза, поскольку теплоемкость и плотность меди не слишком отличаются от соответствующих значений для латуни.

В качестве магнитов для систем подмагничивания гетеромагнитных автогенераторов желательно использовать магнитные материалы системы ЮНДК. Они обладают наименьшими обратимыми изменениями магнитной индукции из-за вариации температуры ( $\alpha_B \approx -0,02$ ). Вариация обратимых изменений индукции магнитного поля для магнитов указанного типа составит не более  $\pm 3,7\%$  от уровня индукции при комнатной температуре при изменении температуры от минус  $60^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . При этом зависимость индукции магнитного поля от температуры в указанном диапазоне практически линейная.

Миниатюрные и стабильные датчики температуры в количестве трех следует размещать в трех точках корпуса ГМПП: в центре и на взаимно противоположных внешних сторонах металлического немагнитного корпуса ГМПП. Датчики должны иметь точность определения температуры не хуже  $0,1^{\circ}\text{C}$ . На их показаниях должен быть основан алгоритм температурных поправок с учетом того факта, что некоторые поправочные коэффициенты должны менять знак при резком увеличении температуры окружающей среды.

Сократить время выхода на тепловой режим ГМПП позволит уменьшение размеров автогенераторов, а именно интеграция ферритного (ЖИГ) микрорезонатора в транзистор. По предварительным расчетам время выхода такой конструкции на стационарный тепловой режим составляет порядка 1-2 секунд.

#### Литература

1. Ингатьев А. А., Ляшенко А. В. Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов - М.: Наука, 2005.
2. Ингатьев А. А., Ляшенко А. В. Гетеромагнитная микроэлектроника: микросистемы активного типа - М.: Наука, 2007.
3. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике - М. : Сов. радио, 1975.
4. Миткевич А.В. Стабильность постоянных магнитов – М.: Энергия, 1971.
5. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина – М.: Энергия, 1971.
6. Евграфов А. А., Игнатъев А. А., Ретунский А. С. И др. Сравнение основных характеристик аналогового и цифрового датчиков температуры // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. / под ред. проф. А. В. Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2013. – Вып. 14 : Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. С. 4 – 13.
7. Овчинников С. В., Ляшенко А. В. Обобщенная модель для аналитического расчета температурных полей и тепловых сопротивлений элементов твердотельной радиоэлектроники // Гетеромагнитная микроэлектроника: сб. науч. тр. / под ред. проф. А.В. Ляшенко. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – Вып. 12: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. С. 11 – 18.
8. Новоселов В.В., Овчинников С.В. Определение решений многомерных неоднородных краевых задач с помощью метода перемножений // Вопросы прикладной физики: Межвуз. науч. сб. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2003. вып. 9. С. 52-53.
9. Овчинников С. В., Самолданов В. Н., Ляшенко А. В. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610993 РФ. Программа расчета стационарного теплового сопротивления многослойных конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора с прямоугольной формой; правообладатель: ОАО «Гантал». – № 2004610421; заявл. 26.02.2004; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.2004.

10. Овчинников С.В., Игнатьев А.А., Ляшенко А.В. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610986 РФ. Программа расчета стационарного теплового сопротивления конструктивных элементов мощного магнитоэлектронного транзистора в виде многослойного цилиндра; правообладатель: ОАО «Гантал». – № 2004610414; заявл. 26.02.2004; Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 21.04.04.
11. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах – Л.: Энергия, 1968.

## МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

КАК ДИАГНОСТИРОВАТЬ РЕАЛЬНЫЕ КОГНИТИВНЫЕ  
И МОТИВАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА БУДУЩИХ МАГИСТРАНТОВ?

Аникин В.М.<sup>1</sup>, Пойзнер Б.Н.<sup>2</sup>

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Томский государственный университет

Обсуждаются цели, форма и содержание приемных испытаний в магистратуру, предполагающей в качестве основной научно-исследовательскую деятельность выпускника. Формулируются вопросы, способствующие выявлению истинной мотивации поступающего в магистратуру, и рассказывается об опыте приёмной кампании 2015 года.

## ВВЕДЕНИЕ

2015 год отличителен для высшей школы в том, что именно в этом году произошел окончательный переход на двухуровневую (а с учетом аспирантуры – трехуровневую) форму высшего образования в России: впервые в массовом порядке магистратуру дополнили выпускники бакалавриата. Возникновение реального конкурса поступающих в магистратуру делает актуальным вопрос о структуре и содержании приемных испытаний, способствующих соответствующей «фильтрации» поступающих.

Как правило, одной из основных форм деятельности выпускника магистратуры классического университета по физическим направлениям подготовки предполагается занятие научными исследованиями. Это должно, естественно, находить отражение и в формах проведения вступительных испытаний в магистратуру, и содержание испытаний должно быть ориентировано на выявление студенческого контингента, который, помимо определённого уровня знаний, обладает способностями заинтересованно и творчески подходить к следующему (после бакалавриата) этапу обучения. А одной из целей его является приобретение компетенций по самостоятельному пополнению новых знаний и творческому их применению при решении научно-технических задач.

Как же выявить когнитивный потенциал и мотивационные устремления будущего магистранта всего лишь за одно предусмотренное правилами приёма собеседование? Кто он, «идеальный магистрант»? В данном сообщении затрагиваются именно эти вопросы.

ЦЕЛИ, ФОРМА И СОДЕРЖАНИЕ ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ПРИЕМЕ В  
МАГИСТРАТУРУ

Действующий федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» предоставляет высшим учебным заведениям право самостоятельно решать вопрос о форме и содержании вступительных испытаний в магистратуру с учетом индивидуальных достижений поступающих. Так, в пп. 6 и 7 статьи 59 Закона говорится:

«6. Прием на обучение по программам магистратуры, программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), программам ординатуры, а также по программам ассистентуры-стажировки осуществляется по результатам вступительных испытаний, проводимых образовательной организацией самостоятельно.

7. Поступающие на обучение по образовательным программам высшего образования вправе представить сведения о своих индивидуальных достижениях, результаты которых учитываются этими образовательными организациями при приеме в соответствии с порядком, установленным в соответствии с частью 8 статьи 55 настоящего Федерального закона».

Как правило, формы и содержание испытаний фиксируются в правилах приема или соответствующих локальных актах (положениях) вузов.

Главной целью вступительных испытаний является подбор абитуриентов, образовательный уровень которых соответствует конкретной магистерской программе, а выбор направления (профиля) подготовки является осознанным и не связанным с обстоятельствами, не имеющими прямого отношения к образовательной сфере и будущей работе.

Высшими учебными заведениями практикуются различные формы проведения вступительных испытаний при приеме в магистратуру:

- Письменная форма.
- Устная форма.

- (Компьютерное) тестирование.
- Конкурс документов (portfolio).
- Собеседование как комбинированная, итоговая форма, учитывающая результаты других форм испытаний (тестирований).

*Частными целями* приемных испытаний ставятся:

- Выявление (проверка) общекультурных компетенций.
- Выявление (проверка) общепрофессиональных компетенций.
- Выявление соответствия образовательного уровня поступающего магистерской программе (форма деятельности – научно-исследовательская) и структуры мотивационной составляющей.

Конкретные вопросы и задания для выбранной формы испытаний, способствующие решению поставленных целей, факультеты готовят заблаговременно. Абитуриенту должна быть доступна следующая информация:

- Форма, содержание, программы вступительных испытаний.
- Состав portfolio.
- Критерии оценивания.
- Список литературных источников для подготовки.

Скажем, в portfolio в достаточно полном виде могут включаться:

1. Резюме (curriculum vitae, список публикаций, сведения об участии в конференциях, студенческих школах, исследовательских проектах, научных грантах и др.).
2. Мотивационное письмо на 1-2 страницах, где в свободной форме раскрываются: область научных интересов, ожидания, связываемые с обучением на программе, какие теоретические знания и практические навыки абитуриент ожидает получить в процессе обучения.
3. Копия документа об образовании с перечнем пройденных дисциплин (оригинал представляется в приёмную комиссию).
4. Рекомендательные письма (письма) от научного руководителя и других лиц, знакомых с научными и учебными достижениями абитуриента.
5. Научные работы абитуриента (на электронном или бумажном носителе):
  - 5.1. Выпускная квалификационная работа.
  - 5.2. Научные публикации.
6. Дипломы и сертификаты, подтверждающие прочие академические достижения абитуриента (копии).
7. Языковой сертификат.

В качестве устных или письменных вопросов для выявления мотивации поступающего рискнём предложить, к примеру, следующие:

- Какие свои качества Вы считаете перспективными для самостоятельных занятий физико-математическими науками, а какие, напротив, – препятствующими, и почему именно так Вы считаете? Проиллюстрируйте на примерах из автобиографии.
- Приведите 3-5 доводов в пользу того, что и Вы, и физико-математические науки «будут в выигрыше», если вы поступите в магистратуру.
- Представьте, что Вам дают миллион рублей (долларов) с условием, что Вы израсходуете деньги в течение нескольких лет на благо физико-математических наук. Составьте приблизительную программу (направления) ваших расходов с обоснованием трат и ожидаемых результатов.

## ОПЫТ ПРИЁМНОЙ КАМПАНИИ

Приведем итоги одной приёмной кампании в магистратуру. Форма испытания была комбинированной, т.е. абитуриенты должны были письменно ответить на два вопроса по программе общего курса физики (с последующим «докладом» экзаменаторам) и устно обрисовать свои образовательно-научные интересы.

Немаловажной особенностью при выполнении задания было то, что поступающему предоставлялась возможность *заблаговременно* выбрать вопросы для письменного ответа и собеседования *по своему усмотрению*. И в результате произошло психологически естественное (?!) «расслоение» студентов на два «лагеря», что, собственно, и позволило качественно чётко представить, «кто есть кто», с точки зрения перспектив обучения в магистратуре.

Одни студенты восприняли предоставленную самостоятельность при выборе вопроса предельно упрощённо – как возможность не затруднять себя дополнительными занятиями. Они остановились на вопросах, происхождение которых известно им ещё из школьных учебников с математическим аппаратом школьной же (!) степени сложности. Изложение было «незатейливым», на невысоком учебном уровне, с «непереваренными» подсказками из Интернета.

Студенты второй группы, с более серьёзным пониманием ситуации и своего будущего, смекнули, что в условиях конкурса нужно постараться представить себя уже на ином, университетском, уровне и выбрали для собеседования более «солидные» вопросы, требующие знания бакалаврского курса общей физики. Правда, и внутри этой группы произошло своё разделение: одна часть использовала преимущественно вербальные средства описания физического явления, а вторая – привлекала и соответствующий математический инструментарий.

Получилось, что уже сам подход к выбору содержания и метода решения испытательного задания стал одним из объективных критериев оценки эпистемического и мотивационного компонентов подготовленности претендента для обучения в магистратуре. С этой ситуацией можно соотнести слова современного философа Ф. И. Гиренка: *«Поступать – означает самого себя класть в основание цепочки причин и следствий»*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перефразируем главную цель вступительных испытаний в магистратуру в «терминах» французского учёного и философа Блеза Паскаля (1623–1662): это подбор достойных «растений» для «плантации» «мыслящего тростника». Метафора «мыслящий тростник» («roseau pensant»), отнесенный к человеку и отражающий одновременно его физическую «хрупкость» и умственную силу (превосходство) по отношению к Вселенной, является одним из наиболее известных и обсуждаемых (в том числе, в плане перевода) утверждений Б. Паскаля, сделанных им в собрании идей «Мысли» (опубликовано в 1670 г.). Метафорами «плантация» и «растение» авторы осмеливаются распространить определение Паскаля на «питомцев» современной российской магистратуры научно-исследовательского профиля, которые прежде всего и должны развивать в себе способность творчески мыслить.

## ИМПУЛЬСЫ АБРАГАМА И МИНКОВСКОГО В ВОЛНЕ БРЮСТЕРА

*Цой В.И.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

При падении поляризованной электромагнитной волны на диэлектрик без отражения, под углом Брюстера, нормальная к границе компонента импульса сохраняется в диэлектрике как полевой импульс по Абрагаму, а касательная компонента сохраняется как импульс по Минковскому. В этом случае сохранение импульса в веществе рационально описывать с помощью импульсов Абрагама и Минковского совместно.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема описания сил и импульсов в среде с электромагнитным полем является одной из трудных и постоянно дискутируемых общих проблем электродинамики и оптики [1-12]. Эти дискуссии важны также для понимания прикладных задач, в частности, в связи с оптическими силами – давлением при отражении или поглощении волны, а также силой Абрагама на прозрачную среду [11].

В балансе импульсов поля с напряженностями  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ , электрического и магнитного поля в среде с электрической и магнитной проницаемостями  $\varepsilon$ ,  $\mu$  следует учитывать действующую на среду силу Абрагама с плотностью [1,5,6]

$$\mathbf{f}^A = (\partial / \partial t)((\epsilon\mu - 1) / 4\pi c)(\mathbf{E} \times \mathbf{H}). \quad (1)$$

Есть разные трактовки импульса, соответствующего этой силе, или как чисто механического импульса, отдельно от полевого импульса с плотностью  $\mathbf{g}^A = (1/4\pi c)(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$  по Абрагаму, или как неотъемлемой части электромагнитного импульса с плотностью  $\mathbf{g}^M = (\epsilon\mu / 4\pi c)(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$  по Минковскому [5-11]. Первоначально вопрос ставился о том, какая из этих трактовок ошибочна. Электромагнитный импульс Минковского не требует явного введения дополнительных пондеромоторных сил в среде, однако соответствующий тензор энергии-импульса не симметричен, что противоречит закону сохранения момента импульса. Тензор энергии-импульса Абрагама симметричен, однако его использование должно сопровождаться отдельным учетом силы Абрагама [1,5,6]. Было показано, что последовательное применение каждого из подходов приводят к одним и тем же правильным результатам [5,6,7]. При этом подход Абрагама считается многими авторами физически более ясным и оправданным. С другой стороны, импульсу фотона в среде по формуле деБройля  $\mathbf{p}_{phot} = \hbar \mathbf{k}_0 \sqrt{\epsilon\mu}$  соответствует импульс по Минковскому [6,8,11].

В последнее время в англоязычной литературе утверждается точка зрения, согласно которой оба импульса  $\mathbf{g}^A$  и  $\mathbf{g}^M$  правильны, только соответствуют разным способам разделения сохраняющегося полного импульса системы поле-вещество на «кинетические» импульсы или «канонические» импульсы [11,12]:

$$\mathbf{p}_{total} = \mathbf{p}_{kin} + \mathbf{p}^{Abr} = \mathbf{p}_{can} + \mathbf{p}^{Min}.$$

При этом под кинетическим импульсом по существу понимается импульс, определяемый согласно классическому описанию частицы, тогда как под каноническим импульсом подразумевается волновой квазиимпульс частицы. Высказывалось мнение, что описания импульсов этими двумя способами несовместимы [8].

В данной работе приведен пример, в котором сохранение импульса рационально описывать импульсом Абрагама и импульсом Минковского одновременно.

### ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА В ВОЛНЕ БРЮСТЕРА

Рассмотрим перенос импульса излучения в среду монохроматической волной, которая поляризована в плоскости падения и проникает из вакуума в среду без отражения при падении под углом Брюстера  $\varphi = \arctan(\sqrt{\epsilon\mu}) = \arctan(n)$  в системе отсчета, связанной со средой. Угол преломления  $\psi$  и скорость волны в среде  $v$  определяются законом преломления

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{\cos \psi}{\cos \varphi} = n = \frac{c}{v}. \quad (2)$$

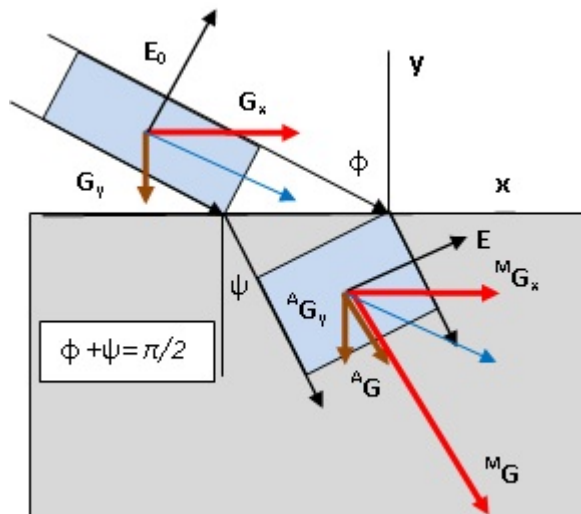


Рис.1. Импульсы Абрагама и Минковского в волне Брюстера



Пусть плоскостью падения является плоскость  $xu$ , а внешней нормалью к поверхности диэлектрика  $xz$  служит ось  $y$ . Падающая волна распространяется по лучевому вектору  $\mathbf{i}_\varphi = \mathbf{i}_x \sin \varphi - \mathbf{i}_y \cos \varphi$ , преломленная волна направлена по лучу  $\mathbf{i}_\psi = \mathbf{i}_x \sin \psi - \mathbf{i}_y \cos \psi$  (рисунок 1). Отраженная волна, в соответствии с формулами Френеля, отсутствует.

Обозначим напряженности электрического и магнитного поля в падающей из вакуума волне как  $\mathbf{E}_0 = E_{0x}\mathbf{i}_x + E_{0y}\mathbf{i}_y$ ,  $\mathbf{H}_0 = H_{0x}\mathbf{i}_z$ ,  $H_0 = E_0$ . Плотность энергии, плотность потока энергии и плотность импульса удобно выразить только через магнитное поле, соответственно, формулами

$$w_0 = \frac{E_0^2 + H_0^2}{8\pi} = \frac{H_0^2}{4\pi}, \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_0 = \frac{c}{4\pi} E_0 H_0 \mathbf{i}_\varphi = \frac{c}{4\pi} H_0^2 \mathbf{i}_\varphi \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_0 = \frac{\mathbf{S}_0}{c^2} = \frac{1}{4\pi c} H_0^2 \mathbf{i}_\varphi = g_0 \mathbf{i}_\varphi. \quad (5)$$

Вследствие непрерывности тангенциальных составляющих напряженностей поля на поверхности диэлектрика для напряженностей преломленной волны справедливы соотношения

$$H_z = H_0, \quad E_x = H_0 \cos \varphi, \quad E = E_x / \cos \psi = H_0 / \sqrt{\varepsilon \mu}. \quad (6)$$

Поэтому плотность энергии, плотность потока энергии, плотность импульса  $\mathbf{g}^A$  по Абрагаму и плотность импульса  $\mathbf{g}^M$  по Минковскому в волне Брюстера в немагнитном диэлектрике с проницаемостью  $\mu = 1$ , в предположении малой дисперсии, определяются формулами

$$w = \frac{\varepsilon E^2 + \mu H^2}{8\pi} = \frac{H_0^2}{4\pi}, \quad (7)$$

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} E H \mathbf{i}_\psi = \frac{c}{4\pi n} H_0^2 \mathbf{i}_\psi, \quad (8)$$

$$\mathbf{g}^A = \frac{\mathbf{S}}{c^2} = \frac{g_0}{n} \mathbf{i}_\psi, \quad (9)$$

$$\mathbf{g}^M = \frac{\mathbf{S}}{v^2} = n^2 \mathbf{g}^A = g_0 n \mathbf{i}_\psi. \quad (10)$$

Соотношения (7), (8) согласуются с тем, что волна в диэлектрике распространяется со скоростью  $c/n$ . Выражения (4), (8) согласуются с тем, что нормальная к поверхности плотность потока энергии  $\mathbf{S}_0 \cdot \mathbf{i}_y = \mathbf{S} \cdot \mathbf{i}_y$  непрерывна. Кроме того, в волне Брюстера плотности энергии (3),(8) по обе стороны границы принимают равные значения. Это означает равенство нормальной к поверхности скорости переноса энергии ( $c \cos \varphi$ ) вне и внутри диэлектрика. Однако известно, что перенос электромагнитного импульса в среду допускает неоднозначное описание по Абрагаму (9) и по Минковскому (10) [5-12].

### ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА В ВОЛНЕ БРЮСТЕРА

Проследим за импульсом, переносимым волновым пакетом с границами, определяемыми передним и задним волновыми фронтами. Такой волновой пакет, после вхождения в среду, уменьшается по длине вдоль луча за счет уменьшения скорости волнового распространения в  $n$  раз, но увеличивается по ширине волнового фронта в  $n$  раз за счет преломления на границе среды. Поэтому объем пакета  $V$ , несущий определенную энергию в падающей волне Брюстера, не меняется после преломления. При этом нормальная составляющая импульса пакета сохраняется после преломления без отражения в виде импульса Абрагама:

$$G_{0y} = -(g_0 \cos \varphi)V = -((g_0/n) \cos \psi)V = -(g^A \cos \psi)V = G_y^A, \quad (11)$$

то есть плотность нормального к границе импульса волны Брюстера в диэлектрике является плотностью по Абрагаму:

$$g^{(n)} = -(g^A \cos \psi) = g_y^A. \quad (12)$$

Тангенциальная компонента импульса пакета сохраняется в виде импульса по Минковскому:

$$G_{0x} = (g_0 \sin \varphi)V = (g_0 n \sin \psi)V = (g^M \sin \psi)V = G_x^M. \quad (13)$$

Следует заметить, что полная сила Абрагама (1) придает среде механический импульс  $G_m = (n^2 - 1)g^A V$ , направленный по преломленному лучу. В соответствии с этим тангенциальный и нормальный к границе полевые импульсы должны приниматься либо как составляющие импульса по Абрагаму

$$G'_{fx} = G_x^M - G_{mx} = g_x^M V - (n^2 - 1)g_x^A V = g_x^A V, \quad G'_{fy} = g_y^A V, \quad (14)$$

либо как составляющие импульса по Минковскому

$$G''_{fx} = g_x^M V, \quad G''_{fy} = G_y^A + (n^2 - 1)g_x^A V = g_y^M V. \quad (15)$$

Однако в обоих случаях (14) или (15) сохраняющимися компонентами импульса волнового пакета, проходящего без отражения в среду под углом Брюстера, являются нормальная компонента по Абрагаму и тангенциальная компонента по Минковскому.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный пример показывает, что описания электромагнитных импульсов по Абрагаму и по Минковскому скорее дополняют, чем исключают друг друга. Заметим, что предполагаемая в формулах Френеля для волновых амплитуд неподвижность границы раздела сред предполагает бесконечно большую массу среды и отсутствие передачи ей кинетической энергии, но возможность передачи импульса. Суммарный импульс отраженной волны, преломленной волны и среды должен быть равен импульсу падающей волны. Поскольку импульс волны в среде и импульс силы Абрагама направлены по преломленному лучу, а полный импульс направлен по падающему лучу, уже в частном случае преломления без отражения должен возникать дополнительно механический импульс, кроме импульса силы Абрагама. Возможно, что этот дополнительный импульс связан с запаасаемым механическим скрытым импульсом в среде [13], по аналогии со скрытым импульсом в источниках постоянного поля [4,11].

## Литература

1. Ландау Д.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред - М.: Наука, 1982.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества - М: Наука,1989.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество - М: Мир, 1966.
4. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics, 3rd ed - Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999. 596 p.
5. Скобельцын Д.В. //УФН. 1973. Т. 110, с 253-292.
6. Гинзбург В.Л. // УФН. 1973. Т. 110, с. 309-319.
7. Гинзбург В.Л., Угаров В.А. // УФН. 1976. Т. 118, С.175-188.
8. Веселаго В.Г. // УФН. 2009. Т. 179, С.689-694 .
9. Макаров В.П., Рухадзе А.А. УФН. 2009, Т.179, С. 995-1001.
10. Давидович М. В. // УФН. 2010, Т. 180, С. 623-638.
11. Griffiths D.J. // Am.J.Phys. 2012. V. 80, P.7-18.
12. Barnett S.M. // Phys.Rev.Lett. 2010. V. 104, P.070401.
13. Цой В.И. / Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2014. Саратов: Новый Ветер, 2014, С.164-170.

## УСЛОВИЕ АХРОМАТИЧНОСТИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

*Симоненко Г. В.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

На основе анализа цветовых характеристик различных ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности черно-белого изображения. Для адекватного описания оптических свойств ЖК модулятора предложен необходимый набор трех характеристик: средний по спектру контраст модулятора; среднее по спектру пропускание модулятора для состояния «открыто»; ахроматичность модулятора для состояния «открыто».

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство мониторов используют жидкокристаллическую (ЖК) панель, работающую на основе электрооптического твист – эффекта с углом закрутки структуры  $90^0$  [1 - 4]. Преимущество этой жидкокристаллической технологии состоит в том, что ее стоимость невелика, а электрооптические характеристики ЖК устройств имеют высокие показатели. Поэтому подобные ЖК дисплеи сегодня являются самыми популярными. Заметим, что панели на твист – эффекте главным образом широко используются на рынке настольных дисплеев с размерами экрана от 15 до 28 дюймов [2]. В задачи исследования входило определение минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК устройства для адекватного описания его оптических свойств. Для решения поставленных задач нами был применен метод компьютерного моделирования, который, в силу сложности натурального эксперимента в технике ЖК устройств отображения информации, является стандартным средством для этих целей [5, 6].

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖК УСТРОЙСТВА

### 1. Стандартные оптические характеристики.

Для адекватного описания характеристик ЖК устройства отображения или обработки информации с целью выбора оптимальной его конструкции обычно используется следующий набор оптических характеристик [5 - 7]:

- среднее по спектру или для определенных длин волн пропускание (отражение) ЖК устройства в состоянии «включено» или «выключено»;
- координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения для состояний «включено» или «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения или контраст для определенных длин волн;
- индикатриса среднего или на определенной длине волны контраста изображения.

Обычно [7] ЖК устройство характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний:

1. «выключено» - управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового;
2. «включено» - на затвор подано напряжение выше порогового значения.

Между этими двумя состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. В этом случае среднее по спектру пропускание устройства  $T_{off}$  для состояния «выключено» («включено»  $T_{on}$ ) определим следующим образом [5, 6]:

$$T_{off} = \frac{\int_{400}^{800} T_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad T_{on} = \frac{\int_{400}^{800} T_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad (1)$$

где  $T_{off(on)\lambda}$  - пропускание устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны  $\lambda$ ;  $I_{\lambda}$  - спектральное распределение источника излучения  $D_{65}$  (или какого – либо другого источника излучения);  $K_{\lambda}$  - спектральная чувствительность глаза.

Тогда средний по спектру контраст изображения  $C$  вычисляется [5, 6]:

$$C = \frac{T_{off}}{T_{on}}. \quad (2)$$

Координаты цвета  $(x, y)$  определяются с помощью известных выражений [8]:

$$x = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad y = \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, \quad (3)$$

$$G = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{z}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda,$$

где  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  - кривые смешения трех основных цветов в цветовой системе координат  $(x, y, z)$ .

Индикатриса контраста – зависимость контраста изображения от угла падения  $\varphi$  и азимута  $\zeta$  плоскости падения света. При этом азимут плоскости падения света обычно отсчитывается от

направления ориентации молекул ЖК на фронтальной поверхности ЖК ячейки по часовой стрелке. Часто для характеристики угловой зависимости контраста вводят понятие угла обзора устройства  $\Psi$ . В нашем случае углом обзора ЖК устройства называется угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле падения света, для которых контраст изображения  $C$  не ниже определенного уровня [6].

### 2. Ахроматичность.

Как правило, для характеристики цвета устройства применяются спектры пропускания и вычисленные на их основе цветовые координаты. Однако такой набор усложняет анализ влияния различных конструктивных параметров на оптические характеристики устройства. Известно, что для получения полноцветного изображения необходимо, чтобы во всем видимом диапазоне устройство имело одинаковый контраст. Поэтому нами предлагается поход к анализу цветовых характеристик устройства, основанный на понятии ахроматичности.

Обычно под ахроматичностью понимается отсутствие цвета у исследуемого объекта [9]; иными словами ахроматичность соответствует цветовой разности между точкой белого цвета на цветовом треугольнике и точкой цвета данного объекта. Поэтому под ахроматичностью  $H$  мы будем понимать расстояние текущей цветовой точки устройства на цветовом треугольнике от точки белого цвета, например, источника  $D_{65}$ , то есть

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}, \quad (4)$$

где  $(x, y)$  – координаты цвета устройства,  $(x_{65}, y_{65})$  – координаты источника  $D_{65}$ .

Источник  $D_{65}$  нами выбран из-за того, что его спектр излучения соответствует спектру естественного солнечного света. В качестве источника излучения может быть выбран любой другой источник, тогда для определения ахроматичности необходимо использовать цветовые координаты соответствующего источника оптического излучения. Теперь определим условие, при выполнении которого устройство можно будет считать ахроматичным. На рис. 1 показан цветовой треугольник в системе МКО XYZ 1931 (рисунок взят из работы [10]). Построим около точки  $D_{65}$  окружность такого радиуса, чтобы она вся целиком оставалась в области белого цвета W (на рисунке область Ah). Тогда все точки, которые находятся внутри этой окружности, будут считаться белыми (т.е. ахроматичными). Из этого рисунка видно, что условием ахроматичности является

$$H \leq 0,05. \quad (5)$$

Поясним на примере смысл введения условия (5) для ахроматичности  $H$ . В таблице 1 показаны оптические характеристики (средние по спектру пропускание в состоянии «выключено» ( $T_{off}$ ) и контраст  $C$ , а также контрасты для определенных длин волн, координаты цветы для состояния «выключено») для ЖК устройства, использующего различные электрооптические эффекты и имеющие сравнимые оптические характеристики. Наша цель - выбрать устройство, которое имеет одинаковую глубину модуляции во всем видимом диапазоне. Обычно для этой цели используется весь набор оптических характеристик ЖК затвора, перечисленный выше. Однако если ввести в рассмотрение понятие ахроматичности с соотношением (5), то достаточно ограничиться только сравнением значений среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» (или включено), среднего по спектру контраста и ахроматичности устройства для состояния «выключено» (или «включено»). В данном примере должно быть выбрано устройство с оптическими характеристиками, представленными во второй строке таблицы 1, так как значение ахроматичности для него существенно ниже и удовлетворяет соотношению (5).

### 3. Необходимый набор характеристик.

Исходя из вышеизложенного, для анализа цветовых характеристик чёрно-белого устройства (или полноцветного) нами предлагается использовать понятие ахроматичности совместно с соотношением (5). Отметим, что состояние устройства «выключено» или «включено», для которого вычисляются перечисленные выше характеристики, определяется тем, пропускает свет в этом состоянии устройство или нет. Для большинства ЖК устройств состояние «выключено» соответствует максимальному пропусканию, и контраст изображения в этом случае положительный.

Исходя из этого, для анализа чёрно-белого ЖК устройства нами предлагается использовать следующий набор оптических характеристик:

- среднее по спектру пропускание ЖК устройства в состоянии «выключено»;
- средний по спектру контраст изображения;
- ахроматичность устройства в состоянии «выключено» совместно с соотношением (5).

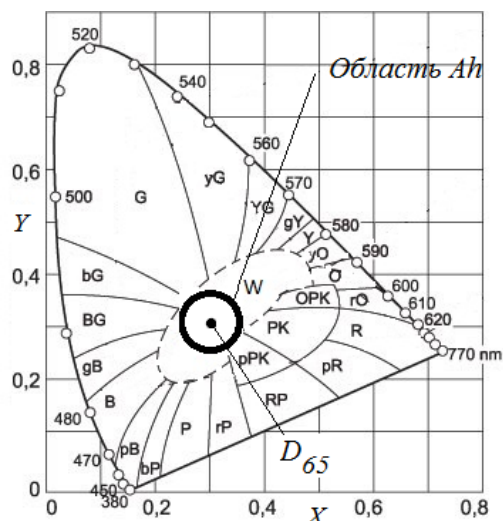


Рис. 1. Цветовой треугольник и понятие ахроматичности.

Таблица 1. Оптические характеристики ЖК – затвора.

$T_{off}$	$C$	$x$	$y$	$C(\lambda=450 \text{ нм})$	$C(\lambda=550 \text{ нм})$	$C(\lambda=460 \text{ нм})$	$H$
0.35	303	0.36	0.38	91	307	127	0.058
$T_{off}$	$C$	$x$	$y$	$C(\lambda=450 \text{ нм})$	$C(\lambda=550 \text{ нм})$	$C(\lambda=650 \text{ нм})$	$H$
0.38	371	0.34	0.35	132	371	137	0.023

Отметим, что соотношение (5) для ахроматичности введено только для цветовой системы координат XYZ МКО 1931, для других цветковых систем это условие должно быть изменено.

## Выводы

На основе анализа цветковых характеристик ЖК устройств отображения информации введен критерий для оценки ахроматичности  $H$  черно-белого изображения. Для различных конструкций ЖК устройств модуляции света предложен необходимый набор его оптических характеристик: среднее по спектру пропускание ЖК модулятора в состоянии «открыто»; средний по спектру контраст изображения; ахроматичность модулятора в состоянии «открыто» совместно с соотношением  $H \leq 0,05$ .

## Литература

1. TN Panel Information <http://www.tnpanel.com/>
2. Simon Baker, Panel Technologies updated 17 March 2015 [http://www.tftcentral.co.uk/articles/panel\\_technologies.htm](http://www.tftcentral.co.uk/articles/panel_technologies.htm)
3. Пахомов С. // *КомпьютерПресс 2004, № 12*, <http://compress.ru/article.aspx?id=12688>.
4. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/>.
5. Yakovlev D.A., Chigrinov V.G., Kwok Hoi-Sing Modeling and optimization of LCD optical performance - Chichester: John Wiley & Sons, Ltd 2015.
6. Simonenko G.V. // *Jour. Optical Technology 2014, Vol. 81, № 10, p. 594 – 598.*
7. Сухариев А.С. Жидкокристаллические индикаторы - М.: Радио и связь, 1991.
8. Шашлов А.Б., Уварова Р.М., Чуркин А.В. Основы светотехники: Учебник для вузов - М.: Из – во МГУП, 2002.
9. Артюшин Л. Ф. Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии - М. : Искусство, 1970.
10. Буданова А. // *Полупроводниковая светотехника 2010, №3, с. 32 – 35.*

## ОБРАТНАЯ КАМЕРА-ОБСКУРА

Усольцева Ю.В.

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

Описана методика выполнения экспериментального наблюдения оптических явлений в условиях геометрической оптики.

Оптика самая красивая из всех физик! Просты и понятны её законы. И всё, что видно, видно по прямой, и световой луч – то же, что свет очей, учил великий Евклид. С тех же пор мы знаем, что глаза – зеркало души, знаем миф о Нарциссе. Зеркало есть простейший оптический прибор, и в нём нет никаких тайн! Но вот статья одного американского журнала была озаглавлена несколько неожиданно: «Why does a square mirror reflect a round spot of light?» //Phys Teach., 1978, №12. А если же зеркало будет иметь более характерную форму?

Лет триста назад немецкий астроном Иоганн Кеплер готовился наблюдать солнечное затмение и для ослабления света и сохранения картинки воспользоваться большой камерой-обскурой. Пропустив солнечный свет в помещение через небольшое отверстие, он увидел на дальней стене пятно света, по форме похожее не на отверстие, а на само Солнце. Кеплеру удалось увидеть не только фазы затмения, но даже пятна на солнечном диске [1]. В небольшом отверстии при гораздо большем расстоянии до экрана (предмет и так далеко) укладывается очень малое число зон Френеля, потому оно работает как линза. Камера-обскура высокой резкости изображения не обеспечивает. Резкость изображения (картина, которая получается в результате прохождения через оптическую систему световых лучей, отраженных от объекта или излученных им) можно повышать, уменьшая диаметр отверстия, но при слишком сильном уменьшении начинают сказываться эффекты дифракции, и изображение становится ещё более расплывчатым [2].

Малое зеркало в определенном смысле ничем принципиально не отличается от малого отверстия, только лучи света будут отражаться от блестящего кусочка, а не проходить через дырочку. Интересно, а если поиграть, как в детстве с солнечным зайчиком, что увидим? Первая мысль настолько проста, что и проверять не хочется: конечно, зайчик будет с ушками, если ушки есть у зеркала. А если зеркало обычное прямоугольное, то и зайчик получим такой же формы.

Итак, для проведения эксперимента понадобились зеркала различной формы и солнце (рис. 1, 2, 3).

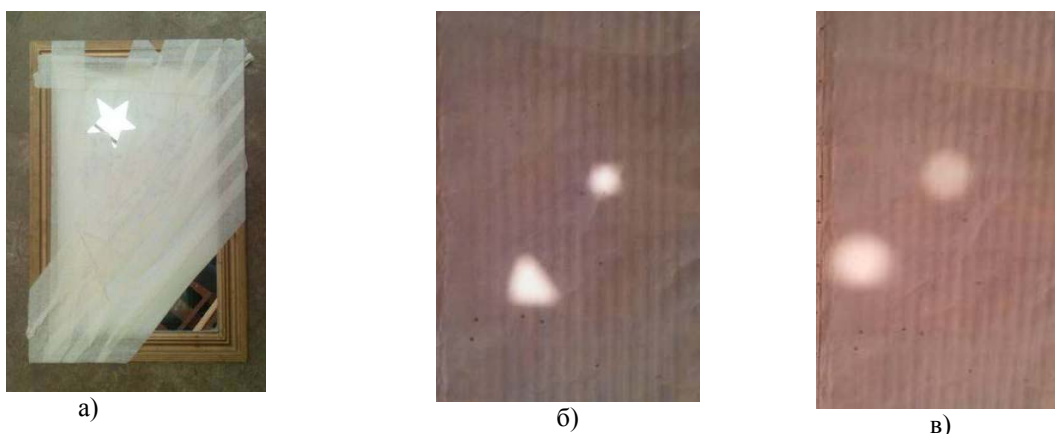


Рис. 1. Эксперимент №1. а) используемое зеркало; б) зеркало приближено к экрану; в) зеркало удалено от экрана

Зайчик солнечный и в самом деле повторяет форму зеркала, но только на близкой к зеркалу ровной поверхности. И, как это ни удивительно, вид солнечного зайчика меняется при удалении экрана от зеркала. Уже на расстоянии 5-6 метров практически любой осколок зеркала создаёт замечательного круглого зайца. Почему же на расстоянии зайчик круглый? Этого расстояния хватает

для того, чтобы солнце «поместилось» в зеркальце. Проведя небольшие математические расчеты, легко определить угловой размер Солнца [3], равный 0,01 рад. Зеркало отражает лучи Солнца на экран под меньшим угловым размером и заяц становится круглым. Чем зеркало дальше, тем крупнее изображение Солнца на бумаге, и тем ближе оно к правильному кругу.

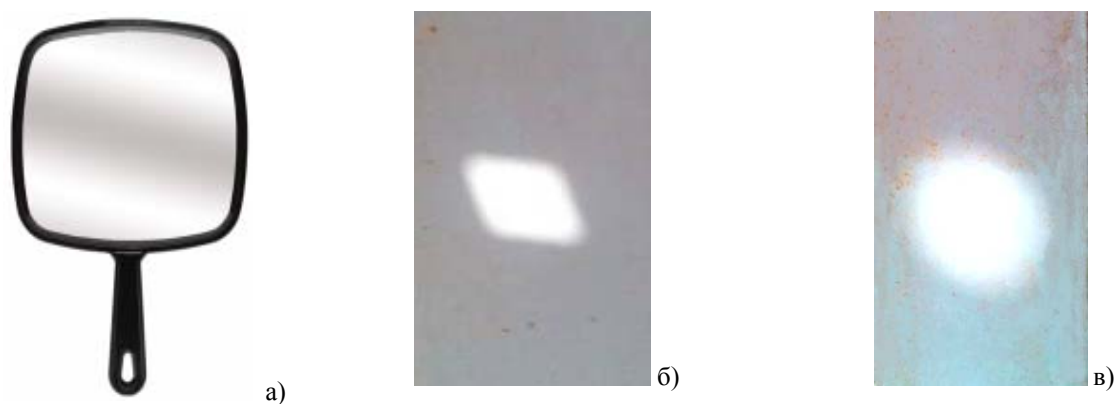


Рис. 2. Эксперимент №2: а) используемое зеркало; б) зеркало приближено к экрану; в) зеркало удалено от экрана

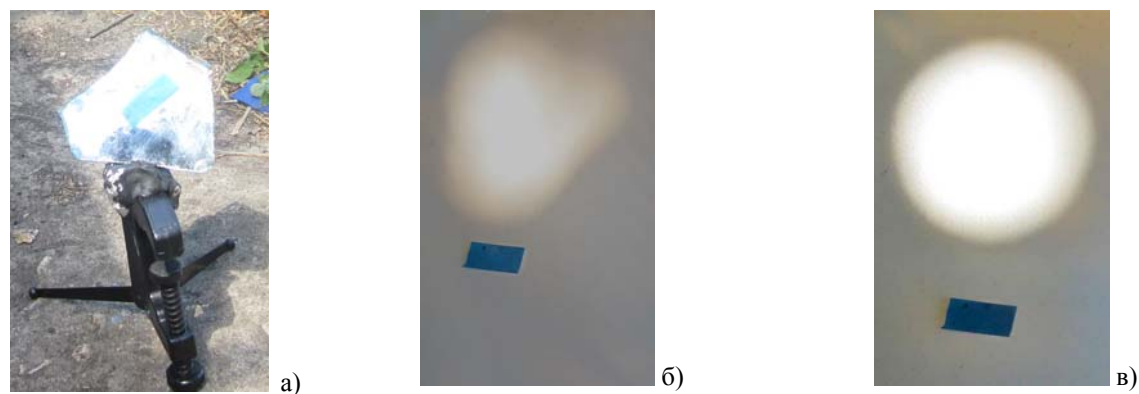


Рис. 3. Эксперимент №3. а) Используемое зеркало; б) Зеркало приближено к экрану; в) Зеркало удалено от экрана

Эксперимент по получению круглого пятна удалось повторить и в гораздо меньших масштабах. В качестве осветителя использовался старый диапроектор «Этюд» и внешнее зеркальце, прикрытое миниатюрной звездочкой, прорезанной в фольге. На расстоянии 0,5-0,8 метров было видно круглое пятно, хотя вблизи получалась пятиконечная звезда!

За идею, советы и обсуждение благодарю Старшова Михаила Александровича. Спасибо за бесценный опыт и знания!

#### Литературы

1. Белый Ю.А. Иоганн Кеплер. 1571-1630 - М.: Наука, 1971.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики - М.: Наука, 1973.
3. Допаев М. М. Наблюдения звездного неба – М.: Наука, 1978.

## КРУГЛЫЙ СТОЛ: ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ И ХУДОЖЕСТВЕННОЙ КАРТИНЕ МИРА

*Медведев Б. А.*

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

В связи с годом Света и световых технологий, объявленным ЮНЕСКО, тезисами избранных докладов представлена работа круглого стола: «Человек и свет в естественнонаучной и

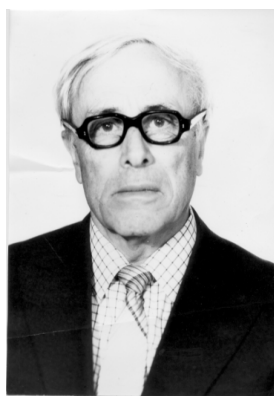
художественной картине мира» на секции по Истории, методологии и философии оптического образования XIX Международной школы для молодых ученых и студентов по оптике, лазерной физике и биофотонике, прошедшей в Саратовском государственном университете 22 – 25 сентября 2015 года.

**Участники Круглого стола:**

Заведующий кафедрой геометрии СГУ, профессор, д.ф.-м.н. Розен Виктор Владимирович;  
 Заведующий кафедрой философии и методологии науки СГУ профессор, д.ф.н. Позднева Светлана Павловна;  
 Профессор кафедры философии СГТУ, д.ф.н. Дуплинская Юлия Михайловна;  
 Профессор кафедры «Математика и моделирование» СГТУ д.ф.-м.н. Паршков Олег Михайлович  
 Профессор кафедры физики полупроводников СГУ, д.ф.-м.н. Роках Александр Григорьевич;  
 Заведующий кафедрой теоретической физики СГУ, профессор д.ф.-м.н. Бабков Лев Михайлович  
 Доцент кафедры общей физики, СГУ, к.ф.-м.н. Медведев Борис Абрамович  
 Профессор кафедры философии и методологии науки СГУ, д.ф.н. Маслов Роман Владимирович  
 Доцент кафедры философии СГТУ, к.ф.н. Довгаленко Наталья Владимировна  
 Доцент кафедры геометрии СГУ, к.ф.-м.н. Шимельфениг Олег Владимирович  
 Магистрант кафедры биофотоники СГУ Генин Вадим Дмитриевич  
 Декан Физического факультета СГУ, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов, профессор, д.ф.-м.н. Аникин Валерий Михайлович  
 Профессор кафедры морфологии и экологии животных СГУ д.б.н. Аникин Василий Викторович  
 Декан социально-гуманитарного факультета факультета СГТУ, заведующий кафедрой Физической культуры, здоровья, спорта, профессор, д.ф.н. Михель Дмитрий Викторович  
 Доцент кафедры философии СГТУ к.ф.н Михель Ирина Владимировна  
 Профессор кафедры философии культуры и культурологии СГУ д.ф.н. Белов Владимир Николаевич  
 Профессор кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета, д.ф.-м.н. Горохов Александр Викторович  
 Доцент кафедры биофотоники СГУ, к.ф.-м.н. Федосов Иван Владленович

**ВСПОМИНАЯ НАШИХ УЧИТЕЛЕЙ: ПРОФЕССОР МИХАИЛ АРКАДЬЕВИЧ КОВНЕР**

*Бабков Л. М.*



Михаил Аркадьевич Ковнер

28 декабря 2015 года исполняется 105 лет со дня рождения Михаила Аркадьевича Ковнера, доктора физико-математических наук, профессора кафедры теоретической и ядерной физики Саратовского госуниверситета. У его учеников, появился повод вновь вспомнить за круглым столом основные этапы деятельности своего учителя, отдавшего физическому факультету СГУ 37 лет (1945 – 1982 гг.). Их более подробное описание можно найти в [1].

М. А. Ковнер родился в Смоленске. В 1927 г. окончил среднюю школу, в 1930 году поступил на физфак МГУ. Учился у Л.И. Мандельштама, Г.С. Ландсберга, И.Е. Тамма, М.А. Леонтовича, Ю.Б.



Румера. Ю.Б. Румер - руководитель дипломной работы М.А. Ковнера. В 1934 г. М.А. Ковнер познакомился и начал сотрудничать с Г.Г. Гельманом. В 1935 году, по окончании МГУ, М.А. Ковнер стал ассистентом кафедры теоретической физики Воронежского госуниверситета. По предложению Г.Г. Гельмана он разработал тему о природе связи в молекуле аммиака [2] и в 1938 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1941 по 1945 г. М.А. Ковнер - доцент кафедры физики Ташкентского авиационного института, а в 1945 г. он становится доцентом кафедры теоретической физики Саратовского госуниверситета. С этого момента начался самый плодотворный период в его педагогической и научной работе. Его лекции по электродинамике, теории относительности, атомной и молекулярной спектроскопии и др. помнят поколения студентов. В 1957 году он защитил докторскую диссертацию «Расчет и интерпретация колебательных спектров бензола и его производных». С этого момента Саратов стал центром исследований колебательных спектров многоатомных молекул: результаты отражены в монографии [3,4], востребованной до сих пор. Появление первых лазеров стимулировало исследования по нелинейной оптике: результаты отражены в монографии [5]. М.А. Ковнер выпустил свыше ста дипломников и 30 аспирантов. С 1982 г. он - сотрудник Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова АН СССР (с 1992 г. - РАН), Москва. Основной итог работы за этот период - его книга [6].

#### Литература

1. Бабков Л.М. // Изв. Саратов. ун-та. Нов.сер. Сер. Физика 2010, Т. 10, № 2, с. 73-76.
2. Ковнер М.А. // ДАН СССР 1942, Т.35, №6, с.197-199.
3. Сverdlov L.M., Kovner M.A., Krainov E.P. Колебательные спектры многоатомных молекул - М.: Наука, 1970.
4. Sverdlov L.M., Kovner M.A., Krainov E.P. Vibrational Spectra of polyatomic molecules -New York; Toronto; Jerusalem; London: John Wiley & Sons, 1974.
5. Кац М.Л., Ковнер М.А., Сидоров Н.К. Оптические квантовые генераторы (лазеры) - Саратов: Изд. Саратов. ун-та, 1964.
6. Ковнер М.А. Ганс Густавович Гельман - М.: Наука. 2002.

## КОГЕРЕНТНОСТЬ В КЛАССИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ

*Горохов А. В.*

Хорошо известно, что понятие когерентности возникло более 200 лет тому назад в классической оптике при описании интерференции и дифракции световых волн. В настоящее время оно вышло далеко за рамки оптики и стало общезначимым.

Оказалось, что давно известные в классической физике интерференция и дифракция световых волн, волн на поверхности жидкости, а также предсказанные, а затем экспериментально открытые во второй половине XX века генерация лазерного излучения, сверхизлучение, сверхрассеяние и сжатие света, сверхтекучесть, сверхпроводимость и бозе-эйнштейновские конденсаты вещества имеют общие свойства и могут быть поняты с общих позиций. Для всех этих на первый взгляд совершенно разных явлений существует общее свойство, которое исследователи называют когерентностью (корреляцией, кооперативностью) излучения и вещества. Это поведение проявляется тогда, когда по некоторым причинам поведение большого коллектива частиц проявляет свойства не характерные для отдельной частицы.

После создания квантовой механики стало понятно, что когерентные свойства присущи не только излучению, но и веществу, связанные с суперпозицией квантовых состояний (волновых функций), подчиняющихся уравнению Шредингера. Наличие суперпозиции волновых функций позволило ввести понятие когерентности вещества, т.е. говорить, например, о возможности у системы пространственно разнесенных частиц обнаружить свойства, связанные с синхронизацией фаз волновых функций отдельных электронов, атомов или молекул. Поэтому когерентные свойства вещества имеют принципиально квантовый характер. Оказалось, что классическое описание когерентности, основанное на теории корреляционных функций, уже не достаточно. Возникла потребность в формулировке квантовой концепции когерентности, пригодной как для излучения, так и вещества. Её удалось развить на основе метода матрицы плотности. Диагональные элементы

матрицы плотности пропорциональны населенностям, а недиагональные элементы — корреляции между состояниями. Именно матрица плотности, дающая наиболее полное описание физической системы, дает основу для описания когерентных явлений и позволяет сформулировать квантовую меру когерентности. В результате, на основе принципов квантовой механики возникло и активно развивается новое направление исследований — теория когерентных и кооперативных явлений.

Важнейший вклад в формирование и развитие новых представлений о когерентности внесла лазерная физика. Для того, чтобы на основе квантовых принципов понять когерентные свойства лазерного излучения, Р. Глаубером в 1963 г. были введены осцилляторные когерентные состояния, которые с одной стороны позволили создать современную квантовую оптику, а с другой - стали основой очень полезного аппарата современной физики, позволившего применить в теории кооперативных явлений методы теории групп Ли и их представлений (Дж. Клаудер, А.М. Переломов и др.). Когерентные состояния — состояния максимально близкие к классическим, поскольку они соответствуют минимизации соотношений неопределенности Гейзенберга. Им соответствуют волновые пакеты в фазовом пространстве, временное поведение которых максимально близко классической картине описания. Метод когерентных состояний, разработанный вначале для нужд лазерной физики и квантовой оптики, был с успехом распространен и на другие разделы физики (сверхтекучесть и сверхпроводимость, диамагнетизм Ландау, динамику  $n$ -уровневых молекул во внешних классических полях). Они используются, также в квантовой теории поля для устранения инфракрасных расходимостей, в физике высоких энергий при описании спонтанного нарушения симметрии вакуума. В настоящее время когерентные состояния и метод матрицы плотности (квантовые управляющие уравнения) лежат в основе математического аппарата, разрабатываемых алгоритмов в квантовой информатике, что позволяет надеяться на коренные изменения в подходах к обработке информации и управления физическими процессами на микроуровне и открывает широчайшие прикладные возможности. Понятие когерентности становится уже не только общефизическим, но и представляется весьма плодотворным и для других наук, например, для биологии.

## ВОКРУГ ФОТОНА

*Паршков О. М.*

Преподавая физику или сталкиваясь с ней в силу профессиональных интересов в течение долгого времени, мы часто перестаём удивляться удивительному, заменяя его образ привычными стереотипами. Но удивительное нельзя спрятать. Оно снова и снова напоминает о себе. Недавно я натолкнулся на статью Клышко [1] и, заинтересовавшись, физическими, и философскими вопросами, прочитал ещё ряд статей, освещавшими подобные проблемы. В указанных статьях обсуждаются различные точки зрения на понятие фотона – объекта с удивительными свойствами. Здесь я не собираюсь обсуждать физику фотона. Я хочу высказать и по мере сил обосновать несколько крамольное соображение – единого мнения о том, что такое фотон и есть ли он вообще, научное сообщество не достигнет никогда.

Дело тут в особенностях человеческого мышления. Возможно, и несколько грубо, но можно разбить способы мышления физиков на два вида. Первый из них базируется на постулате копенгагенской школы, отрицающей целесообразность «заглядывания» за пределы экспериментальных фактов. Противоположный способ мышления я называю метафизическим. Его последователи считают, что за экспериментальными фактами скрывается некоторая истина, доступная человеческому разуму и не требующая подтверждения прямым экспериментом. Разумеется, конкретный индивидуум может не придерживаться строго одного способа мышления при обсуждении конкретного физического явления.

Я остановлюсь тут только на соображениях противников традиционного понимания фотона как объекта с корпускулярно-волновыми свойствами. Причём среди таких противников встречаются как представители копенгагенской школы, так и метафизики.

Авторы статьи [1], видный учёный, придерживающийся, по-видимому, копенгагенского образа мысли, считает, что фотон как физическая реальность не существует, а является лишь удобной аллегорией при описании взаимодействия излучения с веществом. В статье лауреата Нобелевской премии по физике У. Ю. Лэмба [2], написанной в традициях копенгагенского мироощущения, утверждается, что фотон не существует, и что только ряд ошибок и случайностей привели к его популярности среди физиков. А вот мнение Нурмухаметова В.К., представителя метафизического понимания физики. Взято из его работы «Фотон: физические аспекты и трактовка на уровне метафизической реальности». Автор работы полностью лишает фотон волновых свойств, заставляя фотон подчиняться рекомендациям некоего нефизического объекта – активного эфира. Хотя автор и использует термин «фотон», однако трактовка этого термина фатально не совпадает с традиционными представлениями об этом объекте.

Таким образом, мы видим, что серьёзные возражения против традиционной концепции фотона существуют как в стане физиков, мыслящих по копенгагенской схеме, так и в рядах метафизиков. Хочу отметить, что лично у меня метафизические воззрения не вызывают понимания. Однако следует учитывать все пути человеческого научного мышления, в том числе и метафизического содержания. Так можно ли примерить за конечное время столь различные мнения о фотоне? При ответе на данный вопрос следует уточнить понятие конечного времени. Под таким временем я понимаю время до появления новой общей теории вещества и излучения, в которой понятие о фотоне отойдёт на задний план, будет заменено другим понятием, вызывающим такой же интерес, как сейчас понятие фотона. На мой взгляд, ответ на вопрос такой: за конечное время проблема существования фотона решена не будет.

#### Литература

1. Клышко Д.Н. // УФН 1994, Т. 164, с.1187.
2. Lamb W.Y. // Jr. Appl. Phys. В 1995, Vol. 60, p. 77.

## ОГЮСТЕН ФРЕНЕЛЬ: СТАНОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ СВЕТА

*Позднева С.П., Маслов Р.В.*

У концепции двуединой природы света непростая судьба. Основную роль в ее появлении сыграл Жан Френель.

Френель, Огюстен Жан (AugustinJeanFresnel) – был одним из крупнейших физиков XIX века; он родился 10 мая 1788 г. в Нормандии в городе Брольи в семье архитектора. В 1804 г. Френель перевелся в политехническую школу в Париже. Из которой впоследствии ушел в школу путей сообщения. Когда он получил звание инженера, он более 8 лет занимался разной инженерной деятельностью в Вандее, Дроме и Иль-е-Вилене. Именно в это время появляются первые знаменитые работы Френеля по теории света, которые составили целую эпоху в истории физики вплоть до 1824 г. В 1823 г. Френеля избрали в члены Парижской академии наук, в 1825 г. членом лондонского королевского общества, которое в 1827 г. удостоило его высшей награды – медали Румфорда.

Молодой инженер, почти не сведущий в оптике, находясь в Каэне, увлекся исследованием дифракции света, имея лишь крайне примитивное экспериментальное оборудование. Два трактата, представленные им 15 октября 1815 г. на обсуждение Парижской Академии наук, стали первым результатом этого увлечения.

Френель изучал тени, которые отбрасывают небольшие препятствия на пути света, и обратил внимание на появление полос не только снаружи, но и внутри тени, что до него уже наблюдал Гримальди и о чем не упоминал Ньютон. Идея Френеля была следующей: колебания уменьшаются, когда «узлы разрежения» одного пучка лучей совпадают с «узлами уплотнения» другого пучка, и увеличиваются, когда оба колебания находятся «в гармонии».

В Париже в 1816 г. Френель проделал ...известный «опыт с двумя зеркалами», а затем в 1819 г. известный «опыт с бипризмой», ставший с тех пор классическим способом демонстрации принципа

интерференции.

Имея в распоряжении принцип интерференции, волновая теория имеет теперь в своем составе три принципа: принцип элементарных волн, принцип огибающей и принцип интерференции. Это были три отдельных принципа, которые Френель решил объединить вместе. Тем самым было преодолено препятствие, стоявшее в течение долгого времени на пути становления волновой теории – согласование прямолинейного распространения света с его волновым механизмом.

После нескольких лет перерыва в исследованиях Френель излагает свою теорию в обширном трактате о дифракции, представленном в 1818 г. на конкурс Парижской Академии наук. Этот трактат рассматривала комиссия, состоявшая из Лапласа, Био, Пуассона, Араго и Гей-Люссака. Комиссия попросила Френеля экспериментально доказать выводы из его теории, и Френель это с успехом продемонстрировал. После этого по единодушному предложению комиссии Академия наук присудила ему премию, а в 1823 г. он был избран ее членом. После обоснования теории дифракции Френель перешел к исследованию явления поляризации. В своем опыте с двумя зеркалами, расположенными под углом, Френель получил с помощью одного источника света два мнимых источника, всегда строго когерентных. Однако ему никак не удавалось добиться интерференции этих поляризованных лучей.

После того как в течение многих лет Френель пользовался языком теории продольных колебаний, в 1821 г. он, не найдя другого пути объяснения поляризационных явлений, предложил теорию поперечных колебаний. То, что эта гипотеза может объяснить основные свойства поляризованного света, было подробно доказано Френелем. Из поперечности колебаний следовало, что эфир, будучи тончайшим и невесомым флюидом, должен одновременно быть наитвердейшим телом, тверже стали, так как только твердые тела передают поперечные колебания. Эта гипотеза представлялась почти безумной. Друг, помощник и защитник Френеля Араго отказался подписать представленную Френелем статью.

Таким образом, с 1821 г. Френель продолжал свой путь в одиночку, и это был путь свершений. Гипотеза о поперечности колебаний позволила ему построить свою механическую модель света и в итоге выстроить грандиозное здание волновой оптики.

## «УМНЫЙ» ГЛАЗ СОВРЕМЕННОЙ ФОТОКАМЕРЫ

*Роках А.Г.*

Появление цифровых фотокамер изменило требование к параметрам экспонометра, встроенного в фотоаппарат. Отныне он уже не должен повторять свойства человеческого глаза. При этом остается требование, чтобы фотоизображение получалось таким, каким его видит человеческий глаз. Рассмотрим, о каких свойствах идет речь на примере характеристик встроенного экспонометра для аналоговых автоматизированных фотокамер, которые в просторечии называли «мыльницами».

К такому экспонометру предъявлялись два основных требования:

- 1) Спектральная чувствительность должна быть такой, как у человеческого глаза,
- 2) Световая чувствительность должна сублинейно следовать освещенности, опять-таки, как у глаза.

Такие экспонометры изготавливались на основе поликристаллических пленок твердых растворов сульфида и селенида кадмия. Эти вещества образуют между собой непрерывный ряд твердых растворов, что позволяет в зависимости от состава варьировать спектральную чувствительность в видимом диапазоне спектра, которая, как и глаз, должна иметь максимум при длине волны света 0,55 мкм. От строгого выдерживания вышеуказанных требований зависела цвето- и светопередача фотокамеры. Недаром экспонометры проходили военную приемку.

История появления в нашей стране пленочных экспонометров из сульфоселенида кадмия началась в 1964 году, когда в НИИ прикладной физики (г. Москва) было создано межведомственное совещание, которое должно было произвести ревизию имеющегося задела и определить, какое из

имеющихся предложений можно запустить в производство. Мы тогда были единственными в стране, кто обладал технологией фотопроводящих пленок типа сульфида кадмия, которые изготавливались сублимацией в вакууме. Но решили принять японскую технологию, как более простую и воспроизводимую и, к тому же, доведенную до промышленного внедрения. По этой технологии, пленки фотопроводника наносились методом пульверизации суспензии с последующим отжигом. А допуски по параметрам были столь строгими, что выход был около 1%.

В современной, цифровой, фотокамере вы не найдете такого экспонометра. Он стал лишним. Большие и сверхбольшие интегральные схемы, которые стоят в цифровых фотокамерах, позволяют получать необходимые характеристики путем пересчета световой и спектральной чувствительности кремниевых приемников фотоматрицы. Эти фотоприемники имеют максимум спектральной характеристики в ближней инфракрасной области спектра, и ближе по своим характеристикам к некоторым животным, а не человека. В нужной спектральной области (0,55 мкм) они тоже обладают чувствительностью. Поэтому электронный «мозг» фотокамеры может эту чувствительность пересчитать, вогнав в нужные пределы. То же самое происходит и со световой чувствительностью, которая учитывается в необходимых пределах. Таким образом, впервые за всю историю фотографии чувствительный элемент фотоэкспонометра не повторяет свойства человеческого глаза, а использует чувствительность кремниевой фотоприемной матрицы, которой оснащена современная фотокамера. Кроме того, с помощью матрицы выполняется еще одно свойство человеческого глаза – разрешающая способность, связанная с числом чувствительных элементов. По этому параметру матрица обогнала человеческий глаз, как и по быстродействию. Таким образом, по своим характеристикам современная фотокамера превосходит человеческий глаз. Ведь она может еще и запоминать изображение и воспроизводить его в нужном формате.

Поскольку глаз является передней частью мозга, а мозг – материальной основой интеллекта, то на примере фотокамеры можно сделать вывод, что искусственный интеллект обгоняет естественный, что он уже, впрочем, показал в шахматной игре.

## УЧЕНИЕ СВЯТИТЕЛЯ ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ О БОЖЕСТВЕННОМ СВЕТЕ

*Белов В.Н.*

Основное произведение святителя Григория Паламы «Триады в защиту священно-безмолвствующих» вполне можно было бы назвать и «Учение св. Григория Паламы о Божественном свете». Божественный свет является желанным результатом праведной жизни земного человека, является свидетельством стяжания им Божественной благодати, является синергией человеческого восхождения и Божественного нисхождения. Именно в стяжании земным человеком уже неземной благодати Святого Духа, Божественного света заключен весь смысл человеческой жизни, поскольку, как писал Вл. Соловьев в своих знаменитых «Трех разговорах», бессмыслен исторический процесс с его культурным прогрессом, если каждого отдельного человека ждет неминуемая смерть. Божественный свет в данной как раз и становится доказательством преодоления земной дихотомии жизни и смерти в уже неземной перспективе.

Поскольку святитель Григорий писал свои триады в защиту от философа Варлаама, то главной проблемой его рассуждений становится проблема познания, то есть проблемы знания, незнания, истины. Собственно св. Григорий берется разрешить острейшую проблему взаимоотношений знания и веры, Афин и Иерусалима, которая в разные периоды средневековья нашла различные варианты своего разрешения: верую, ибо абсурдно, познаю, чтобы веровать, верую, чтобы познавать. Для св. Григория Паламы оказывается важным прояснить, о какой вере и о каком знании идет речь. Поскольку соблазнов много и их выдумщик чрезвычайно изобретателен, у человека нет времени и возможности на подготовку или проверку того, что помимо знания или вместе с ним или после него следует настоящее познание Божественной премудрости. Поэтому изначально, предложив такие варианты взаимодействия веры и знания, мы попадаем в ловушку все-таки познавательных рассуждений, каковы имеют смысл только в чистоте сердца.

И вот чистота сердца, согласно св. Григорию, дает нам возможность преодолеть двух основных врагов одновременно и верующего, и познающего человека: гордыню и лицемерие. Именно так взаимосвязано: научную гордыню и верующее лицемерие. Ибо философское или ученое незнание Сократа и Николая Кузанского или отрицание познания верующим фанатиком – это вовсе не отказ от гордыни, но утверждение в лицемерии. Таким образом, св. Григорий неоднократно указывает на существование в самом стремлении к истине соблазна, уводящего человека от настоящего смысла Истины, как постижение блаженной жизни чистым сердцем, то есть сердцем, лишенным гордыни и лицемерия.

## СВЕТ И ТЬМА НА «УРОКЕ АНАТОМИИ» ОТ РЕМБРАНДТА

*Михель Д. В., Михель И. В.*

В 1632 г. по заказу амстердамской гильдии хирургов Рембрандт написал их групповой портрет, в котором представил прелектора гильдии доктора Николаса Тюльпа (1593-1674) и его коллег во время урока анатомии. Картина «Урок анатомии доктора Тюльпа» стала не только очередным изображением голландских хирургов, которое было помещено на стенах Весовой Палаты на Новом рынке Амстердама, но и новым словом в истории живописи. В отличие от многочисленных изображений других анатомических уроков, которые стали появляться еще в XIV в., в картине художника было предложено принципиально новое композиционное решение: герои сгруппированы в пирамиду, представлены в профиль и полуоборот. Обычно же герои подобных изображений располагались рядами, сидя вокруг трупа или полукругом, но всегда фронтально по отношению к зрителям картины.

Как и всегда у Рембрандта, важную смысловую роль играют не только сами герои, но и свет и тень. Художественная оптика у Рембрандта – это оптика качеств. Вся сцена разворачивается в мрачном помещении Весовой Палаты, в котором едва угадываются колонны и тяжелые каменные своды. Однако господствующий мрак пронизывает столп света, который четко выделяет всех главных действующих лиц. Этот свет – свет разума. Он полностью преображает всех героев «Урока». Лица Тюльпа и его коллег по гильдии не просто освещены светом, но преображены. Демонстрируя рассеченную скальпелем руку трупа, Тюльп в то же самое время священнодействует. Со времен Аристотеля, а позже Андрея Везалия познание руки человеческой – это познание разума, познание Бога.

Преображено светом высшего разума и мертвое тело, при жизни принадлежавшее известному грабителю и человеку без чести Арису Киндту, по прозвищу Малыш. За свои преступления он был повешен и в тот же день, по сложившейся традиции, труп его был передан для вскрытия хирургам. Случилось это 31 января 1632 г., в один из дней зимы, когда солнце лишь ненадолго появляется в небе. Труп Малыша выхвачен из мрака, и только верхняя часть его лица погружена в тень, которую отбрасывает на него один из участников урока – старшина гильдии Якоб де Витт.

Важной составляющей всякого анатомического урока в XVII в. была его нравственная сторона, которая проистекала из осознания всеми его участниками бренности человеческой жизни. Век барокко, в котором жил и творил Рембрандт, был временем торжества смерти, которую несли с собой непрекращающиеся эпидемии чумы, сифилиса и других болезней. Как и любой житель Амстердама, Рембрандт мог черпать нравственные воззрения на анатомию из книг французского доктора Андреаса Лаурентиса (1558-1609), *Operaanatomica* (1593) и *Historiaanatomica* (1600), которые были популярны в его время. Господство мрака и тлена мог преодолеть только высший свет разума, которому одному было подвластно сохранить человеческие жизни. Похоже, что Рембрандт Харменсван Рейн как прилежный последователь этой идеи не мог не напомнить об этом своим зрителям.

## ЧЕЛОВЕК И СВЕТ В КАРТИНЕ МИРА ЭПОХИ ИТАЛЬЯНСКОГО ВОЗРОЖДЕНИЯ

*Медведев Б.А.*

Феномен культурной памяти состоит в том, что мы ведем постоянный диалог с нашим прошлым, стремясь сохранить его в настоящем и будущем. Очевидно, речь идет о том прошлом, которое и в условиях глобального духовного кризиса помогает нам сохранять человечность, достоинство и мужество вместо пассивных апокалиптических ожиданий. К такому прошлому относится яркая эпоха Итальянского Возрождения (XIV – XVI века). Предшествующий период Проторенессанса (конец XIII примерно вплоть до первой трети XIV века) связывают с деятельностью и творчеством великих поэтов – Данте Алигьери и Франческо Петрарки. Словами А. Х. Горфункеля: «Созданный Данте в его «священной поэме» великий синтез поэзии, философии, теологии, науки является одновременно итогом развития средневековой культуры и подступом к новой культуре эпохи Возрождения». Франческо Петрарка, увенчанный в 1341 году в Риме лавровым венком, считается первым гуманистом наступающего Возрождения – эпохи возвращения великого культурного наследия Античности, духовного тяготения к учениям Пифагора, Платона, Аристотеля и ...неоплатоников.

Эпоха Возрождения. Флоренция... Картина мира, разработанная в «Новой философии природы» Франческо Патрици: Идея всеобщей одушевленности в природе. «Все, что движется, движется потому, что причастно жизни. Ф. Патрици в «Этикефилавии»: «...справедливо именовать любовь вечной связью и узами мира и его частей, недвижимой его опорой и прочным основанием всего мироздания». Платоновская академия Марсилио Фичино. Идея любви Марсилио Фичино, как эстетическое отражение совершенства космоса и его сохранения. «Картина» Бернардино Телезио: «Нет никаких сомнений, что благо, к достижению которого побуждается и стремится дух, заключается в самосохранении. И не только дух, но и все сущее не может желать и стремиться к иному благу; кроме как сохранению своей природы, и не может испытывать иного зла, кроме своей гибели». Томмазо Кампанелла: «Все вещи чувствуют. Все вещи обладают способностью к ощущению в такой мере, в какой это необходимо для их самосохранения... и все сущности испытывают всегда и повсюду любовь к себе самим». Джордано Бруно: «Сохранить себя... к этому одному стремятся все естественные вещи, каким бы неблагоприятным не было это стремление». У человека не возникло бы ценностного отношения к природе, если бы в ней самой не было принципов совершенства и одухотворенности. В противном случае, даже самое «адекватное» отражение Природы было бы лишь схемой, скелетом бездушного мира. Но то, что бездушно, неспособно к самосохранению. Потому гилозоизм Б. Телезио, А. Дони, Т. Кампанеллы, Ф. Патрици можно рассматривать как отражение мира в виде античного космоса: живого и нетленного, всечувствительного и одухотворенного.

Представим себе залы великих музеев эпохи Возрождения. И там, у входа слышатся строки Данте: «Искусство смертных следует природе,/ Как ученик ее, за пядью пядь;/ Оно есть божий внук, в известном роде»/. Художественная картина мира эпохи итальянского Возрождения представлена красотой мадонн Леонардо и Рафаэля, «Рождением Венеры» и «Весной» Боттичелли, «Сотворением мира» Микеланджело, «Витрувианским человеком» Леонардо да Винчи и светом «Афинской школы Рафаэля, как символом истины. В «Афинской школе» дух, разобщенный во времени объединен любовью к истине. Здесь величие мысли царит, но не подавляет. Здесь мысль свободна, но не беспризорна, здесь мысль мятежна, но бескорыстна. Здесь битва идей, но нет побежденных, здесь мир, но нет покоя. Здесь полёт фантазии, но приземлён вымысел здесь просветлённый взгляд, но печаль предвидения. Здесь раздумье, как роды, и мысль, как дитя...

Естественнонаучную картину мира можно представить научной прозой Леонардо да Винчи. Спектр его интересов поражает воображение: «О мощи математики и о количественном изучении явлений. О природе, жизни и смерти. О силе, движении, времени и бесконечном. О движении естественном и насильственном. О полете. О зрении, свете, тепле и солнце. О земле, луне и морских приливах. О звездах. О преодолении расстояний. О глазе. О распространении образов и о волнах.

Вода и жизнь земли. Прошлое земли. Море и облака. О строении человека и животных. О частях тела и их функциях. О растениях».

В Научной картине мира эпохи Итальянского Возрождения просматриваются фрагменты будущей естественно научной картины мира Нового времени. Физические идеи Леонардо, предшествовали созданию основ классической физики Галилеем и Ньютоном. Единство естественнонаучной и художественной картины мира в гармонии разума и чувства великих представителей эпохи Итальянского возрождения.

## ЗАМЕЧАНИЯ К ЭФФЕКТУ ЭПР, ЗАПУТАННЫМ СОСТОЯНИЯМ И ФИЛОСОФИИ ФИЗИКИ

*Париков О. М., Трухина А. А.*

В 1935 году Альбертом Эйнштейн вместе с Борисом Подольским и Натаном Розеном была опубликована статья «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?», в которой описывался мысленный эксперимент, названный впоследствии парадоксом Эйнштейна — Подольского — Розена (ЭПР). В этой знаменитой работе авторы отстаивали привычные для классической физики представления о сущности физической реальности. Несмотря на то, что сразу после опубликования этой работы Нильс Бор и ряд других приверженцев квантовой теории сформулировали свои контраргументы в поддержку квантовых представлений о реальности, спор не разрешён до сих пор. В процессе обсуждения эффекта ЭПР возникли представления о запутанных состояниях, описывающие квантовые объекты со специфическим видом «квантовой» памяти. Сражение вокруг эффекта ЭПР приобрело философский смысл не только для философии физики, но и для философии в целом. И это сражение продолжается до сих пор.

Блестящие результаты применения квантовой теории к практическим задачам на какое-то время отодвинуло эффект ЭПР на задний план. В учебниках по квантовой механике начала и середины XX века, по которым учились студенты этого века, вопросы, связанные с запутанными состояниями не обсуждались. И вот недавно вышла книга Л. Саскинд, А Фридман. Квантовая механика. Теоретический минимум. (В русском переводе –2015г, английское издание – 2014г). Книга предназначена для начинающих и представляет собой очень удачное, на наш взгляд, введение в квантовую теорию, достаточно строгое и лишённое «фантазийных» элементов, присутствующих у некоторых интерпретаторов квантовой механики. Две главы этой книги посвящены физике запутанных состояний. В современных монографиях и учебниках по квантовой механике более высокого уровня вопросам запутанных состояний и связанной с ними нелокальности квантовых явлений также стало уделяться значительно большее внимание.

Мы обсуждали содержание книги Л. Саскинда и А. Фридмана в рамках неформального студенческого семинара по квантовой механике при кафедре «Математика и моделирование». И возник следующий вопрос: не стоим ли мы на пороге кардинальных уточнений наших физических представлений. Не возродятся ли на новом уровне метафизические представления о действии на расстоянии? Попытки обоснования последних активно принимаются современными сторонниками метафизики, о чём мы говорили за круглым столом нашей секции в прошлом году. Ведь теории относительности не противоречит существование тахионов – частиц со сверхсветовой скорости. Более того, теория относительности постулирует, что процесс распространения тела или сигнала происходит непрерывно от точки к точке. А если убрать этот постулат, то появляются эффекты дальнего действия. Новые физические воззрения, на пороге открытия которых мы, возможно, находимся, должны удовлетворять следующим условиям – они должны включать в себя прежние теории как частые случаи и быть практически полезными. В этом философский смысл эволюции физических воззрений.



## СВЕТ, КАК ПРИРОДА СОЗНАНИЯ

*Шимельфениг О. В.*

Известный специалист по высоким энергиям Фритьоф Капра в своей книге «Дао физики», переведенной на многие языки, пишет: «Я долго изучал теоретическую физику и несколько лет занимался научными исследованиями. Одновременно с этим я занимался восточным мистицизмом и вскоре стал обнаруживать параллели между ним и современной физикой». В результате такого глубокого сравнительного анализа приходим к выводу, что наиболее глубоким символом мироздания является древнейший образ танцующего Шивы, как бесконечного потока энергии, принимающего бесчисленное множество форм, которые плавно переливаются друг в друга. Этот танец творения и разрушения представляет собой единственно возможную форму существования самого вещества, так как все материальные частицы самовзаимодействуют, испуская и поглощая виртуальные частицы.

*Такая парадигма утверждает, что всё, что когда-либо появляется во Вселенной, имеет вечное существование внутри Абсолютного Сознания, подобно тому, как растение присутствует в семени как его потенциал превращения в растение. Вся Вселенная заключена внутри Абсолютного Сознания в форме божественного потенциала. Сознание может появляться в любой форме в силу своей собственной свободной воли. Божественная творческая энергия – основная сущностная природа монистического «Я»-Сознания.*

В соответствии с этим философским воззрением, всё, что существует - реально, и в то же время - духовно, поскольку все есть проявление некой абсолютной реальности, описываемой как чистое, вечное, безграничное Сознание. Согласно древним мастерам этой школы, существенными чертами Сознания являются Его бесконечная, божественная и полная радости природа, а также стремление к проявлению Его способностей к созиданию, сохранению, растворению, омрачению и раскрытию. Это вибрирующее, творческое начало - сущность Бога. Сознание также описывается как «светящееся». Оно озаряет Само Себя, всегда осознавая Себя и всё присутствующее в Нем.

ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ, ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
СВЕТА*Федосов И. В.*

От 70 до 90% информации об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Будучи преобладающим каналом получения информации именно зрительное восприятие в значительной мере определяет представление человека об окружающей Вселенной через зрительные образы, соответствующие как реальным объектам, так и абстрактным идеям. Несмотря на то, что человеческое воображение кажется безграничным, мысленная визуализация и зрительные образы во многом определяются человеческим опытом зрительного восприятия, и поэтому носят отпечаток наблюдаемых в опыте оптических явлений. Человеческое восприятие окружающего мира и его оценка оказываются неразрывно связанными с основными законами оптики, а также с феноменом оптического изображения.

Свойства оптического изображения и его практическая важность определяется строением органа зрения человека, представляющего собой камеру с собирающей линзой. Оптическое изображение, получаемое при помощи такой камеры, представляет собой прямолинейную геометрическую проекцию трехмерных объектов на плоскость (двумерную поверхность). Центр проекции соответствует входному зрачку оптической системы глаза. Данное свойство оптического изображения позволяет отображать трехмерные объекты на плоскости в виде рисунков и регистрировать их при помощи фотографических камер, сходных по устройству с человеческим глазом. Упрощенные рисунки представляют собой символы объектов, которые могут быть упрощены до символов, обозначающих звуки – букв, и письменной речи. Именно зрительное восприятие

обеспечивает передачу опыта отдельного человека всему человечеству. Свойства перспективы оптического изображения - уменьшение видимого размера предметов по мере их удаления от глаза, может быть рассмотрено как первопричина эгоцентрической психологии человека. Привычка к закономерностям зрительного восприятия значительно затрудняет интерпретацию электромагнитной теории света, так как векторное электромагнитное поле не может быть представлено в виде трехмерного зрительного образа.

## ИСКУССТВО ВИДЕТЬ: «ЧТО» ИЛИ «СКВОЗЬ ЧТО»?

*Дуплинская Ю. М.*

Реальность мы воспринимаем всегда сквозь некие «концептуальные очки». У Л. Витгенштейна есть остроумное сравнение. Подобно линзам обычных очков, линзы концептуальных «очков», сквозь которые мы смотрим на реальность, могут «запыляться». Тогда мы принимаем структуры концептуального языка за свойства реальности, как таковой. Иными словами, путаем то, *что* мы видим с тем, *сквозь что* мы смотрим. Главную задачу философии науки Витгенштейн сравнивает с необходимостью протирать запылившиеся «стекла» концептуальных «очков», сквозь которые мы воспринимаем реальность, - чтобы не смешивать правила языка со свойствами реальности «самой по себе».

Великое промывание концептуальных «очков» связано с кантианским переворотом в философии. Суть кантианского переворота: Пространство, время, а также понятия «причина – следствие», «сущность – явление» и т.п., Кант объявляет *трансцендентальными условиями возможности* познания, а отнюдь не отношениями «самой» реальности. Различие между *свойствами реальности* и *трансцендентальными условиями возможности познания* поясним, с долей упрощения, как различие между тем, *что* мы видим (1) и тем, *сквозь что* мы смотрим (2). Однако ситуация оказывается более сложной, нежели полагал Кант. Выясняется, что эти самые «*что*» и «*сквозь что*» в концептуальном аппарате науки сплетены, причем сплетены очень нетривиальным образом, и их разграничение становится, таким образом, весьма нетривиальной задачей. Приведем пример. Законы нашей физики – это реальность, которую мы видим сквозь «концептуальные очки» наших дефиниций тождества, равенства, неизменности отрезков и процедур установления равенства. Представим некую *воображаемую ветвь развития физики*, созданной некими воображаемыми существами, в мире которых напрочь отсутствуют *жесткие тела*, и нет ничего, что могло бы сформировать представление о жестком теле. В размерности таких величин нашей физики, как сила и энергия, присутствует понятие длины, а потому, как замечает Г.Рейхенбах, законы нашей физики изначально формулировались по отношению к системе эталонов, связанных с представлениями о жестком теле. Существа, в мире которых отсутствуют жесткие тела, не смогли бы сформулировать закон сохранения энергии. Ведь если для измерения длины используются не жесткие, а эластичные эталоны, - то энергия замкнутых систем не идентифицируется как постоянная. Но законы такой физики отнюдь не обязательно будут «ложными». Возможно, в ней будут «открыты» другие «законы природы». Следует лишь ставить вопрос о нахождении групп симметрии, которые допускали бы инвариантные преобразования между законами «их» и «нашей» физики.

Итак, подобно тому, как «все пути ведут в Рим», - в современной фундаментальной физике все приводит к поискам симметрии. Вот, здесь-то снова, причем «во весь голос» заявляет о себе тот самый вопрос, с которого мы начали: «*что*» или «*сквозь что*»? Является ли симметрия фундаментальным свойством реальности «самой по себе»? Или это – лишь «концептуальные очки»: правила того языка, на котором физика рассуждает о реальности? В данном случае, - языка математического? Приходит в голову забавная аналогия с психоанализом. Согласно Фрейду, грамматически связанный дискурс выстраивается лишь с целью *сокрытия* и маскировки истинных мотивов. «Момент истины» приоткрывается только в *сбоях* грамматики: оговорках, обмолвках, опечатках. Так может, аналогичным образом, и в современной физике вторжение *реальности* следует искать лишь в *сбоях* семиотической системы: в чем-то, что никакими инвариантными

преобразованиями принципиально «не растворимо»? Поиски симметрий, безусловно, необходимы, - но не как то, *что* мы видим, а как то, *сквозь что* мы смотрим на реальность.

## МИКРОМИР ПРОТИВ МАКРОМИРА, ИЛИ НЕОБЫЧНОЕ В ПРИВЫЧНОМ

*Роках А.Г.*

Макромир привычен для человека, поскольку человек с ним сталкивается постоянно, и он «соизмерим» с размерами и, особенно, с возможностями органов чувств. Физика XX века показала, однако, что в его основе лежит мир малой протяженности – микромир, имеющий другие закономерности, в частности вероятностную природу. Микромир устроен так, что не имеет прямых аналогий с макромиром. Квантовая механика, объясняющая закономерности микромира, выработала математический аппарат, позволяющий сделать надежный расчет в том случае, если мы правильно понимаем, а, следовательно, и ставим задачу. Но в вопросах понимания мы, кажется, продвинулись меньше, чем в расчетах. А понимание требуется – ведь на горизонте – квантовый компьютер

Взять хотя бы такой вопрос: откуда атом черпает энергию для своего существования. Ведь согласно имеющимся моделям субатомные частицы – электроны, обладающие массой, в атоме движутся. Казалось бы, на это нужна энергия. А откуда она берется? Обычный ответ на это – от первотолчка, «Большого взрыва». Тогда, стало быть, поскольку атомы существуют миллиарды лет, она не расходуется? То есть движения в атоме осуществляются без затраты энергии, без ее рассеяния, диссипации? А ведь для постоянного движения электронов, обладающих массой, в атоме должна затрачиваться энергия. Стало быть, на уровне атома реализуется принцип вечного двигателя, запрещенный, т.е. не оправдывающийся для тел значительно больших размеров?

Есть правда определенная опасность того, что эта проблема диссипации энергии на микроуровне надумана или уже решена. Для прояснения этого вопроса можно обратиться к Д.С. Чернавскому [1]:

«Квантовая механика, а точнее уравнение Шредингера, относится к гамильтоновым системам, в которых энергия сохраняется и имеет место обратимость во времени. В таких системах диссипация энергии заведомо невозможна. Энтропия в замкнутых квантово-механических системах возрастая не может (теорема фон Неймана). С другой стороны все реальные процессы физики атома и молекулярной физики, а именно излучение от возбужденного атома и образование молекул, являются диссипативными. Проблема диссипации энергии обсуждалась во многих работах, однако общепризнанное ее решение до сих пор отсутствует. В то же время эта проблема имеет фундаментальное значение, особенно если принять, что уравнение Шредингера является основополагающим для всех атомных и молекулярных процессов».

Далее автор рассматривает процесс образования молекулы из двух атомов водорода и отмечает, что хотя этот процесс диссипативный, он теоретически изучается на основе квантовой механики. Куда девается энергия, всерьез не рассматривается, отмечает автор и делает следующее заключение:

«Решение парадокса диссипативности в недиссипативном гамильтоновом формализме и построение убедительной и полноценной теории атома, учитывающей диссипацию энергии – одна из важнейших задач науки в настоящее время».

Мы начали с проблемы, откуда берется энергия на поддержание функционирования атома, а пришли к тому, что проблемой является также то, куда она девается.

Отсюда можно сделать вывод, что проблемы физики микромира еще ждут своего решения. Однако они существуют так давно, что мы к ним привыкаем и перестаем замечать. Чтобы этого не происходило, сформулируем обсуждаемый парадокс еще острее: *отрицая возможность вечного двигателя на макроуровне, мы закрываем глаза на то, что на микроуровне как бы все на этом и держится*. Так давайте говорить об этом хотя бы в своих лекциях, обозначая для студентов нерешенные задачи науки.

В заключение хочется выразить надежду, что именно в области наноэлектроники и нанотехнологий, где кончается непрерывность и привычное в макромире самоподобие материи и начинаются квантовые скачки, возможно продвижение в направлении устранения противоречий между микро- и макромиром. Там, где заходит в тупик теория, остается надежда на экспериментальное (конструктивное) решение вопроса. Разумеется, такое решение потребует не только мощного аппаратного оснащения, но и непредвзятого подхода.

## Литература

1. Чернавский Д.С. Диссипация энергии и квантовая механика. Синергетика и информация: Динамическая теория информации - М.: Наука.2001.

## ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ: ОТ ДРЕВНИХ ГРЕКОВ К СОВРЕМЕННОСТИ

*Розен В. В.*

В эпоху Античности из естественных наук, наряду с астрономией и механикой, развивалась оптика, основы которой были заложены греками. Многие греческие философы, начиная с пифагорейцев, строили умозрительные заключения, касающиеся природы света, зрения и цвета. В частности, известно априорное утверждение Эмпедокла о том, что свет распространяется с конечной скоростью. К систематическим исследованиям света, сохранившимся до нашего времени, относятся сочинения Евклида «Оптика» и «Катоптрика»; оба этих сочинения Евклида являются чисто математическими – как по своему содержанию, так и по структуре. В I в. н.э. Герон александрийский вывел из закона отражения важное следствие: *луч света распространяется по кратчайшему пути*. На основе этого положения один из крупнейших математиков XVII в. Пьер Ферма сформулировал общий принцип распространения света: *свет движется по такому пути, на преодоление которого требуется наименьшее время*. Отсюда вытекает закон преломления света при переходе из одной оптической среды в другую (этот закон был открыт ранее Снеллиусом и Декартом) А Христиан Гюйгенс доказал, что этот принцип верен для распространения света в среде с непрерывно изменяющимися оптическими свойствами. К этому же ряду можно отнести и первый закон Ньютона: *всякое тело, на которое не действуют силы, движется по кратчайшему маршруту*. Все эти открытия наводили ученых той эпохи на мысль о «совершенной Вселенной», устроенной по принципу наибольшей экономии. Впервые точную математическую формулировку одного из этих принципов предложил французский математик Пьер Мопертюи в 1744 г. – так называемый *принцип наименьшего действия*. Согласно этому принципу, все явления природы протекают так, что некоторая величина, называемая *действием*, оказывается минимальной (формально действие определялось как произведение количества движения на перемещение). Мопертюи придал принципу наименьшего действия теологическую трактовку: законы движения материи должны обладать совершенством, достойным замысла творца, а принцип наименьшего действия служит подтверждением божьей мудрости. Сходных взглядов придерживался величайший математик XVIII века Леонард Эйлер, которому принадлежат следующие слова: «Поскольку наш мир устроен наисовершеннейшим образом и является творением всеведующего творца, во всем мире не происходит ничего такого, в чем не было бы воплощено какое-либо правило максимума или минимума». Более точную и более общую формулировку принципу наименьшего действия впоследствии дал Лагранж (при этом «действие» свелось к энергии). На основании обобщенного принципа наименьшего действия удалось получить решение многих задач механики. Дальнейшее обобщение принципа наименьшего действия осуществил уже в XIX в. английский математик Уильям Гамильтон. По образцу принципа наименьшего действия впоследствии были сформулированы так называемые *вариационные принципы*, которые используются в настоящее время в различных областях механики и физики. В частности, в релятивистской теории Эйнштейна первый закон Ньютона дается в уточненной формулировке: *Мировым линиям движения свободных тел (не*

находящихся под действием внешних сил) являются не прямые, а геодезические, то есть линии, для которых собственное время движения между любыми двумя точками минимально. Согласно ОТО, в отсутствие внешних сил тела движутся по искривленным траекториям, являющимся «самыми короткими» в искривленном пространстве-времени.

## ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТА

*Довгаленко Н. В.*

Именно свет «показывает» бытие (и его проблему) человеку в особом виде – в виде сущего. Причем специфика света проявляется в особом присутствии и сопровождении к введению в мир: через ограничение, через физические рамки, через зримость (духовно-смысловую и чувственную) и пр. Без него невозможно образование (вещей, идей) и актуализация реальности. Однако, свет никогда, в данном смысле, не определяется посредством самого себя, а лишь через свой источник (Благо, Божественное, бытие). Эта связь, соответственно, не позволяет ему полностью раствориться в сущем, мирном.

Соответственно, совершенно особую роль играют онтологические характеристики света, проясняющие его собственную природу, а так же специфику мирности всего сущего. Первая из них, открытость. Свет «вводит» мир в пространственно-временную область, сам ускользая. В данном «откровении» всегда присутствует некая мера. Отсюда свет всегда связан с Логосом, ибо вводит все в единый горизонт соизмеримого, соразмерного. Свет как образ *показывает* соразмерность, Логос – *высказывает*. В открытости света всегда присутствует интенсивность, напряженность. «Яснее», «темнее» так же относится к физическому, как и к смысловому. Интенсивность (выраженная в «яркости») как качественная характеристика света имеет особую важность для вещи, идеи в их проявлении, действии. Открытость содержит намек на потенциальную бесконечную глубину света. Она заключается как в его источнике, так и в особом горизонте предоставляемых им возможностей, которые могут стать событиями.

Таким образом, свет как зримый образ бытия открывает особое пространство мирности. Его онтологические характеристики раскрывают степень выведения сущего его реализации: «яркость» (близость или удаленность к Благоу, бытию); событийность; глубину (стремление к разнообразию).

## НОВЫЙ СВЕТ В СИСТЕМАТИКЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

*Аникин В. В.*

В течение последних десятилетий значение молекулярных методов анализа ДНК-последовательности возросло и "дополнило в таксономии животных сравнительную морфологию как основу классификации" (Whitfield, Cameron, 1994), таким образом, способствовал лучшему пониманию таксономии, филогении и эволюции животных. Таксономическая принадлежность многих видов животных продолжает оставаться спорной или неясной (особенно для простейших), что обусловлено сложностью морфологического анализа и невозможностью применения методов классической систематики. Кроме того, применение методов молекулярной филогении с опорой на имеющиеся морфологические данные способствуют разработке естественной таксономии многих групп животных и актуализации морфологических ключей в определителях.

Попыток анализа таксономической структуры животных даже на уровне родов молекулярными методами до сих пор не проводилось в России, за исключением отдельных групп мелких грызунов и насекомых. Как новый луч света в темном царстве явились новации молекулярной систематики. Определенный прорыв в этом плане был сделан за рубежом, начиная с конца 80-х годов прошлого столетия. Теперь большинство научных работ по таксономии любой

группы животных не обходится без применения молекулярных методов и для построения филогенетических систем обязателен анализ ДНК-последовательностей по многим генам. К сожалению, в отечественной таксономии эти новые методы принимаются в штыки большинством исследователей, которые не понимают принципов этой систематики и нового принципа построения естественных систем животного царства. Только с приходом молодых ученых работающих в этом направлении источник нового света превратится в костер науки в «темном царстве».

Для проведения филогенетической реконструкции используются сиквенсы различных генов исследуемых видов определенной группы животных. Определение нуклеотидной композиции, оценка насыщения последовательности заменами, расчет генетических дистанций, Таджима-тест и филогенетические реконструкции проводятся в пакете программ MEGA6.06 (<http://www.megasoftware.net/index.php>). Оценка достоверности полученной топологии выполняется с использованием bootstrap-теста в 1000 повторностях (Felsenstein, 1985). Как правило, сама Филогенетическая схема реконструирована методом MinimumEvolution (ME) (Rzhetsky, Nei, 1992), для расчета генетических дистанций использовался алгоритм MaximumCompositeLikelihood (MCL) (Tamura et al., 2004), специализированный для построения больших филогенетических схем с использованием дистантных методов. Вариация скоростей эволюции между сайтами моделировалась с использованием гамма-распределения  $\Gamma$  (параметр распределения = 1). Для получения иницирующего дерева использовался алгоритм объединения ближайших соседей (Neighbor-joining). Финальное дерево вычисляется методом Close-Neighbor-Interchange (CNI). Построенная филогенетическая схема позволяет интерпретировать направленность эволюции по генам (их сиквенсам) всех изученных видов группы и утверждать с молекулярно-генетической точки зрения степень близости или отдаления видов внутри кластеров.

#### Литература

1. Felsenstein J. // Evolution 1985, Vol. 39, p. 783–791.
2. Rzhetsky A., Nei M. // Molecular Biology and Evolution 1992, Vol. 9, p. 945–967.
3. Tamura K., Nei M., Kumar S. // Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) 2004, Vol. 101, p. 11030–11035.
4. Whitfield J., Cameron S. // Molecular Phylogenetics and Evolution 1994, Vol. 3, № 3, p. 268–270.

## ВЕЛИКИЕ «ИГРОКИ В БИСЕР»: КАРТИНА МИРА В ПОЛУТОНАХ ПЕРЕЖИВАНИЙ

*Медведев Б. А., Генин В. Д.*

Немецкий писатель Герман Гессе завершил свой последний роман "Игра в бисер" в 1942 году. Через четыре года Гессе был удостоен Нобелевской премии, а "Игра в бисер" приобрела статус магнаторус в его творчестве. Это сюрреалистическое произведение описывает вымышленную провинцию, населенную самыми эрудированными на свете людьми: физиками, математиками, музыкантами, лингвистами, психологами, добившимися в своих специальностях невероятных высот. Однако главное занятие этих людей - так называемая Игра в бисер, представляющая собой синтез всех областей науки и всех видов искусств. От игроков в бисер требуется находить скрытые связи, на первый взгляд, между несвязанными предметами, - между математикой и живописью, между физикой и психологией, между музыкой и архитектурой. Но от тени дисгармоничного мира того, что за стенами Касталии не отгородиться – она растет... И мыслитель, поэт, художник, также как и главный герой романа Германа Гессе - Иозеф Кнехт не могут оставаться равнодушными. От идеализированного мира до реального один шаг... Им открывается XXI век в эпицентре духовного кризиса. В. Ф. Вайскопф: «Человеческое ли дело Физика?» Луи де Бройль: «...сумеет ли человек пережить свои собственные открытия»? Страсть разума к познанию вызывает опасение и вспоминается: «...кто умножает познания, умножает скорбь». Гамлетовский вопрос обращен уже ко всей человеческой цивилизации. Что же происходит? – Страсть к потреблению, коммерциализация и обнищание душ. Налицо процесс отчуждения разума от чувства. В течение тысячелетий, вплоть до XIX века гуманитарная составляющая развития культуры превалировала над естественнонаучной.

Но в XX веке происходит иное - духовная составляющая культуры сметается лавиной естественнонаучных открытий и сопутствующих им новых технологий. В безудержности познания - необузданность человеческих страстей. Но «может ли мерить вещи тот, у кого нет мерки даже для себя»? /Плиний Старший/. Путь познания представляется трагическим. Но Человек познает себя только в пути, даже и тогда, когда этот путь драматичен. Познание самого себя – процесс, в который вольно или невольно вовлечены все области естественнонаучного и гуманитарного знания. Да, в мире, описанном рационально нет места жизни. Жизнь чуждается логических форм. Да, чем ближе к сущности, тем дальше она от дефиниций. Да, метафизические понятия веры, смысла жизни, смерти, любви и бессмертия не укладываются в прокрустово ложе рационального мышления. Но эмоциональный интеллект созидает картину мира, в которой мышление есть метаморфоза переживания, и это переживание носит нравственный характер. Художник не может исключить себя из им же созданной картины мира, познающий не имеет морального права знать о себе меньше, чем о познаваемом. Полотно естественнонаучной и художественной картины мира в полутонах переживаний. «Я» и бытие неразделимы. «Я» - не наблюдатель, «Я» – участник. Человек в коэволюции со всей вселенной. И бытие не только противится завершенности, но и его образам в нашем мышлении. Именно поэтому картина мира не может быть завершенной, и в этом символ связи веж времен. Кто же они, великие «Игроки в Бисер»? - Те, кто из прошлого и будущего вышли к нам из Афинской школы Рафаэля и из Касталии Германа Гессе. – Те, кто не знал отчуждения двух культур. – Те, для кого «Звездное небо над головой и нравственный закон внутри нас» – пребывали и пребывают в гармонии разума и чувства. – Те, кто несли ответственность за всё живое. – Те, кто подписал манифест Рассела – Эйнштейна... - Те, кого по Ницше мы можем назвать «воздухоплавателями ума»...

## К ЭВОЛЮЦИИ НАУЧНОЙ КАРТИНЫ МИРА

*Розен В. В.*

Классическая картина мира, которая начала складываться с конца XVII века под влиянием идей Декарта, Галилея и Ньютона и оформилась окончательно к концу XIX века, по существу, была физической картиной мира, так как в ту эпоху в естествознании ведущую роль играла физика. Это проявилось, в частности, в том, что основные философские категории: *пространство, время, материя и взаимодействие* имели явно выраженный физический характер и уточнялись на языке физики и геометрии.

Представления Ньютона о пространстве и времени сохранились в классической физике до конца XIX в. Как известно, эти представления Ньютона были разрушены в рамках теории относительности Эйнштейна. Принципиальный факт, лежащий в основе теории относительности, состоит в том, что в отличие от представлений классической физики, пространство и время не изолированы, а тесно связаны друг с другом. В терминологии СТО пространство и время образуют единый *пространственно-временной континуум* размерности 3+1. Основным геометрическим основанием общей теории относительности ОТО, является неевклидовость геометрии реального физического пространства. Общая теория относительности трактует неевклидовость геометрии реального пространства как результат его искривления, возникающего за счёт неравномерного распределения и движения масс. Таким образом, методологическое значение теории относительности состоит в установлении триединой связи между фундаментальными понятиями: *пространство, время материя*, которые в классической картине мира представлялись совершенно независимыми и изолированными друг от друга.

Обратимся теперь к концепции материи. Сформулируем основной тезис: *нельзя понять – что такое вещество, не привлекая понятие взаимодействия*. Например, нельзя считать, что нестабильные элементарные частицы «состоят» из стабильных в привычном обиходном смысле – хотя бы потому, что в зависимости от поглощенной энергии одна и та же частица может распасться на различные элементарные частицы несколькими способами. *Это обстоятельство не позволяет*

*рассматривать элементарные частицы как простейшие, неизменные «кирпичики мироздания», подобные атомам Демокрита.* Таким образом, при построении концепции материи на первый план выдвигается понятие взаимодействия. Как известно, оно также претерпело значительную эволюцию за последние полтора столетия. Фарадей и Максвелл вначале пытались дать явлению электромагнетизма механическую трактовку, сводя электромагнитные явления к механическим напряжениям в гипотетической среде – эфире, который, как тогда считалось, «заполняет» всё пространство. Несмотря на настойчивые попытки, такая механическая трактовка не увенчалась успехом. Постепенно они пришли к понятию *поля*, совершенно новому для того времени элементу физической реальности. Фактически поле представляет собой новый способ взаимодействия, при котором «сила» уступает место «энергии». При этом *концепция дальнего действия*, господствующая в миропонимании со времён Ньютона, сменилась *концепцией ближнего действия*. Таким образом, если теория относительности является связующей для понятий: *пространство, время, материя*, то теория электромагнетизма реализует связь между материей и энергией.



## АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК КАК СРЕДСТВО МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ОБЩЕНИЯ

## TERMINOLOGY: CONCEPT VERSUS MEANING

*Eremina S. V., Pravdin A. B.*

*N. G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov*

The authors of the article did not mean to unveil the curtain of developing skills of translation. Neither were they making an attempt to provide scientific community with sticks and balls for creating scientific texts in English. The aim of the authors is to encourage the English-writing scientists to develop their own tools to pronounce their ideas simply and elegantly. A humble impact of the present article in refining English writing is in introducing some meaningful data on semantics of the English language, namely, meaning and concept. To achieve a better insight of these phenomena it is worth comparing and contrasting them.

## INTRODUCTION

The motive of the paper is to distinguish two basic semantic phenomena, that is, meaning and concept, often confused when discussing problems of Russian-English translation. The problem usually arises when the translator is trying to analyze the material he is dealing with searching either in the sphere of linguistics, that is, analyzing the lexical meaning of the word or in the sphere of logical links analyzing the system of concepts of the scientific area. So, the question is: what is he really doing: looking for the variant of translation based on linguistic information, namely, selecting one of the variants of the lexical meaning of the word translated, or he is structuring the scientific area where the word occurs and is revealing the nod of the conceptual links of the area identifying the place of the phenomenon which the word stands for. Whatever he chooses he has to know, what is lexical meaning and what is concept?

## MATERIAL AND DATA

The linguistic data of lexical meaning has very important consequences. Expressing a concept a word does so in a way determined by the peculiarities of the lexical and grammatical systems of each particular language and by the various structural ties of the word in speech. Every word is said to have paradigmatic ties relating it to other words and forms, and giving it a differential quality. These are its relations to other units of the same thematic group, to synonymous and antonymous words, phraseological restrictions on its use and the type of words which may be derived from it. Each word has syntagmatic ties characterizing the ordered linear arrangement of speech elements.

The majority of words in the English language are polysemantic. In every language the combinatorial possibility of meanings in one word is specific. It is characteristic of English nouns to combine individual and collective, countable and uncountable variants in one phoneto-morphological complex. In verbs different meanings based on the transitive and intransitive lexico-semantic variants of the same verb are observed. Thus, grouping of meanings is different from grouping of concepts.

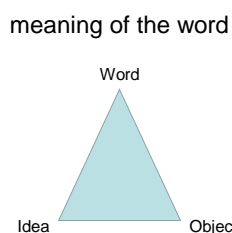
The lexical meaning of the word is familiar enough in the way it is presented in English-English interpretational dictionaries. It looks as follows:

- **head** /hed/ *noun* 1. [ C ] the part of the body above the neck that contains the eyes, nose, mouth and ears and the brain: *Put this hat on to keep your head warm. He banged his head on the car as he was getting in.*
- 2. [ S ] a person or animal when considered as a unit: *Dinner will cost £20 a/per head (= for each person).*
- 3. [ C ] the mind and mental abilities: *You need a clear head to be able to drive safely. I can't get that tune/that man out of my head (= I cannot stop hearing the tune in my mind/thinking about that man).*
- 4. [ C ] someone in charge of or leading an organization, group, etc
- *the head of the History department*
- 5. [ S ] the top part or beginning of something
- *the head of the queue*
- *the head of the page*
- 6. [ C ] *the larger end of a nail, hammer, etc.*
- 7. [ C ] *the top part of a plant where a flower or leaves grow*

- *a head of lettuce*
- 8. [ C ] *the upper part of a river, where it begins*
- 9. [ C ] *the part of a tape or video recorder (= machine for recording sound or pictures) which touches the tape to record and play music, speech, etc.*

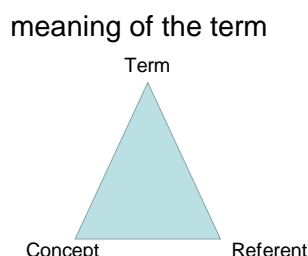
Each numerated variant of the semantic paradigm is the variant of the lexical meaning of the word. Translational dictionaries, terminological or general language ones, give the variant for translation of only one of the variants of the lexical meaning of the word. This linguistic information is undoubtedly insufficient for translating ESP texts. A deeper insight of the phenomenon of lexical meaning is necessary.

Meaning of the word may be presented differently. A world-famous authority, Gotlob Frege, the logic and philosopher, presented the phenomenon graphically as a relationship between a word, an idea and a concept:



According to G. Frege, each word names an object and expresses the ideal representation of the object. The relationships between the three apexes is a lexical meaning of the word.

Since a term is a lexical unit its meaning can also be presented with the help of the same geometric figure. This time the apexes are term (word, sign), concept (idea) and referent (object). Concept is an ideal representation of the referent (object). Referent is rather suitable term for the apex “object”, since the majority of “objects” in a scientific area are not objects at all; they may be processes, properties, actions, attributes, etc. A term is seldom a single lexical unit: more often it is a terminological phrase – a compound, a derived word, a noun phrase, an adjective phrase, a verb phrase, an abbreviation, a formula, a symbol. Thus the meaning of the term may be represented schematically Relationships between the three apexes



- May be elicited only via the whole system of terms of a specific subject area

The term concept came into linguistics from psychology and logic. It denotes the reflection of real objects or phenomena in the mind introduced in their relations or links. Each concept exists only in the system of concepts and is accepted as a nod of relationship of the whole system of concepts, which, in its turn, is reflection of the whole system of phenomena of the scientific area.

Each concept is characterized by its scope and extension. The scope of the concept is the total amount of the objects it refers to; the extension of the concept is a number of essential features to distinguish the object from the others of the kind. The only way to present a concept is to determine its place in the system of concepts of the scientific area. According to the logical background, the relationship can be classified as having either hierarchical or partitive order. The first means that each next concept is the species to the previous one, the second means that each next is the part of the previous one in the system of concepts. There are more types of relationship between the scientific concepts, such as phenomenon – measurement, process – method, process – product, object – form, material – state, material – product, cause – effect, activity – place. We usually distinguish specialized concepts, such as mental representation of an

entity (concrete or abstract object), property (attribute), process (action), identified by a set of distinctive semantic features, by its position (nod) in relation to the other concepts in the same concept system.

Entity concepts, designated by nominal units (common nouns, proper nouns, noun phrases) have hierarchical relationships (identity, inclusion, general-specific, whole-part, matter-ingredient) and associative or non-hierarchical relationships (similarity, disjunction, direct, indirect, qualitative, or directional opposition, temporal, causal or spatial sequence, container-contents, material-product, instrument-action, action-result). Property concepts, designated by adjectival or nominal units, are associated by similarity, disjunction (contrast, degree of intensity) and opposition.

Process concepts, designated by verbal or nominal units, are characterized by relations of inclusion, exclusion, succession and simultaneity, similarity or opposition, manner (speed, direction, goal, intention, intensity).

## CONCLUSIONS

The above presented analysis allowed making following conclusions:

1. These two phenomena have different nature, belonging to different spheres of human activity: meaning has linguistic nature, concept belongs to human consciousness.
2. Lexical meaning owing to its linguistic nature cannot be divorced from the typical sphere of words including stylistical characteristics, emotional colouring, whereas a concept belongs to abstract logic and has no ties with any stylistic sphere and does not contain any emotional component. the complexity of a concept is determined by the relationships of the extra-linguistic reality.
3. Concept is an ideal representation of the phenomena existing only in the system of concepts as a relationship nod whereas meaning is the relationship between term, concept and referent grouping of meanings is different from grouping of concepts.
4. The meaning of the term is expressed by definition having an analytical form, i.e. via genus et differentia.

## References

1. Еремина С. В., Железовская Г. И. Упорядочение языка современной дидактики (Методологический аспект). – Саратов: изд-во «Лицей», 1998.
2. Журавлев В. Ф. Философско-логические вопросы упорядочения терминологии // Проблемы разработки и упорядочения терминологии в Академиях наук союзных республик. – М.: Наука, 1983. – С. 107 – 111
3. Суперанская А. В., Подольская Н. В., Васильева Н. В. Общая терминология. Вопросы теории. – М.: Наука, 1989.
4. Фреге Г. // Семиотика и информатика, 1977, № 8, с.23.
5. Chambers Technical Dictionary. London. UK, 1995
6. Eremina S.V. On the problem of drawbacks of scientific terminology. Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2011: материалы 15 –й Международной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике/ под ред. В. В. Тучина, Г. В. Симоненко. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2011. -162 с.: ил.
7. Eremina S.V., Pravdin A.V. Terminology Processing: Conceptual Approach. Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2013: материалы 17 –й Международной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике/ под ред. Г. В. Симоненко, В. В. Тучина. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 2013. -202 с.: ил.
8. Macmillan English Dictionary for Advanced Learners. International students' edition. London. UK, 2005
9. Minidictionary of Physics. Oxford University Press. Oxford. UK, 1996
10. Sager Juan C. A practical course in terminology processing - John Benjamins Publishing Company, Amsterdam/Philadelphia, 1990.

## A METAPHOR AS A TOOL AND AS AN OBSTACLE

*Alexeeva Dina A.*

*N.G. Chernyshevsky Saratov State University*

The paper focuses on the scientific metaphors that are produced by the researchers in order to present their theories and by the professors in order to explain complex matters to the students. It also deals with the problems students face while puzzling out such metaphors. The exact cases are described and the necessary tips are provided.

## INTRODUCTION

When it comes to the serious scientific matters it is hard or even impossible to experience physically most of their abstract concepts. To use fewer words and to make the concept sound recognizable, metaphors are frankly used. It is a vital and necessary tool in developing scientific terminologies and hypotheses.

Metaphor can help in educational ways – to explain a principle or theory. Metaphor can be used to learn a theory, to teach a theory, to remember a theory. It can be used to describe methods.

#### METHODOLOGY AND DATA

Every metaphor has the “**tenor**”, the primary subject, or the thing being described, and the “**vehicle**”, which is the secondary subject or what the primary subject is being compared with [1]. For example, “the seeds of knowledge”, where the basic principles are viewed as the seeds, or “the roots of this problem”, where the reasons are tenor and the roots are the vehicle.

Despite the allegations against figurative language, metaphor is helpful, at times essential, in performing three functions: establishing terminologies, expressing abstract concepts, and developing hypotheses.

Niels Bohr presented his hypothesis of the appearance of an atom through a metaphor comparing the atom with the solar system. **The atom-as-solar-system theory** is based upon the comparison of two things in which the reader can immediately find similarity, i.e. between the tenor (the atom) and the vehicle (the solar system). This metaphor helped Bohr’s colleagues to perceive the new information through an already established knowledge, otherwise it would be really hard to acquire so many new terms and concepts.

There are common metaphors that we get used to and do not even pay attention to their origin and the fact that we use a figurative meaning of a particular word that had nothing similar with what we are talking about. Usually such metaphors produce no difficulties.

But what if a scientist introduces his own metaphorical explanation of a certain phenomenon? Caleb Scharf, the director of Columbia University’s multidisciplinary Astrobiology Center, once introduced such a picture of a dying star: it is “***‘bloat and gouty’**, as its outer atmosphere inflates and blows off to interstellar space. It seemed like a good way to evoke the sense of an aged and, ah-hem, rather flatulent stellar object*” [2]. He mentions that one of the scientists found this explanation totally wrong due to the fact that the stars cannot possibly be gouty because they do not produce uric acid.

As we know the one can truly say that he understands the topic if he is capable to explain it to both a university professor and a three-years-old child. That means that bringing scientific concepts down to earth is a good tool to express your thoughts in an easy-to-be-acquired way.

But what about the students and those who are acquiring new information? How should they work with metaphors? Psychologists believe that to comprehend metaphor readers must go through a two-step process – deciding whether the passage is metaphorical, and determining the meaning of the metaphor.

First students must determine whether a passage is literal or metaphorical. After reading a passage literally and failing to make sense of it, they reread it looking for a metaphorical interpretation. Second, they must ascertain the meaning of the metaphor.

Within the economical sphere there are a lot of metaphors that are sometimes not evident enough. Some metaphors are zoological like, for example, a **cash cow** is a term used to name ‘*a product which makes money simply by being in the market without expensive advertising*’ [3]. From the phrase: “*This processor is a real cash cow, it keeps selling*” it is obvious that there could possibly be no real cow mentioned in the text. The metaphor’s meaning can be understood from the context as we all know the phrase “milk cow”, where milk is sort of benefit that we get from the cow just as cash is in the presented metaphor.

However, there are also terms **bear market** and **bull market**, which are not that easy to apprehend at first, though the logics behind the figurative meaning is quite strong. If you face them, try to think about the stereotypes connected with bears and bulls. Both kinds of animals are big and strong, but we know that bears tend to hibernate, and bulls are symbols of impetuosity. I.e. “*a bear market is a situation on the stock market when people are selling a lot of shares because they expect that the shares will decrease in value and that they will be able to make a profit by buying them again after a short time*” [4] so that the majority of stock prices are falling (sometimes rapidly) and people get rid of their shares as a hibernating bear loses his depot fats.

A **bull market** is an opposite situation when “*when people are buying a lot of shares because they expect that the shares will increase in value and that they will be able to make a profit by selling them again*”

after a short time” [4] so that the majority of stock prices are rising and the situation gets as uncontrollable as an enraged bull, with a high speed of price increase.

An example of the other metaphor is *a golden parachute*. Judging by the sentence: “*Golden parachutes entitle them to a full year's salary if they get booted out of the company*” we can conclude that it is an agreement which promises an executive large amounts of money or other valuables in case he/she is discharged.

Each phrase that you are struggling with might be:

- an unusual metaphor, and then you will need to solve it on your own;
- a dead metaphor, and then either an ordinary dictionary or a specialized dictionary would help you;
- a nonmetaphorical phrase. If you cannot puzzle it out, may be you do not know one of the meanings

of the word in a phrase.

## CONCLUSION

In conclusion, we do need metaphors to create new terms. We do need metaphors to express our ideas in an easy-to-imagine way. Metaphor shall not be viewed as an obstacle, because it can be solved with the help of imagination, specialized dictionaries, common sense, and sometimes, the sense of humor. We just need to be aware of a possibility that the scientific text may contain several metaphors. We need to pay attention to metaphors in order to understand the text correctly.

## References

1. Hoffman, Robert R. “Metaphor in Science,” In *Cognition and Figurative Language*, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, pp. 393-423 (1980).
2. Scharf Caleb A. “In Defense Of Metaphors In Science”, *Scientific American*, 9 July 2013 <http://blogs.scientificamerican.com/life-unbounded/in-defense-of-metaphors-in-science-writing>
3. Burke David “Biz Talk-1 American Business Slang & Jargon”, Optima Books, 1993, p. 232-254.
4. Collins Cobuild Advanced Learner’s English Dictionary, New Digital Edition - HarperCollins Publishers for ABBYY Lingvo x5, 2008.

## FREQUENCY OF OCCURRENCE OF DEFINITE ARTICLE IN ESP TEXTS

*Koronovskiy Alexander A., Elistratov Andrew A., Eremina Svetlana V.  
N. G. Chernyshevsky Saratov State University*

Russian English-writing scientists are recognized not only for their profound knowledge of any professional area, but also for abundance of definite articles used in their writings. They conscientiously believe that each noun is supplied by the article, which is, in general, true, but, grammatically speaking, zero article is also an article. The paper presents analytical data on frequency of occurrence of definite article met in various issues of ESP texts. The results of the analysis have been calculated and presented in explicit and unambiguous way.

## INTRODUCTION

Article is the most complicated grammatical phenomenon for the Russian people, since there is no article in the Russian language. Russian English writers face difficulty in choosing the article naively considering only definite and indefinite articles, disregarding zero ones. Nevertheless in ESP texts it is zero article that occurs most frequently. Zero article is used with uncountable nouns, such as abstract concepts, material, substance, e. g. water, progress, information, etc. Zero article may be used with nouns representing generic noun (nouns denoting gender) which is also typical for ESP literature.

## MATERIAL AND DATA

Since analysis of frequency of occurrence of definite article is the focus of the research the following functions of definite article have been considered:

1) Theme and rheme structure. Let us recall that the theme of a sentence is what is being talked about, and the rheme is what is being said about the theme. The definite article usually accompanies theme.

Example: *The Ferhulst equation is a new approach to scientific research.*

2) The function of generalization. In that function definite article points to a generalized representative of the class of similar objects which represent the entire class. This function is implemented by a noun in singular.

Example:

*The fact that **the** volume per nucleon seems to be the same for all nuclei points **the** way to the simplest nuclear approximation, the liquid-drop model.*

***The** physicist cannot see the atomic nucleus, but through various probes he can sense some its important properties.*

3) The function of contextual links.

Example:

*... Such food webs can possess a complicated structure of interactions and yield a variety of equilibrium states, which are related to different sets of coexisting species. While in many cases there are only one or a few states where all species coexist with different abundances, in most of **the** other states some of **the** species become extinct. ...*

4) Individualizing function. In this function definite article is used to select an object from a number of similar objects, and to contrast it with other objects of this class.

Example:

*The shape of the propeller is permanent, and so we can say that **the** propeller is "hard".*

#### ANALYTICAL DATA

Frequency of occurrence of definite article in the headlines is determined from the ratio of the number of articles to a number of titles of articles. Statistics show that the frequency of occurrences of definite articles in the headlines of the news media is comparable to the frequency in the titles of scientific articles.

	Name of the journal	number of titles	of articles Titles	length	The average occurrence
News	The Washington Post	100	20	47	0,177778
	Salon Magazine	60	15	51	
	The Moscow Times	80	12	43	
	The Wall Street Journal	70	10	59	
	Chicago Tribune	50	7	55	
			72	12,8	
Classic Physics	Laser Physics Letters	15	4	53	0,25
	Phisic World	20	5	48	
	Materials Research Express	10	3	54	
	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	10	2	51	
	Biophysical Journal	5	1	58	
			12	3	
Non-linear Dynamics	Technical Physics Letters	10	7	77	0,528571
	Physics of wave phenomena	15	8	69	
	Physical Review E	10	7	78	
	Int. J. of Bif&Chaos	20	5	72	
	Chaos, Solitons & Fractals	15	10	74	
			14	7,4	

Definite article occurs more frequently in the headlines of articles on nonlinear dynamics than in other titles of articles.

Then, the excerpts from articles have been analyzed in the same way. The coefficients that have been obtained from the ratio of the number of articles to the number of words of the texts were then compared between each other. For comparison articles from three different sources have been analyzed.

News media content has been acquired from the site of the Bloomberg agency.

As a source of nonlinear-themed articles the "Physical Review E" journal has been chosen.

As a source of articles on classical physics the "Applied Physical Letters" journal has been used.

Name of journal	Concentration
AIP	0,09
Physical Review E	0,14
Bloomberg	0,08

Using the above statistics we conclude that the definite articles are more frequent in the literature on nonlinear dynamics.

## CONCLUSION

In the first part of the brief research basic functions of definite article that are most commonly used in the text of the scientific literature have been considered. Frequency of occurrence of definite article in publications on various subjects has been analyzed. Finally conclusion has been made that definite articles are found more often in publications on nonlinear dynamics than in publications on other areas of sciences.

**ПЁТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ:  
ЖИЗНЬ И СВЕТ**

*150-летию со дня рождения П.Н. Лебедева  
70-летию физического факультета  
Саратовского университета  
посвящается*

*Аникин В.М.*

*Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского*

Приводятся сведения из научной жизни выдающегося русского физика Петра Николаевича Лебедева в контекстах его становления как учёного, деятельности по созданию в России первой физической научной школы мирового уровня, оказавшей существенное влияние на развитие отечественной науки и образования, анализа генезиса и особенностей лебедевского стиля научного руководства, а также внесенного им вклада в становление физического образования и науки в Саратовском университете.

***Заботясь об успехах науки,  
общество будет заботиться о себе самом.***  
П.Н. Лебедев

**ВВЕДЕНИЕ**

Выдающийся русский ученый Петр Николаевич Лебедев навсегда вошел в историю мировой физики как носитель глубокой физической интуиции и непревзойденный экспериментатор, доказавший существование светового давления. Физиком он увлекся двенадцатилетним мальчиком и всю свою последующую жизнь выстроил во имя физической науки. Родившийся в обеспеченной семье, он никогда не испытывал материальной нужды, имел возможность учиться за границей, но его путь к формальному и неформальному признанию как учёного оказался достаточно тернистым. И прожил он очень короткую жизнь – 46 лет (как и его отец), успев оставить после себя, помимо блестящих научных работ, первую в истории России научную физическую школу мирового уровня.

Ценную информацию о жизни П.Н. Лебедева содержат академические издания его научных трудов [1–3], библиография его работ [4]<sup>1</sup>, научная переписка [5], воспоминания его коллег по университету [6] и людей, причастных к его научной школе [7–25]. Настоящие записки не претендуют на очередной биографический очерк или характеристику научных достижений П.Н. Лебедева. Они посвящены моментам становления Лебедева как ученого-физика, истории его диссертационных защит, методам его работы с учениками, стилю научного руководства. В контексте этой темы систематизированы данные, содержащиеся в указанных выше источниках, и выделены характерные черты лебедевского стиля научного руководства.

Обращение к истории науки сегодня, когда в стране происходят существенные перемены в организации и оценке роли научных исследований, подготовки научных кадров, весьма поучительно своими сравнениями. Кроме того, знание истории научных и технических достижений обладает и бесспорной познавательной силой. На хронологической оси встречаются *все* события, с которыми связаны те или иные творческие достижения естествоиспытателей и инженеров: гениальные догадки, экспериментальные факты, постановки проблем, убедительные теории, открытия, плодотворные идеи, пионерские изобретения, точные модели природных явлений, полезные приспособления, поучительные неудачи и т.д. Знание истории науки – непосредственно либо косвенно – способствует

---

<sup>1</sup> Издание [4] в дополнение к подробному перечню научных публикаций П. Н. Лебедева содержит разнообразные материалы о жизни и деятельности Петра Николаевича: отчет о присуждении ему премии Академии наук имени профессора С. А. Иванова, «читанный в публичном заседании Академии наук 29 декабря 1904 г.», сведения о сделанных им докладах, сообщений и демонстраций; сведения об его участии в работе различных съездов, комиссий, избрании в члены научных обществ, о педагогической работе; сведения о научных работах, выполненных в его лаборатории; список литературы по световому давлению начиная с 1619 г. и др.



освоению её предмета, постепенному овладению специальной терминологией, помогает ориентироваться в эпонимии, в содержании споров между учёными, представить себе судьбу некоторых творческих идей, различные периоды развития науки [26, 27]. И как писал еще С. И. Вавилов, «история науки когда-нибудь сама станет наукой» [28].

## 1. ПЁТР ЛЕБЕДЕВ: ПУТЬ К НАУЧНОЙ ВЕРШИНЕ

*Учёная сила кроется в преемственности знаний.*

П. Н. Лебедев

Вехи своего образования П. Н. Лебедев отметил в «Жизнеописании», приложенном к его диссертации на степень доктора философии, которую он защитил в Страсбургском университете [1, с. 414]:

*«Я, Пётр Лебедев, сын покойного купца Н. В. Лебедева, родился 8 марта 1866 г. в Москве. Свое школьное образование я получил в Евангелическом Петропавловском церковном училище и в Реальном училище Хайновского там же. С сентября 1884 по март 1887 посещал Московское высшее технического училище.*

*Чтобы посвятить себя изучению физики, я учился с октября 1887 по август 1889 в Страсбурге, зимний семестр 1889/90 – в Берлине, а с пасхи 1890 по июль 1891 снова в Страсбурге».*

В Императорском Московском высшем техническом училище Лебедев прослушал курсы В. Ф. Давыдовского, Н. А. Шапошникова, В. С. Щегляева, Н. Е. Жуковского, Н. В. Слугинова. А уехал в Страсбург, по-видимому, по совету Владимира Сергеевича Щегляева (1857–1919). Среди прослушанных Лебедевым в Страсбургском и Берлинском университетах лекторов – Э. Кристоффель, Э. Кон, Р. Фиттиг, В. Гальвакс, Г. Гельмгольц, Ф. Кольрауш, А. Кратцер, А. Кундт, А. Маурер, Т. Рейе, К. Шеринг, Ф. Штенгер, О. Винер, Э. Целлер (именно в таком порядке расположены эти известные физикам фамилии в автобиографичном «Жизнеописании» П. Н. Лебедева [1, с. 415]). Центральной фигурой среди всех названных людей для П. Н. Лебедева стал профессор Август Кундт<sup>2</sup>.

Немецкий ученый Август Кундт (1839–1894) вошел в историю науки не только как солидный физик в области акустики, оптики, металлооптики и молекулярной физики, но и как блестящий организатор Физического института при Страсбургском университете и создатель международной школы физиков<sup>3</sup>. В Страсбурге Кундт проработал 17 лет. Этой деятельности Кундта предшествовала его учеба в начале 60-х г. XIX в. в Берлинском университете у пользовавшегося славой физика и химика Генриха Густава Магнуса (1802–1870), академика ряда академий Европы<sup>4</sup>, работа в созданной Магнусом физической лаборатории, в которой – и как студент, и как ассистент – Кундт стал умелым экспериментатором.

<sup>2</sup> Кундт, Август Адольф Эдуард Эберхард (нем. Kundt, August Adolph Eduard Eberhard) – немецкий физик, основатель научной школы физиков-экспериментаторов, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1888). Окончил Берлинский университет (1864). Профессор в Цюрихе (1868), Вюрцбурге (1870), Страсбурге (1872) и Берлине (1888).

<sup>3</sup> Французский (после 1681 г.) Страсбург в составе Эльзаса отошел к Германии по итогам франко-прусской войны 1870–1871 гг. По иронии судьбы Кундту пришлось принимать участие в осаде города. Через два года в Страсбурге был открыт германский университет кайзера Вильгельма, при котором А. Кундту и было поручено устроить физический институт.

<sup>4</sup> В свою очередь учителями Г. Г. Магнуса были выдающиеся химики: Э. Мичерлих, Й. Я. Берцелиус, Ж. Л. Гей-Люссак! Не менее удивителен список учеников Магнуса: Г. Гельмгольц, Р. Клаузиус, А. Кундт, Г. Квинке, Дж. Гиббс, Г. Видеманн, Э. Сименс, Дж. Тиндаль, А. Г. Столетов, А. Крёниг и др. В начале 40-х г. Магнус создал собственную физическую лабораторию для научной работы практикантов, которая была одной из первых физических лабораторий, и организовал (1843) первый физический коллоквиум. На базе лаборатории и кружка ученых, группировавшихся вокруг Магнуса, в 1845 возникло Берлинское физическое общество. Он же создал научный реферативный журнал «Die Fortschritte der Physik» («Успехи физики»), 1847 г. Магнус стал и одним из основателей немецкого химического общества (1868). По выражению П. Н. Лебедева, А. Кундт «с любовью всегда говорил о своем учителе – Магнусе, заветы которого свято храня, ученик превзошел учителя и создал для всего мира то, что создал Магнус для маленького кружка немецких физиков» [1.1, с. 67].

Август Кундт как лектор и как научный руководитель представлял, по мнению П. Н. Лебедева, исключительное явление. Он обладал гранью таланта, прежде всего необходимой преподавателю и научному руководителю, – умением вызывать и поддерживать незатухающий интерес учеников к своему предмету. Лекции по экспериментальной физике Кундт читал, согласно обычаям германских университетов того времени, одновременно для студентов математического и медицинского факультетов в таком объеме, что весь курс занимал только два семестра по пять часов в неделю, и, как подчеркивает Лебедев, «несмотря на такое стеснение во времени и в подготовке слушателей, он справлялся с огромным материалом и касался самых сложных вопросов, не нарушая ни общепонятности, ни гармонии целого» [1, с. 59]. Каждая лекция Кундта по экспериментальной физике, по характеристике Лебедева, являла собой «законченное произведение», ясное по изложению и «по массе замечательно проделанных опытов» (эксперименты лектор проводил всегда сам): «Кундт читал физику так, как он “чувствовал” ее, так, как она доступна только умственному оку глубокого исследователя, с теми неуловимыми оттенками изложения, которые свойственны только очевидцу – на его лекциях слушатели невольно и незаметно проникались духом науки» [1, с. 59]. В его изложении физика представляла как «живая наука», в которой наряду с установленными фактами рождались проблемы, требующие изучения. Как результат, на экзаменах и студенты-медики, и студенты, занимающиеся физикой «профессионально», демонстрировали достойный уровень знаний.



Август Кундт

Лебедев приводит такой показатель, отражающий популярность Кундта среди студентов: если лекции Г. Гельмгольца по экспериментальной физике в Берлине собирали не более 200 человек, то уже через два года после вступления А. Кундта в 1888 г.<sup>5</sup> на должность директора Физического института Берлинского университета число слушателей удвоилось, и аудитория уже не могла вместить всех желающих (пришлось делать в ней хоры – верхнюю открытую галерею, балкон). Когда же лекция касалась предмета, близкого научным интересам самого Кундта, то «тут он превосходил самого себя; он переступал те границы, которые положены обыкновенному лектору? и являлся гениальным импровизатором» [1, с. 60].

Считается<sup>6</sup>, что с Г. Магнуса, А. Кундта и Ф. Кольрауша началось широкое внедрение в университетский учебный процесс физических практикумов (лабораторий), где студенты, «пользуясь предоставленными в их распоряжение приборами, экспериментально решали ряд задач из всех областей физики» [1, с. 61]. Руководство занятиями в учебной лаборатории Кундта, который назвал ее «das kleine physikalische Practicum», поручались ассистентам, поскольку «молодые физики, занимавшиеся самостоятельными исследованиями, – “das grosse Practicum” – и его собственная работа не оставляли ему свободного времени» [1, с. 61]. Тем не менее, «изредка приходил он в эту лабораторию, но тогда, всякий раз, как только замечал какое-либо затруднение у работающего студента, он тотчас

<sup>5</sup> В 1888 г. Гельмголец был назначен президентом Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Физико-техническое имперское ведомство), но остался профессором теоретической физики в университете.

<sup>6</sup> Шустер А. Прогресс физики. Пг.: Естествоиспытатель, 1915. С. 15 (ссылка дается по [1.5, с. 9]).

же приходил ему на помощь, показывая, как надо делать, и следил за ходом опыта с неподдельным интересом» [1, с. 61].

Все позитивные организаторские, творческие и личностные качества Августа Кундта проявились в нем как в руководителе международной Кундтовской школы по физике, приобретшей известность на всех континентах. К нему стекались люди различных национальностей, которых он «умел соединить в одну дружескую семью, научал их понимать и любить живую науку, научал их работать на нераздельную, общечеловеческую пользу» [1, с. 61]. Среди сотрудников, стажеров и студентов А. Кундта – физики с «именами»: Л. Аронс, Э. Г. Варбург, О. Г. Винер, В. К. Рентген, К. Ф. Браун, В. Гальвакс, Г. Рубенс, Ф. С. Экснер, Н. Тесла и др. Были в школе Кундта и студенты из России: П. Н. Лебедев, Б. Б. Голицын, Д. А. Гольдгаммер, Г. Г. Де-Метц<sup>7</sup>, Д. П. Коновалов, А. В. Михельсон, Владислав Натансон, Б. В. Станкевич, С. Ф. Терешин, В. А. Ульянин, В.С. Щегляев, ставшие впоследствии профессорами российских университетов, а Б. Б. Голицын, Д. П. Коновалов и (в Польше) В. Натансон – академиками. Методические подходы Кундта к подготовке молодых ученых в различных компонентах присутствовали и присутствуют в работе многих научных школ мира.



Физический институт Страсбургского университета

Организация физического эксперимента в Физической школе была основной заботой А. Кундта. Как полагал П. Н. Лебедев, «главным стремлением Кундта было открыть перед начинающим физиком всю закулисную сторону научного исследования и дать ему возможность попробовать свои силы и научиться самостоятельно работать при самых благоприятных внешних условиях» [1, с. 61].

В чем это проявлялось? Кундт охотно разрешал работать во внеурочное время с условием не тревожить никого в институте. Каждому предоставлялась отдельная комната и необходимые приборы, в том числе ценные. Когда нужных приборов не хватало, а предварительные опыты обещали дать хорошие результаты, приборы немедленно заказывались. Предоставляя своим ученикам «наивыгоднейшие условия научного комфорта», Кундт постоянно был в курсе всех дел. Сопровождаемый ассистентом, он обходил всех занимавшихся самостоятельными исследованиями, выслушивал отчеты о ходе работ, давал советы, делал замечания, беседовал. Когда же тема стоила того, чтобы ей заниматься, Кундт становился «идеальным руководителем и помощником»: «благодаря превосходной памяти и большой эрудиции он указывал на целый ряд статей, иногда из совершенно различных областей науки, могущих быть полезными в данном случае, часто сам присаживался к приборам и показывал, как и на что в них надо обращать особое внимание, или сразу изобретал какой-нибудь крайне простой способ победить встретившееся затруднение. И все это он делал с той удивительной простотой, которая совершенно заставляла забывать, что он непосредственный начальник и знаменитый ученый» [1, с. 62].

Простота эта, как считал Лебедев, имела огромное образовательное и воспитательное влияние: всякий, даже и мало подготовленный студент, мог обратиться к нему за разрешением какого-нибудь

<sup>7</sup> Лучшим популярным изданием по физике в России был журнал «Физическое обозрение», издававшийся с 1900 г. профессором П. А. Зильовым сначала в Варшаве, а затем в Киеве. В 1906 г. издание журнала в Киеве продолжил профессор Г. Г. Де-Метц. Здесь помещены многие из популярных статей П. Н. Лебедева. За границей он печатал свои работы главным образом в «Annalen der Physik», который в первое десятилетие XX в. был ведущим физическим журналом [1.4].

недоразумения, которое нередко вызывалось простым незнанием, и Кундт разъяснял суть вопроса, не делая никаких личных замечаний в адрес обратившегося с вопросом. Когда вопрос касался по-настоящему сложного и запутанного явления, тогда (и это было особенно интересно) завязывались оживленные дебаты, в которых Кундт «в полной силе» демонстрировал не только знание и остроумие, но и физическое чутье. Он выстраивал логическую цепочку объяснений, требующих деятельности мысли, направленной на выявление аналогий и обобщений, «неразрывно связанных с природой, далеких от всяких гипотез» [1, с. 62]. Как говорил Кундт, он учил и «физически думать», и «физически работать». В каждом из своих учеников он видел и уважал будущего деятеля науки, ценил в человеке трудолюбие и способность плодотворно работать. Кундт был доброжелательным психологом, и если у кого-то не шли дела с экспериментом и тот начинал отчаиваться, то он, подбадривая, говорил: «Что физически возможно, то не может быть технически невозможным – оно должно идти». А когда кому-то из работающих после долгих трудов удавалось получить нужный результат, Кундт с воодушевлением рассказывал об этом успехе всем студентам и преподавателям, приговаривая: «Этот может работать!».

Кундт поощрял всякое проявление самостоятельности, видя в ней залог будущих успехов, считая, что именно возможные неудачи при самостоятельной работе и их осмысление принесут гораздо больше пользы, чем наставнические объяснения. Лебедев выделялся среди учеников. Кундт восхищался молодым русским, оригинальностью его мышления, обилием идей и предоставил ему все условия для совершенствования как физика-экспериментатора. Однажды он даже написал шутовское стихотворение о Лебедеве, которое начинается словами:

*Ideen hat Herr Lebedew  
Per Tag wohl zwanzig Stück,  
Und für des Institutes Chef,  
Ist's wahrlich noch ein Glück,  
Dass er die Hälfte schon verliert  
Eher sie überhaupt probirt<sup>8</sup>.*

Высоко ставя своего ученика, Кундт ждал от него гораздо больше, чем от других. П. П. Лазарев передает рассказ П. Н. Лебедева об одном характерном эпизоде [7]. Работая в Берлине, в физической лаборатории, Лебедеву приходилось часто пользоваться старым ртутным насосом, требовавшим постоянного подливания ртути. Чтобы не тратить время на эту операцию, Петр Николаевич сконструировал прибор для автоматической подачи ртути. Пользуясь им, он мог во время откачки свободно уходить из своей лаборатории. В одно из таких отсутствий, когда Лебедев был на лекции Г. Гельмгольца, в его комнату вошел А. Кундт. Увидев новый аппарат Лебедева, он позвал своих ассистентов и с жаром стал им расхваливать Петра Николаевича как изобретателя. Но как только в комнату вошел сам П. Н. Лебедев, Кундт тут же начал его журить за то, что он напрасно тратит время на технические задачи и отвлекается от науки.

Еще один методический прием, которого придерживался Кундт в своей физической школе, – это организация постоянного научного общения всех одновременно занимающихся у него самостоятельными исследованиями (а их число доходило до 20). Это позволяло студентам «пропитаться духом» научных исследований, зажечься «соревновательным огнем», познакомиться с современным состоянием физики, получить массу необходимых для экспериментальной работы практических сведений и приобрести лекторские навыки. Регулярной формой такого общения был еженедельный физический коллоквиум, на котором участники выступали с рефератами новых научных статей. Кундт получал журналы и оттиски отдельных статей в огромных количествах; он имел широкие контакты в научном мире Европы и Америки. При этом он мог мастерски представить портрет каждого ученого, и «перед глазами слушателей, привыкших к имени ученого как к звуку, вырисовывался живой чело-

<sup>8</sup> У Лебедева – по двадцать идей на день, и для шефа института – истинное счастье, что он половину их теряет, прежде чем приступить к их осуществлению (цит. по [6,7]).

век, со всеми его особенностями» [1, с. 67]. И это тоже играло свою положительную роль, еще более «приближая» студентов к делу, которым они занимались.

Студенты, выбрав статью для доклада, на коллоквиумах приобретали опыт риторики, аргументации, аспектного реферирования; не оставались «без дела» профессор и ассистенты, знакомившие слушателей с достижениями в специальных областях физики. Международный характер школы выявлялся в буквальном смысле «по слуху»: на коллоквиумах звучала немецкая речь с разными местными диалектами объединенной Германии, с «национальными звуками и неправильностями», с которыми говорили иностранцы от Америки до Японии. Всех «Кундт соединял в одно целое, одушевленное общим интересом» [1, с. 66]. Попутно можно отметить, что сам Пётр Николаевич блестяще владел немецким языком (его знание он вынес из московского Петропавловского (немецкого) училища), что впоследствии использовал при написании как собственных научных статей, так и статей своих учеников (за их единоличным авторством!) с целью публикации в немецких научных изданиях.

После выступления референтов на коллоквиуме (каждый раз заслушивали трех выступающих) начиналась оживленная научная дискуссия, умело руководимая Кундтом. П. Н. Лебедев воспринимал коллоквиум как «источник наслаждения»: «Colloquium делал науку близкой и родной, открывая новые, невиданные горизонты. Все, что было необходимо физики, Кундт давал своим ученикам в изобилии, уча и воспитывая их, и каждый уносил на свою далекую родину неоценимое богатство знаний и вкрапленные в них отблески гениального учителя» [1, с. 66].

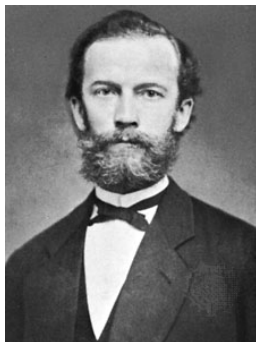
Квинтэссенцией характеристики Августа Кундта как научного руководителя можно считать слова П. Н. Лебедева: «Если Кундт, в течение своей жизни неутомимо работая, старался возможно более расширить область нашего знания своими исследованиями, то, может быть, в еще большей мере он стремился передать каждому из своих учеников частичку своей души, частичку той бескорыстной любви к науке, которая ведет человечество к истине» [1, с. 67]<sup>9</sup>.

В институте А. Кундта Лебедев работал много и упорно, и физика все глубже захватывала его. В его письмах и дневнике имеются такие строки: «С каждым днем я влюбляюсь в физику все более и более. Скоро, мне кажется, я утрачу образ человеческий, я уже теперь перестал понимать, как можно существовать без физики <...>. Для меня каждая страница прочитанного включает больше удовольствия, чем труда, потраченного на усвоение; таким образом, я с утра до вечера занят тем, чем хотел заниматься с 12 лет, и у меня только одно горе — день мал, так как я жажду, и мне хотелось бы получить еще больше удовольствия» [5, с. 9; 7].

Лебедев переделал массу экспериментов, целью которых была проверка выводов соответствующих теорий. Опыты эти (так уж получалось) не приводили к ожидаемым результатам, что, в принципе, можно и нужно было объяснять некорректностью (несостоятельностью) теоретических моделей и отсутствием чувствительного оборудования. Но всё это считалось неудачами и сильно расстраивало Лебедева, и он уже начинал терять веру в свои силы (это нашло отражение в некоторых его письмах близким), в том числе и по той причине, что нужно было в конце концов «зафиксировать» окончание университета посредством защиты диссертации.

Последнее обстоятельство, наконец, подтолкнуло и Кундта, не ограничивавшего ранее Лебедева в его самостоятельной деятельности, дать ему совет выполнить «простенькую» работу, для чего Кундт направил Лебедева весной 1890 г. обратно в «провинцию», в Страсбургский университет, в «ежовые рукавицы» Фридриха Кольрауша (Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch, 1840–1910), признанного специалиста по электроизмерениям. Он сменил А. Кундта на его посту директора Физического института в Страсбурге. Слово «простенькая» совсем не означало примитивная в научном плане: подразумевалось нахождение и разработка содержательной «плодотворной дебютной идеи», допускавшей достаточно ясное понимание путей экспериментальной реализации поставленной проблемы, наличие необходимого работоспособного (в частности, чувствительного) оборудования и ... положительное восприятие работы ее лицами, решавшими судьбу соискателя степени.

<sup>9</sup> В собраниях трудов П. Н. Лебедева помещен его доклад «Август Кундт» памяти немецкого ученого, который он прочитал 30 сентября 1894 г. на заседании Отделения физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии. Этот доклад, наряду с письмами Петра Николаевича матери и сестре периода пребывания в Страсбурге, являются первоисточником биографических сведений о самом Петре Николаевиче [1, с. 49–67].



Фридрих Кольрауш

Попутно отметим, что в 1905 г. именно такой «технологией» воспользовался и Альберт Эйнштейн. Прежде чем обрушить на мир серию работ, открывавших новую эру в физике (одной из их предтеч стали, безусловно, лебедевские результаты по световому давлению), он защитил в Цюрихском университете диссертацию «Новое определение размеров молекул» объемом в 20 страниц<sup>10</sup>. Как писал С.И. Вавилов, «доказанный факт светового давления необычайно облегчил конкретизацию той неразрывной связи между массой и энергией, которая во всей широте была выяснена теорией относительности. Элементарное световое давление современной квантовой физики, момент фотона  $h\nu/c$ , есть обобщение лебедевского опыта. На почве этого обобщения стало возможно понимание особенностей рассеяния лучей Рентгена и лучей-гамма. Так называемый эффект Комптона есть, в сущности, осуществление лебедевского опыта в элементарном процессе при столкновении фотона и электрона. Таким образом, работы Лебедева по световому давлению – это не отдельный эпизод, но важнейший экспериментальный узел, определивший развитие теории относительности, теории квантов и современной астрофизики... Не только историк, но и исследователь-физик еще долго будут прибегать к работам П. Н. Лебедева как к живому источнику» [10].

Оборотом «ежовые рукавицы» Лебедев характеризовал «умеренность и аккуратность» Кольрауша, его приверженность к точнейшим измерениям, нашедшую, в частности, отражение в его популярном, начиная с 70-х г. XIX в., и выдержавшем при жизни автора 11 изданий «Руководстве по физическому практикуму»<sup>11</sup>.

В 1890–1891 гг. П. Н. Лебедев работал над докторской диссертацией по измерению диэлектрических постоянных паров десяти различных веществ при разных давлениях и температурах и сопоставлению полученных экспериментальных результатов с теоретическими значениями, даваемыми теориями Клаузиуса–Моссотти и Ван-дер-Ваальса. Он уже заранее предчувствовал нужный итог и занимался диссертацией весьма спокойно, а «для души» (и это ему блестяще удалось!), параллельно диссертации, подготовил единственную свою теоретическую работу, привлекающую к себе широкое внимание, – о воздействии светового давления на малые космические тела – «космическую пыль», что позволило ему обосновать решающую роль светового давления в образовании кометных хвостов (их отталкивании от Солнца).

Статья «Об отталкивающей силе лучеиспускающих тел» в 1891–1892 гг. была опубликована сразу на трех языках – русском (в журнале «Труды отделения физических наук Общества любителей

<sup>10</sup> В основе диссертации Эйнштейна лежали два уравнения. В одном из них была допущена модельная неточность, а второе уравнение стало «яблоком приоритетного раздора» между автором диссертации и австралийским физиком Уильямом Сазерлендом. Сама диссертация была одним из очередных «кирпичей» в фундамент атомно-молекулярной теории строения вещества. В своей творческой биографии Эйнштейн об этой диссертации ничего не пишет [29].

<sup>11</sup> Впоследствии Ф. Кольрауш присылал П. Н. Лебедеву некоторые новые издания «Руководства» для предварительного просмотра [5, письмо 273]). Традиция издания «Практической физики Кольрауша» поддерживалась до конца прошлого столетия. В 1996 г. вышло обновленное современными авторами двадцать четвертое трехтомное издание, насчитывающее 2400 страниц: Kohlrausch, Friedrich: Praktische Physik : zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik / F. Kohlrausch. Hrsg. von Volkmar Kose ; Siegfried Wagner. - Stuttgart : Teubner, 1996. См. : URL : <http://www.ptb.de/cms/publikationen/buecher/der-kohlrausch-praktische-physik/praktische-physik-band-1.html>.

естествознания, антропологии и этнографии»<sup>12</sup>), немецком (в журнале «Annalen der Physik») и английском (в журнале «Philosophical Magazine» (см. библиографию в [4]) и заложила, по словам Т. П. Кравца, «основу всемирной известности молодого Лебедева и вниманию, с которым встречались все последующие его публикации» [4, с. 18].

Тем не менее, первой печатной работой П. Н. Лебедева (причем на немецком языке) стала его диссертация «Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти–Клаузиуса», представленная на физико-математический факультет Страсбургского университета (русский текст диссертации приведен в собраниях научных трудов П. Н. Лебедева 1913, 1949 и 1963 гг. [1–3]).

В Страсбурге перед защитой диссертации Лебедеву необходимо было сдать докторские экзамены, в которые не входил экзамен по древним языкам (для Лебедева, не учившегося в классической гимназии, такой набор экзаменов был большим «плюсом»). Но все же подготовка к докторскому экзамену заняла довольно много времени, причем Ф. Кольрауш, руководствовавшийся, вероятно, какими-то формальными критериями, заменил одну часть состоявшего из трех частей экзамена (геометрию) на химию. Впоследствии Лебедев вспоминал этот эпизод с юмором, но тогда было совсем не до смеха: чтобы сдать экзамен, он должен был за короткий срок самостоятельно одолеть огромный курс органической химии профессора Страсбургского университета В. Р. Фиттига. И, как пишет П. П. Лазарев, хотя экзамен был сдан *magna cum laude*<sup>13</sup>, быстрая и поверхностная подготовка на всю жизнь оставила в душе Петра Николаевича предубеждение против химии, особенно органической, которую он представлял «в очень образном виде» [7].

В мае 1891 г. П. Н. Лебедев представил диссертацию Ф. Кольраушу и получил от него полное одобрение. Как отмечал Т. П. Кравец, «докторские диссертации, защищавшиеся в Германии, должны были представляться в печатном виде; расходы по печатанию ложились на докторанта. Авторы наилучших диссертаций избегали этих расходов таким образом, что публиковали свои диссертации в каком-либо физическом журнале, а необходимое количество экземпляров диссертации получали в виде отдельных оттисков, что стоило сравнительно очень дешево. В конце диссертации по положению печаталась “Vita” – краткое жизнеописание автора» [4, с. 15]. Работа Петра Николаевича была принята к печати в журнале «Annalen der Physik»<sup>14</sup>. Ее объем составлял 26 страниц.

22 июля 1891 г. Пётр Николаевич Лебедев защитил диссертацию «Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти–Клаузиуса» в Страсбургском университете и получил право именоваться «доктором естественной философии»<sup>15</sup>.

П. Н. Лебедев считал Ф. Кольрауша своим вторым учителем и все последующие годы поддерживал с ним теплые отношения. Общую свою оценку времени, проведенному в Страсбурге, П. Н. Лебедев высказал в письме к Ф. Кольраушу от 6 августа 1894 г. [5, письмо 78]:

*«Позволю себе послать Вам при этом письме оттиск моей работы, которую я привез из Страсбурга в виде разработанного плана и развил здесь в первое свое экспериментальное исследование. Лишь когда я, при окончательном составлении статьи, просмотрел свои журналы наблюдений, я увидел из некоторых частных, как много я узнал в Страсбурге; я почувствовал, что там мне*

<sup>12</sup> Отделение физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии было создано в 90-х годах XIX в. в Москве и было единственным местом общения физиков – сначала под председательством А. Г. Столетова, а потом – Н. Е. Жуковского. П. Н. Лебедев после возвращения в Москву принял в нем деятельное участие (вместе с Б. Б. Голицыным). Один из его первых докладов и был посвящен его тогдашней главной теме, а затем естественным образом попал в вышеуказанные «Труды» [4, с. 18]. Первоначально (1863) названное общество имело наименование Общества любителей естествознания; в 1871 г. получило расширенное название.

<sup>13</sup> Фраза по латыни «с большим отличием» (оценка).

<sup>14</sup> В 1887–1899 гг. в списках литературы для журнала «Annalen der Physik» (тома 237–305) использовалось эквивалентное название «Wiedemanns Annalen» (сокращенно – «Wied. Ann.») – по имени издателя Густава Генриха Видеманна (Gustav Heinrich Wiedemann).

<sup>15</sup> По утверждению Т. П. Кравца, «Пётр Николаевич не особенно любил эту работу, так как она не отвечала его вкусу, изощренному на рекордно-трудных темах. У других физиков она встретила добрый прием и была отмечена большим количеством упоминаний в реферативных журналах. Впоследствии, уже под конец жизни, тема о диэлектрической постоянной снова начала интересовать П. Н., и он дал ее, как специальную задачу, одному из своих учеников, Г. Б. Порту» [4, с. 16].

*незаметно и безболезненно было привито искусство научного наблюдения: я спешу воспользоваться этим случаем, чтобы еще раз выразить Вам, г. профессор, глубочайшую благодарность от всего сердца за мои учебные годы».*

Степень Страсбургского университета (как, впрочем, и степень любого другого зарубежного университета) официально в России не котирировалась как научная, и чтобы здесь именоваться доктором, необходимо было прежде защитить еще и магистерскую диссертацию, сопровождаемую сдачей магистерских экзаменов, подготовка к которым требовала значительных усилий [29]. Тем не менее, Общий Устав Императорских Российских университетов 1884 года, предусматривавший наличие «на всех факультетах» двух ученых степеней – магистра и доктора, допускал, что «в исключительных случаях лица, пользующиеся известностью по своим ученым трудам, могут быть допускаемы, согласно постановлению Совета университета и с разрешения Министра Народного Просвещения, к испытаниям прямо на степень доктора» (статья 85) и, соответственно, «во внимание к выдающимся достижениям представленной магистерской диссертации факультету предоставляется право ходатайствовать перед Советом о возведении магистранта прямо в степень доктора» (статья 88).

Приобретенный за предшествующие годы научный авторитет Петра Николаевича позволил ему избежать магистерских испытаний и сразу же (редчайший случай в истории российских защит) получить степень доктора в результате публичной защиты диссертации «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы», которая состоялась в Московском университете 6 октября 1899 г.<sup>16</sup> Перед этим П. Н. Лебедев опубликовал три статьи с материалами диссертации в немецком журнале «Annalen der Physik» и издал книгу на русском языке с тем же названием (Москва, 1899, 64 с., с рис. и табл.). С ходатайством о присуждении Лебедеву докторской степени, минуя магистерскую, выступили именитые оппоненты – профессора Николай Алексеевич Умов и Алексей Петрович Соколов. 30 октября 1899 г. Совет Московского университета утвердил П. Н. Лебедева в степени доктора физики [4, с. 75].



П. Н. Лебедев, 1890-е годы

В августе 1900 г. Петра Николаевича ожидал триумф на Всемирном физическом конгрессе в Париже, где он выступил (это произошло 11 августа) с докладом об экспериментальном доказательстве светового давления на твердые тела (предварительное сообщение о своих опытах П. Н. Лебедев сделал 17 мая 1899 г. в Физическом обществе Лозанны). Этот результат поставил его в ряд первых (по научной значимости и мастерству проделанной работы) физиков-экспериментаторов мира и привел к присуждению ему академической премии имени профессора С. А. Иванова (1904)<sup>17</sup>, избранию

<sup>16</sup> Уже на следующий день, 7 октября 1899 г., газета «Московские ведомости» (№ 276, с. 5) сообщила о защите П. Н. Лебедевым диссертации в заметке под названием «Докторский диспут».

<sup>17</sup> Физико-математическое отделение академии, согласно § 19 положения о премии имени профессора С. А. Иванова, образовало особую Комиссию под председательством академика О. Л. Баклунда, в которую вошли академи-



его членом-корреспондентом Российской академии наук (1905) и почетным членом Королевского института Великобритании (1910)<sup>18</sup>. Он также дважды выдвигался на получение Нобелевской премии по физике (в 1905 г. – О. Д. Хвольсоном, в 1912 г. – В. Вином), причем в 1912 г., в год своей смерти, – вместе с А. Эйнштейном и Г. А. Лоренцем<sup>19</sup>.

## 2. «ФАБРИКА МОЛОДЫХ ФИЗИКОВ» П. Н. ЛЕБЕДЕВА<sup>20</sup>

*Плодотворная научная деятельность обусловлена не только личными занятиями учёного, но и созданием школы для подготовки учёных работников.*

П. Н. Лебедев

Преподавательская и научная деятельность П. Н. Лебедева в Московском университете началась осенью 1891 г. ассистентом в физической лаборатории (студенческом практикуме) профессора Александра Григорьевича Столетова. В 1896 г. П. Н. Лебедев при поддержке А. Г. Столетова был избран приват-доцентом кафедры физики, а спустя четыре года, после внезапной смерти Александра Григорьевича и защиты докторской диссертации, он в ранге экстраординарного профессора стал заведовать этой кафедрой (1900).

Как отмечал П. П. Лазарев, «лекции Лебедева были великолепно обставлены экспериментально, все опыты блестяще удавались, и у слушателей навсегда оставалось в памяти воспоминание об изумительных сложнейших экспериментах, иллюстрирующих излагаемое явление. Чтобы представить себе, до какой виртуозности в лекционных демонстрациях доходил Лебедев, можно указать, что, начиная со съезда естествоиспытателей и врачей в 90-х годах, Лебедев ежегодно показывал весьма трудные для того времени опыты с электромагнитными волнами» [17]. Тем не менее, общефизический курс лекций Лебедев читать не любил – главным образом из-за состояния здоровья. Его «коньком» были специальные курсы и руководство практикантами. Со временем развивавшиеся сердечные заболевания делали невозможным продолжительное нахождение Петра Николаевича как в душном помещении, так и на холоде – у него начинались жестокие сердечные приступы. Болезнью объясняются его регулярные поездки за границу на лечение, где вопреки всему он старался совмещать «полезное с приятным» – встречался и переписывался с физиками, готовил публикации своих учеников для издания в немецких научных журналах.

Из Германии Лебедев привез составленный им самим план научных работ, который включал и вопрос об «электромагнитных и световых волнах», и постепенно стал реализовывать парадигму (во всяком случае, так сейчас это воспринимается) коллективной работы в области физике по взаимосвязанным научным направлениям, что привело в итоге к созданию первой в России научной физической школы. Уже в первые годы пребывания в Москве Петр Николаевич начинает привлекать студентов, способных к научной работе. П. П. Лазарев писал [7]:

*«Сознание необходимости таких работ возникло у Лебедева очень рано – в этом отношении Лебедев является яркой иллюстрацией того типа ученых, которых В. Оствальд называет романтиками. Рано развившись умственно, богато одаренный от природы, с чрезвычайно быстрой реакцией на окружающее, Лебедев еще в молодости почувствовал, что масса вопросов и идей, которые ему*

---

ки М. А. Рыкачев, А. М. Ляпунов, Б. Б. Голицын и А. А. Белопольский, которая 29 декабря 1904 г. и «предложила Отделению назначить премию имени профессора С. А. Иванова профессору физики Московского университета Петру Николаевичу Лебедеву за его выдающиеся экспериментальные исследования по вопросу о световом давлении» [4].

<sup>18</sup> Чествование П. Н. Лебедева по поводу его избрания членом Лондонского королевского института состоялось в Обществе любителей естествознания, антропологии и этнографии 5 апреля 1911 г. и зафиксировано в Трудах Отделения физических наук Общества [4, с. 108].

<sup>19</sup> 12 ноября 1912 г. Нобелевская премия по физике за 1912 г. была присуждена Густаву Далену за изобретение автоматических ацетиленовых горелок для световых маяков и буев [30, с. 346].

<sup>20</sup> При рекомендации В. Д. Зёрнова в профессора Саратовского университета в мае 1909 г. П. Н. Лебедев написал члену Совета министра народного просвещения Николаю Николаевичу Шиллеру так о своей работе в Московском университете: «За пять лет я тут наладил фабрику молодых физиков... У меня сейчас работает 18 человек на разные темы» [5, письмо 369].

приходят в голову, подавляет его, не дает ему необходимого покоя для своей работы, и он начинает стремиться сознательно освободить себя от этих идей передачей тем своим ученикам. Еще в 1893 г., незадолго до того времени, когда он взял под свое руководство несколько практикантов, он писал в дневнике: «Обилие мыслей и проектов не дает мне спокойного времени для работ». Вначале, не имея самостоятельной лаборатории, Лебедев наладил специальные исследования в лаборатории проф. А. П. Соколова, и в это время под его руководством делали работу 6 специалистов. Вскоре после переселения в новый физический институт университета, когда Лебедев получил в заведывание лабораторию, их число удвоилось».

Аналогичные воспоминания оставил и Н. А. Капцов [18]:

*«Своих учеников Петр Николаевич в те годы вербовал среди студентов, занимавшихся в практикуме. Он следил за теми из них, относительно которых было известно, что они хотят специализироваться по физике. Если ему случалось приезжать в лабораторию в часы занятий общего практикума, он вступал с этими студентами в беседу, стараясь выяснить, насколько сознательно они выполняют полученные экспериментальные задания, каково их общее развитие, как они разбираются в вопросах физики. И если он находил среди них молодого человека с подходящими данными, то приглашал его проводить “специальную работу” под его, Лебедева, руководством. Таким образом, он производил как бы тот отбор, который имеет теперь место при приеме в аспирантуру. Читавшиеся им в те годы с большой охотой и увлечением факультативные курсы (“Современные задачи физики”, “Прохождение электрического тока через газы” и другие) были направлены на то, чтобы возбудить в слушателях стремление к научному исследованию и показать им задачи и методы этого исследования. При чтении этих курсов и в лабораторных беседах Петр Николаевич не раз предупреждал слушателей не принимать на веру все то, о чем сказано в толстых учебниках. Он считал, что чересчур гладкое изложение в них материала затушевывает противоречия и неясные, еще не разрешенные вопросы, не стимулирует научную мысль, научное исследование. Не раз он говорил: “Приступая к научной работе, берите за отправной пункт не то, что сказано в толстых учебниках, а оригинальные научные работы по тому вопросу, который вы собираетесь исследовать”».*

К 1904 г. во дворе старого здания Московского университета на Моховой было завершено продолжавшееся 6 лет строительство трехэтажного здания Физического института по проекту архитектора К. М. Быковского. Здесь для научной лаборатории П. Н. Лебедева было выделено нижнее полуподвальное помещение, получившее вскоре название «лебедевского подвала», удобное для размещения чувствительных приборов, и две большие комнаты на втором этаже для личных работ (всего свыше 400 кв.м). Самую большую комнату нижнего этажа отвели под мастерскую, в которой постоянно работали несколько практикантов.

Для поступления в лебедевский коллектив непременным условием было качественное выполнение работ общего практикума и хорошая сдача экзамена по общему курсу физики. В число практикантов могли попадать студенты третьего и даже второго курса. Их число быстро возрастало, и к 1910 г. оно достигло 30 человек. «К старым сотрудникам Лебедева – П. П. Лазареву, Т. П. Кравцу, А. К. Тимирязеву, В. Д. Зёрнову, Н. А. Капцову, В. К. Аркадьеву, А. Б. Млодзеевскому, В. И. Романову, Н. К. Шадро и другим присоединилось много молодежи: К. А. Леонтьев, С. И. Вавилов, С. Н. Ржевкин, Б. В. Ильин и др.» [19]. Так, в 1905 г. в лаборатории одновременно велось около десяти научных работ начинающими молодыми физиками. В 1910 г. в ней насчитывалось уже 1229 приборов, многие из которых сделаны самими сотрудниками лаборатории, и велась большая серия работ по идеям Лебедева [4].

Отчётливо помню Петра Николаевича – бодрого, жизнерадостного, исполненного верой в преуспевание своей школы, – когда он привёл нас в числе шести или семи человек в первый раз в новую лабораторию, чтобы показать каждому комнату, в которой он будет работать. Он пересыпал свои слова шутками, расхваливал помещение, в котором было светло и просторно не в пример старому практикуму, где было очень тесно и темно. «Вот вам для вашей работы комната, где много аргона», – шутливо обратился он к одному из своих тогдашних учеников (Котовичу) и, видя его недоумение, пояснил: «Ведь в этой большой и высокой комнате много воздуха; следова-

тельно, много и аргона». С этого дня в Лебедевском подвале началась исследовательская работа.

*Н. А. Капцов*



Здание Физического института Московского университета, где при жизни П. Н. Лебедева располагалась его лаборатория.

С 1954 г. здесь находится Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН

### 3. ЛЕБЕДЕВСКИЙ СТИЛЬ НАУЧНОГО РУКОВОДСТВА

П. Н. Лебедев был истинным, сильным научным лидером, обладавшим богатым набором научных идей. В стиле и методах его работы с учениками это обстоятельство выходило на первый план. Биографические материалы, включая эпистолярное наследие, позволяют выявить следующие черты «лебедевского» стиля научного руководства.

1. Работы, которые П. Н. Лебедев поручал ученикам («практикантам»), были обязательно привязаны к его собственным главным научным направлениям; при этом он считал продуктивным перенесение методов исследований из одной области физики в другую.



П. П. Лазарев и П. Н. Лебедев, 1912 (фото из [24])

Все работы, которые выполняли ученики П. Н., стояли в ближайшем отношении к его собственным работам, часто являясь дополнениями к главной теме, которую вел сам П. Н.

Так, в период работ по световому давлению в лаборатории Лебедева возникла целая серия работ по давлению лучистой энергии. Пользуясь аналогиями, Лебедев предполагал существование такого давления и в звуковых колебаниях и в водяных волнах. Работы Альтберга и Капцова решили этот вопрос, а вслед затем работа Зернова позволила применить метод давления для абсолютных измерений силы звука наряду с диском Рэлея. Этот же метод давления позволил далее обнаружить самые короткие звуковые волны в воздухе и открыть затухание акустических волн в воздухе в зависимости от длины волны (Неклепаев).

Другая серия работ была тесно связана с электрическими колебаниями и является продолжением работ самого П. Н. в этой области; таким образом возникли работы по абсорбции электрических колебаний (Романов), по исследованию незатухающих волн (Щодро), работа по магнитным свойствам тел для частых колебаний (Аркадьев). Наконец, эти работы для видимого спектра завершились конструированием особого спектрографа для инфракрасных лучей, который позволял ав-

томатически отмечать поглощение в различных лучах спектра (Яковлев). Идея такого прибора возникла еще в конце 90-х годов и несколько раз менялась в представлении П. Н., пока, наконец, не получила ту форму, которая описана в *Physikalische Zeitschrift*. Лаборатория работала, таким образом, по определенному плану, по определенной программе, намеченной П. Н.

*П. П. Лазарев*

...[Ученики] всегда чувствовали, что их усилия не являются разрозненными и случайными, что те камни, которые они приносили и клали, на их глазах, по указанию зодчего, складывались в прекрасное здание, которое уже вырисовывалось своими строгими и классическими линиями.

*Т. П. Кравец*

Как разнообразны и как идейно связаны темы, которые получают ученики. Это единство идейности связывает учеников в контактную дружную группу, это единство идей, заложенных в работах учеников, с идеями работ самого учителя связывает учеников с учителем.

*В. Д. Зёрнов*

2. Темы научных работ, их актуализация, цель исследований, организация, состав оборудования, ход, условия проведения эксперимента, правила безопасного использования лабораторного оборудования, методика измерений и обработки экспериментальных данных и всё, что могло потребоваться в ходе работ, к кому и с какими вопросами нужно обратиться – от механика до профессора – и т.д. – всё это П. Н. Лебедевым тщательно обдумывалось; он же давал названия статьям своих учеников, правил их статьи, переводил на немецкий язык и представлял в журналы.

Весьма показательны в этом отношении инструкции студентам Альтбергу, Зёрнову, Златовратскому и Романову, которые Пётр Николаевич приложил к письму, написанному доценту Николаю Петровичу Кастерину 28.06.1901 [5, письмо 206; 16], и письмо Н. П. Кастерину от 02.12.1901 [5, письмо 222]. Поистине «алгоритмическую» степень лебедевской детализации студенческих заданий можно представить из следующего отрывка (всего инструкция содержит 25 пунктов!):

*«...При больших нагрузках **счетчиком** (спросите его у [лаборанта] Е. И. Брюсова) определите число оборотов двигателя: если оно будет меньше 1250–1300 оборотов в 1 мин, то двигатель перегружен – что для него опасно! Тогда попросите Н. П. Кастерина, чтобы он дал Вам двигатель, который стоит у меня (в 2/5 НР (л.с. – авт.)); тогда и с ним повторите измерения числа оборотов при большой нагрузке и **не перегружайте!!**» [5, письмо 206].*

Самые темы работ прежде, чем давались практикантам, многократно обдумывались самим П.Н., и он часто говаривал тем из своих учеников, которым приходилось самостоятельно руководить научными исследованиями, следующее: «Никогда не предлагайте начинающему такого вопроса, который не давал бы ясного ответа и путь для разрешения которого не был бы определенным». Это требование применял в еще более категорической форме и к своим темам сам П. Н., и поэтому среди работ, им предложенных, не бывало неудавшихся. В них не было экспериментирования наудачу, всегда была определенная цель и ясно выработанный метод для решения коренного вопроса.

*П. П. Лазарев*

3. Ученики при подготовке эксперимента должны были уметь самостоятельно выполнить часть работ в механической мастерской физического института.

Лебедевская школа была своеобразна. Специальных механических мастерских в университете не было, поэтому каждому практиканту приходилось создавать установку своими руками. Для обучения столярному, слесарному и токарному делу практикант прежде всего отправлялся на 1–2 месяца в мастерскую физических приборов, занимавшуюся изготовлением школьных физических приборов.

*В. Л. Лёвшин*

Подвальное помещение Петр Николаевич выбрал сознательно, считая, что оно лучше других частей здания ограждено от сотрясений. Несмотря на то что в первое время приборов было еще мало, а вместо столов нередко использовались ящики из-под оборудования, это была уже настоящая исследовательская лаборатория, не связанная, как раньше, с общестуденческим практикумом. Работать можно было в любые часы без ограничения времени и не мешая другим. В самой большой комнате лаборатории была расположена мастерская с токарным станком, большим слесарным верстаком и необходимым набором инструментов. Все работы в этой мастерской, по мысли Лебедева, должны были выполняться для себя его

ученики. Овладение ремесленными навыками Лебедев считал необходимым для каждого физика-экспериментатора. Только в случае очень сложной аппаратуры привлекался механик, работавший в личной лаборатории Лебедева. Стеклодува также не было. Каждый работающий должен был научиться паять трубки и собирать установки, требующие стеклянной аппаратуры.

*Н. А. Капцов*

4. Ход выполнения работ четко контролировался П. Н. Лебедевым; их исполнители могли в зависимости от обстоятельств подвергнуться резкой критике, получить одобрение, а также помощь в виде проясняющих ситуацию пояснений, расчетов и «инструкций».

Чтобы быть в курсе всех работ своих специалистов, П. Н. должен был подолгу обдумывать детали этих исследований, и мне часто приходилось заставить П. Н. далеко за полночь за обсуждением работ его практикантов. Уезжая за границу для отдыха, П. Н. часто не мог удержаться и посылал одно за другим письма, в которых указывал на необходимые дополнения к работе или на какие-либо изменения в ней.

*П. П. Лазарев*

Он требовал от каждого из своих учеников сознательного отчета обо всем проделанном. Сильно, подчас даже резко, пробирал он за допущенные промахи, за недостаточно обдуманые шаги в эксперименте. Но делал он это с единственной целью поднять работу данного ученика на более высокий уровень. Поэтому обижаться на него за резкость выражений было невозможно.

Петр Николаевич, прежде всего, требовал, чтобы каждый из работавших в лаборатории строго продумывал весь план своей работы. Но этот план исследовательской работы должен был быть не застывшим и раз навсегда установленным, а деятельным и живым. Как только в ходе исследования выяснялись какие-либо новые данные, Петр Николаевич после короткого раздумья оживлялся и предлагал новое, не предусмотренное прежним планом, направление работы. Ему тут же приходило в голову множество свежих мыслей. Он увлекался ими, рисовал перед молодым исследователем новые широкие горизонты, увлекал его своим энтузиазмом. В эти минуты он, может быть, больше чем в любом другом случае передавал своим ученикам крупицу столь ценного у него умения, выражаясь словами Кундта, «физически мыслить», посвящал их в тайны своего творчества.

*Н. А. Капцов*

Все, что способствовало научной деятельности в лаборатории, встречало со стороны Лебедева самый живой отклик. Он затрачивал без всякого колебания и силы и время для улучшения научной стороны деятельности лаборатории. Так, например, Лебедев часто не только создавал схему прибора для исследований своего практиканта, не только разрабатывал идею исследования, но и вычерчивал весь прибор для передачи его в мастерскую. На все это у Лебедева уходила масса времени, и, естественно, являлось иногда желание отделаться от этих мелких работ и посвятить себя тем обширным и крупным задачам, которые привлекали его внимание.

Попав в лабораторию Лебедева, всякий, даже малоспособный человек мог рассчитывать с его помощью закончить работу, причем все самое важное, самое существенное в работе было обдуманно, вычислено и сконструировано Лебедевым.

*П. П. Лазарев*

... Его всегда интересовало, насколько тот или иной из его учеников освоил умение работать своими руками. Все присутствовавшие жадно прислушивались к тому, что он говорил о новейших научных и технических достижениях, которые он всегда узнавал из первоисточников, а также к его оценке текущих событий университетской жизни. В этой оценке он всегда выступал, как противник рутины и чиновнического, бюрократического отношения к научным исследованиям, от кого бы оно ни исходило. Беспощадно высмеивал он людей с мирозерцанием чиновников, которые не хотели понимать, что истинная наука не может существовать без постоянного движения вперед, а, в частности, физика – без глубокого экспериментального исследования.

*Н. А. Капцов*

П. Н. с исключительным интересом относился к работам своих учеников и посвящал нам много времени, однако иногда он все же бывал очень несдержан. <...> Вначале я не понимал, что эти вспышки были результатом желания П. Н. во что бы то ни стало получить – и как можно скорее – результаты работы, которой он сам глубоко заинтересован. <...> Если П. Н. обрушивался на меня, я спокойно давал ему выкипеть, а когда он успокаивался, – он очень часто видел, что нашумел по пустякам; тогда он говорил: «Ну, сегодня я нашумел зря, но примите это на будущее время, – все равно вы в чем-нибудь наврете». Чем больше мы работали, тем больше убеждались в том, что П. Н. нашими работами заинтересован не меньше собственных и по-своему нас всех любит и радуется нашим успехам. Общению с учениками вне работы П. Н. уделял также много времени и внимания. Придет П. Н. в рабочую комнату, говорит долго и интересно о работе, дает ценнейшие указания, находит выход из затруднительного положения, а потом беседа перейдет уже на другие темы, и рассказывает П. Н. о своей жизни, о своих работах и встречах, вызывает на откровенность ученика, и дружеская беседа затя-

живается до позднего часа. <...>

Когда П. Н. уезжал отдыхать и лечиться за границу, он не переставал руководить нашими работами и в длинных подробных письмах с чертежами и расчетами давал указания и направлял работу учеников.

*В. Д. Зёрнов*



На фото [24] – сотрудники лаборатории П. Н. Лебедева. Стоят (слева направо): К. А. Леонтьев, Т. К. Молодой, П. В. Шмаков, Н. И. Февралев, С. И. Вавилов, А. С. Беркман, С. Я. Турлыгин, Н. В. Белоусов, Н. Я. Селяков. Сидят (слева направо): Э. В. Шпольский, А. И. Акулов (механик П. Н. Лебедева), А. Г. Калашников, В. К. Аркадьев, П. П. Лазарев (за столом; возглавлял лабораторию после смерти П. Н. Лебедева), М. Н. Чулрова, Н. К. Щодро, С. Н. Ржевкин

5. Виды творческого содружества между ученым и его учеником могут быть разными, они зависят от интеллектуальных особенностей и черт характера представителей обеих сторон, понимания (осознания) своей роли в «тандеме». П. Н. Лебедев выстраивал к каждому ученику *индивидуальный подход* и в случае необходимости оказывал *непременную психологическую поддержку*. «Инструкцию студенту Альтбергу» [5, письмо 206], написанную П. Н. Лебедевым в 1901 г., полезно прочитать и в наши дни – как теми, кто только вступает на путь научного творчества, так и теми, кто принимает на себя функции и обязанности научного руководителя.

... Вы хорошо и с энергией работаете, покуда всё идет по маслу, но достаточно какой-нибудь заминки, чтобы у Вас опустились руки, – этот недостаток лежит в Вашей неопытности: работ, идущих без заминки не существует, к этому надо быть всегда готовым и относиться к ним спокойно. Теперь у Вас принципиальных затруднений нет; уже и достигнутого достаточно, чтобы начать измерять звуковое давление; есть полная уверенность, что Вы сможете закончить работу. Теперь все сводится к тому, чтобы возможно лучше ее закончить – а в этом направлении пределов нет; надо поэтому задаться наперед известной границей. Я считаю работу *вполне* хорошей, если Вам удастся определить абсолютное отношение давления и Рейлеевского кружка с точностью до  $\pm 25\%$ . Я говорю это не зря, а вполне отдавая себе отчет о всех трудностях, которые встретятся Вам; для работы, впервые определяющей это отношение, эта точность вполне достаточна; да и в настоящее время в акустике совсем нет абсолютных измерений интенсивности, даже нет удобного способа определять порядок величины её, а поэтому потребности в большей точности сейчас нет.

*Из Инструкции П.Н. Лебедева студенту Альтбергу*

...Весной 1911 г. прибор, на котором я должен был работать, был заказан П. Н. механику А. И. Акулову. Когда прибор был готов, мне предстояло выкачать из него воздух. А это представляло большие трудности, так как прибор состоял из металлических и стеклянных частей; там, где стеклянные трубки были вставлены в металлические, часто возникала течь, которую не легко было заделать. После выкачивания воздух довольно быстро натекал обратно. Пришлось разбирать весь прибор и, собрав его вновь, тщательно покрывать лаком – раствором шеллака в спирте, тщательно профильтрованным\*. Работа тянулась месяцами. В это время П. Н. приходил ко мне в лабораторию каждый день и всячески пытался ободрить меня. Наконец, это было весной 1911 г., П. Н., зайдя в лабораторию без меня и взглянув на манометр, увидел, что течь прекратилась. Тогда он взял визитную карточку, проткнул её карандашом и надел на окуляр трубы, через которую я наблюдал поворот крутильного прибора. На карточке были карандашом написаны буквы р. f. (*pour féliciter*, чтобы поздравить).  
*А. К. Тимирязев*

\* Этим указанием я обязан П. Н. Он объяснил, что при фильтрации отделяется осадок, а именно этот осадок, если его не отфильтровать, сообщает плёнке шеллака хрупкость, и тонкий слой шеллака легко трескается. Этот пример показывает, насколько тонко знал Лебедев технику физического эксперимента.

6. «Творческое созревание» учеников П. Н. Лебедева проходило на его знаменитых научных семинарах (коллоквиумах), на которых рассматривался широкий круг актуальных физических проблем.

Раз в неделю лица, работавшие под руководством Лебедева, и некоторые из более старых работников Физического института собирались на коллоквиум, который он проводил регулярно. Начало этих коллоквиумов было положено еще в столетовском помещении физической лаборатории за круглым столом, стоявшим в библиотечной комнате. В коллоквиумах принимали участие на равных правах работавшие у Лебедева студенты, старшие работники «лебедевского подвала» и сам Петр Николаевич. Все были обязаны готовить и докладывать рефераты по текущей литературе. Так как эта литература в подавляющей массе была на немецком и английском языках, то участие в коллоквиуме заставляло основательно овладеть умением читать литературу на этих языках. Своими вопросами к докладчику, своими всегда интересными и меткими замечаниями Петр Николаевич оживлял дискуссию и заставлял всех присутствующих принимать активное участие в обсуждении. Большим праздником для каждого физика, работавшего под руководством Лебедева, был тот день, когда после долгой и упорной работы ему разрешалось сделать на коллоквиуме доклад о результатах собственного исследования.

*Н. А. Капцов*

А как интересен был П. Н. на еженедельных коллоквиумах, где по каждому вопросу, по поводу каждой доложенной работы можно было услышать от него интереснейшую критику, в которой проявлялся его колоссальный опыт, его громадные знания, его блестящая интуиция и талант. Но не менее интересен бывал П. Н. и в «Post-коллоквиуме», когда он со всей компанией учеников отправлялся после коллоквиума в ресторанчик «Альберта Ивановича» (на Дмитровке, против театральной конторы, где собиралась театральная богема), за кружкой пива беседовал он с нами – начинающими учеными – как с друзьями, рассказывал нам о своей юности, о своих учителях – Гельмгольце, Кундте, о путешествиях по ледникам Швейцарии, об университетских делах – успехах и огорчениях.

*В. Д. Зёрнов*

На этом же первом коллоквиуме я был поражен колоссальными, энциклопедическими знаниями Лебедева по экспериментальной физике. Не было вопроса, затрагиваемого докладчиком, который Лебедеву не был бы знаком и по поводу которого он не сделал бы нескольких замечаний. Интерес к коллоквиуму по мере его развития рос, и его посещали не только все работники лаборатории Лебедева, но и все работающие в Москве физики. В течение 10 лет, когда мне приходилось посещать эти собрания, перед слушателями прошли все современные крупные вопросы физики. Учение о газовых разрядах, развитие радиоактивности, рентгеновские лучи, учение о черном теле, тепловая теорема Нернста – все это находило отражение в докладах на коллоквиумах; большим праздником было каждый раз выступление с докладом самого Лебедева. Обычно для доклада он выбирал какой-нибудь особенно важный в данный момент вопрос и этому вопросу посвящал более половины всего коллоквиума. Его доклады вызывали оживленные дискуссии, в которых принимали участие все присутствующие.

Меня с самого начала поразило, с каким терпением Лебедев выслушивал высказывания молодых физиков, отстаивавших иногда заведомо неправильную точку зрения. Эта черта, несомненно, обладала большой притягательной силой, привлекавшей к Лебедеву симпатии молодежи.

*П. П. Лазарев*

Большое значение П. Н. Лебедев придавал изучению современной научной литературы. Он сам читал курс современных проблем физики, имевший большой успех. На каждой лекции П. Н. рассказывал о трех-четырёх наиболее интересных работах, вышедших в последнее время. Той же цели служил коллоквиум, организованный П. Н., но здесь действующими лицами были уже практиканты.

*В. Л. Лёвшин*

7. Публикация научных работ учеников П. Н. Лебедева непременно производилась и в отечественных, и зарубежных изданиях; причем статьи для ускоренной публикации за рубежом (за авторством, повторим, учеников) писал, уточнял, переводил на немецкий язык (с последующей правкой корректуры) сам Пётр Николаевич!

Он не позволял ни делать доклад, ни посылать работу в печать, если находил ее в чем-либо незаконченной или если она не была литературно хорошо оформлена. Он всегда старался привить своим ученикам умение писать ясно и коротко. По его указаниям текст статьи перерабатывался автором по нескольку раз. Бывало и так: «Все это хорошо, – говорил он, просмотрев третий или четвертый вариант статьи, – Вы выполнили мои указания. Но все, что Вы написали в таком-то разделе, нужно только для Вас; для читателя Вашей статьи это не имеет значения. Вычеркните этот раздел и, вообще, сократите статью. Длинных статей сейчас никто не читает». Особенно строг был Петр Николаевич в своих требованиях к оформлению чертежей. Но его критика и его указания никогда не были абстрактны. Указывая, как надо написать статью, он сам набрасывал план, вступительные фразы к отдельным разделам, эскизы чертежей. После одобрения последнего варианта статьи Петр Николаевич обычно сам переводил ее на немецкий язык. Таким образом, одновременно с печатанием ее в русском журнале статья направлялась им в «Annalen der Physik» с сопроводительным письмом, содержащим просьбу корректуры направлять лично ему.

*А. Н. Капцов*

Многоуважаемый Владимир Дмитриевич!

Посылаю Вам корректурный оттиск Вашей первой статьи – его Вы можете оставить себе на память, так как по дубликату я корректуру сделал и отослал в типографию. По этому оттиску сделайте русский перевод, и осенью, когда я возвращусь, я его отошлю в Петербург: печатание статьи по-русски в Физ[ико]-Хим[ическом] Журнале никакого научного значения не имеет, так как все, не знающие немецкого языка, не знают и физики, но я, скрепя сердце, мирюсь с печатанием *переводов* по-русски, так как они облегчают русским студентам на первых порах знакомиться с *образчиками* научной литературы. Незнание цивилизованного языка, с таким успехом культивируемое в российских гимназиях, в значительной степени способствует пребыванию российской интеллигенции в диком состоянии и дает русскому студенту «моральное» право наукой не заниматься; систематически лишать его этого права – одна из задач Физического института.

Разных задач у Физического института много – к числу их принадлежит – как это возможно только в России – и борьба с *неряшливостью*, которую я не умел и не собираюсь терпеть в научных вопросах, так как для меня такая неряшливость – резкая характеристика автора ее как ученого: с обсуждаемым вопросом автор должен срастись так, чтобы он и его работа были одно целое, он должен про себя и для себя перепробовать все возможные методы трактовать вопрос.

*Из письма П. Н. Лебедева В. Д. Зёрнову, 04.08.1904*



8. П. Н. Лебедев, строго относясь к своим ученикам в содержательной стороне деле, не придавал особого значения некоторым формальностям, помня по собственному опыту об их излишней обременительности.

В этом отношении характерен случай с магистерским экзаменом П. П. Лазарева. Экзамен проводили А. П. Соколов (теоретическая физика) и П. Н. Лебедев (экспериментальная физика). Первым предложил вопрос П. Н.: «Не знаете ли Вы, Петр Петрович, что-нибудь о гидравлическом прессе?» Изумленный вопросом, Лазарев ответил кратко в самых общих чертах. А. Н. Соколов запротестовал: «Петр Николаевич, может быть, Вы спросите что-нибудь более современное?». «По экспериментальной физике я кончил, спрашивайте по теоретической».

*В. Л. Лёвшин*

9. П. Н. Лебедев вдохновлял и нацеливал своих учеников на развитие технических приложений физики, на подготовку новых поколений ученых и инженеров.

Сам великий ученый и исследователь, он хотел исследовать все подробности явлений, которые занимали его, он хотел видеть эти явления примененными к практике и он собирал вокруг себя учеников, которым щедро раздавал свои идеи. Он сумел всколыхнуть в нас то, что было в нас, может быть, глубоко заложено, он умел во всяком случае привить нам любовь к науке и энтузиазм, которого хватает нам на всю жизнь, который и мы, по мере наших сил и способностей, передаем нашим ученикам.

*В. Д. Зёрнов*

В своих беседах с руководимыми им молодыми физиками Петр Николаевич касался не только непосредственных вопросов данной работы. Он говорил о новых достижениях в области физики, ставших ему известными благодаря его обширной переписке с выдающимися представителями этой науки, а также касался и той цели, для которой он готовил своих учеников. Он говорил: «Продолжайте работать так, как Вы работаете. Не смущайтесь тем, что Ваши результаты кажутся мало значащими. При упорной работе Вам удастся сделать и что-либо крупное («поймать Слона», как он выражался). Имейте в виду, придет время, когда физики в России будут нужны». Петр Николаевич видел в занятии наукой не только одно безотчетное стремление удовлетворить жажду знания, но он лучше многих своих современников понимал, что техника не может двигаться вперед без науки, а наука без техники. Интерес к новейшим достижениям последней он старался привить и своим ученикам.

Отметим еще одну черту в деятельности П. Н. Лебедева как руководителя школы. Петра Николаевича интересовали не только его непосредственные ученики. Он внушал этим ученикам мысль, что они должны продолжать дело привлечения молодежи к научной работе в дорогой ему области. Такие заветы он давал, отпуская А. Р. Колли на работу в Варшавском университете и В. Д. Зернова в Саратовском. Когда около 1910 г. число работавших в «лебедевском подвале» лиц возросло до 35, он передал непосредственное руководство некоторыми из них Петру Петровичу Лазареву. Таким образом, еще в недрах лебедевской школы возникла новая школа.

Петр Николаевич Лебедев учил руководимых им начинающих физиков «физически» работать, он помогал им усвоить все тонкости экспериментального искусства, он учил их глубоко продумывать вопросы физики, учил пользоваться литературой, учил излагать свои мысли на бумаге, учил плановости в работе; внушал им сознание обязательности научной работы для ученого. Он вдохновил многих из них на всю жизнь своим необыкновенным талантом и необыкновенным обаянием своей личности и направил их работу по определенному руслу в той или иной области физики.

*Н. А. Капцов*

10. П. Н. Лебедев держал всегда своих учеников «в поле зрения» и оказывал им поддержку в их дальнейшем жизнеустройстве. Яркий пример такого внимания будет описан в следующем разделе.

\*\*\*

Как представляется, свои принципы, стиль и методику научного руководства Лебедев буквально «выстрадал» при подготовке собственной диссертации. Свою научную мощь он отчетливо сознавал<sup>21</sup> и понимал, что его путь к ученой степени и в науку в целом может оказаться не под силу

<sup>21</sup> Например, в конце декабря 1899 г. (начале января 1900 г. по новому стилю) Лебедев в одном из своих писем писал: «Меня теперь производят в профессора, хотя назначение это пять лет тому назад и для меня, и для университета имело бы гораздо больший смысл» (цит. по [5, с. 18]). Естественно, морально поддерживала П. Н. Лебедева и реакция

другим, запусти он их в «самостоятельное плавание», как это проделывал с ним учитель по Страсбургскому университету А. Кундт, и, возможно, он, помогая различным образом своим ученикам, хотел уберечь их от излишних разочарований, ввести в мир физики и как можно скорее получить желанный научный результат. В выкристаллизованном виде эта позиция П. Н. Лебедева отражена в его письме П. П. Лазареву [5, письмо 376]:

*«...Давая тему начинающему, т.е. взявшись за задачу формировать будущего ученого, мы должны совершенно ясно себе представить и свою нравственную ответственность перед данным лицом. Искалечить такого начинающего нет ничего легче: дать ему интересную тему, но такую, которая ведет к ряду неожиданных промежуточных трудностей, – он затянется на деталях, проработает больше известного срока, на опыте разочаруется – и дело готово. Конечно, из 20 случаев в 19 это будет не жалко, но сказать вперед, кого из 20 жалко потерять, – невозможно, а потому всех начинающих надо ставить в выгодные для них условия. Поэтому начинающему вы имеете нравственное право давать только такую задачу, вполне определенный и достижимый результат которой вы безусловно можете гарантировать (Nauheim 6/VII 09)».*

На практике «бережный» стиль руководства оборачивался для Петра Николаевича большими потерями времени и сил. В том же письме Лебедев писал:

*«Переходя к частностям, к отдельным конкретным темам, я думаю, что задание должно быть возможно просто: безусловно выгодно интересный вопрос не сразу схватывать в окончательной форме, а разбить работу на этапы и шаг за шагом идти вперед: как бы мала ни была тема, для новичка она колоссальна, и в интересах правильного и здорового укрепления в нем чувства самоуверенности – а воспитанию этого чувства должна способствовать первая работа – надо давать ясно сформулированную тему. Вот над этим вопросом руководителю приходится работать и думать всего больше; он должен иметь полную гарантию, что тему можно обработать, и должен знать и сам для себя выработать весь план работы в деталях. Конечно, искажения и технические промахи неизбежны, но следует всегда помнить, что бесплодное искажение или пробаование наобум страшно вредны для практиканта по тому психическому удручению, которое особенно сильно действует на неопытного в таких неприятностях».*

Медленное движение работ сильно удручало Лебедева, и он часто работал за практикантов, как об этом он писал Лазареву на Кавказ из Москвы еще в 1907 г. [5, письмо 332]:

*«Не думайте, что я в июне являюсь “неприкосновенным” — только пять дней назад уехали А и В, а сегодня и на будущее время остались С, D и E (здесь П.Н. указывает имена лиц, состоявших в то время его практикантами. – примеч. П. П. Лазарева). И я по своей бесхарактерности хожу к ним, заставляю Алексея для них работать, по вечерам думаю над их затруднениями — одним словом, не принадлежу себе. За это время я сделал открытие: я поглупел (одурел) от моей учительской деятельности, я завяз в повседневных пустяках; опыт показал, что для того чтобы работа шла скоро, я должен заботиться о всякой мелочи. В действительности я пытался за всех думать (и поэтому, может быть, производил впечатление находчивого руководителя) и, сам не замечая, так забился во всякие пустяки, что мой мозг отвык думать над большими задачами; он был утомлен мелочами, да и времени они не оставляли свободного».*

По-видимому, в какие-то моменты неудачных действий практикантов у Петра Николаевича, как говорится, опускались руки. В письме П. П. Лазареву от 6 июля 1909 г. имеются и такие строки:

*«Не думайте, что мне легко было смотреть, как они не могут справиться: мне все казалось, что я виноват, что не умею их учить – и только долго спустя я понемногу начинаю убеждать себя, что их выучить никто в мире не может, – а потому черт с ними!».*

---

научного мира на его работы. Так, в письме Лебедева к сестре из Парижа от 7 августа 1900 г. (в период работы Международного физического конгресса) есть такие строки: «На конгрессе совершенно неожиданно <... > меня избрали “rag acclamation” одним из четырех почетных генеральных секретарей – я попал в первый десяток из тысячи членов». Спустя четыре дня, в новом письме, Петр Николаевич сообщает: «Делал мое сообщение и имел успех гораздо больше, чем ожидал – мое сообщение принадлежит к лучшим» (*цит.* по [5, с. 21]).

Но вот все же иная другая ситуация, говорящая об объективности научных оценок П. Н. Лебедева. О самом Петре Петровиче Лазареве (1878–1942) Лебедев писал в самых превосходных тонах: «... Развитие Петра Петровича... протекало на моих глазах и в моей лаборатории... мне стало ясно, что передо мной... человек с очень большим талантом, огромным запасом знаний и неистощимой научной фантазией... По моему мнению, П. П. Лазарев – огромная сила: он и талантливый учёный... и превосходный учитель... вдобавок он умный и хороший человек... Если сравнивать его с другими физиками, то позвольте мне сделать это сравнение со мною самим: со спокойной совестью я могу сказать, что П. П. Лазарев значительно крупнее меня и по таланту как учёный, и по способности организовать школу учёных работников» (*цит.* по [25]).

Найти такое положение, когда руководитель и сам может работать, и в то же время следит за работой практикантов, – это и была та задача, как отмечает П. П. Лазарев, которая постоянно занимала Лебедева.

Если вам случится проходить по Никитской, загляните в монументальную арку выходящей сюда части Старого университета. В глубине двора вы увидите трехэтажное красное здание с небольшой вышкой. Это бывший Физический институт, – один из центров русской науки, известный не только за пределами Никитской, но и далеко за пределами России. Это – одна из двух лабораторий, доставляющих в эту минуту почетную известность русской науке... в подвальном этаже – в «Лебедевском подвале», как его давно окрестили те, кому дорога родная наука, – бьется пульс настоящей, не школьной науки, – не той, которая только поминает заслуги прежних годов и веков, а той, в которой выражается жизнь сегодняшней науки, – завтрашной техники.

Здесь Лебедев находит время руководить работой 20–25 молодых исследователей, внося в их труд избыток своего творчества, своей изумительной изобретательности. Руководить 25 работами – это даже не то, что вести шахматную игру разом с 25 игроками. Хотя противник здесь один и тот же – природа, но ни одна игра не похожа на другую: каждый раз приходится изобретать новые ходы, новую тактику. Помнить, на чем остановился каждый исследователь, не только найти в каждом случае и дать необходимое указание, но и вовремя предупредить неумелый шаг и предотвратить потерю времени, а главное – уметь сообщить примером и советом то, “чем люди живы”, тот энтузиазм к научному труду, без которого нельзя быть истинным ученым, – дано не всякому. <...> Всякий работающий – свой слесарь и столяр, оптик и стеклодув, порою виртуоз, какого не найдешь ни в одной мастерской самой известной фирмы. Зато какой бодрый, независимый дух, какую уверенность в свои собственные силы вселяет этот одухотворенный физический труд!

*К. А. Тимирязев*

\*\*\*

Последние месяцы жизни Петра Николаевича Лебедева доставили ему много волнений и забот. В 1910-е годы деятельность российских университетов, в частности вопросы их автономии, определялись университетским уставом 1884 г. и «Временными правилами об управлении высшими учебными заведениями Министерства народного просвещения» от 27 августа 1905 г. В сентябре 1910 г. Л. А. Кассо, сменивший на посту министра народного просвещения А. Н. Шварца, отозвал из Государственной думы законопроект о непопулярном среди профессуры новом университетском уставе и созвал 16–18 декабря 1910 г. профессорское собрание по обсуждению устава [31]. Но в октябре 1910 г. активизировались антиправительственные выступления студентов, импульс которым придали похороны одного из лидеров кадетской партии, председателя Первой Государственной думы профессора С. А. Муромцева, а затем и смерть Льва Николаевича Толстого. Ответом на приобретенные существенный размах студенческие выступления стали правительственные постановления конца 1910 – начала 1911 гг., в которых «вся тяжесть ответственности» за студенческие беспорядки возлагалась на руководство университетов и профессорские коллегии, а также содержался запрет на студенческие собрания, не имеющие учебного и научного характера (при возникновении волнений надлежало вызывать полицию)<sup>22</sup>. Профессура в целом отнеслась к этим постановлениям негативно, что придало студенческим волнениям новый стимул.

<sup>22</sup> Постановление Совета министров от 11 января 1911 г. имело такое красноречивое название: «О недопущении в стенах высших учебных заведений студенческих собраний и вменении в обязанность полицейским чинам принимать быстрые и решительные меры против них».

Тем не менее, ситуация в Санкт-Петербургском и Московском университетах развивалась по разным сценариям. Если руководство столичного университета вело переговорный процесс со всеми сторонами с целью постепенного устранения полицейского надзора из университета, то в Московском университете ректор А. А. Мануйлов, его помощник М. А. Мензбир и проректор П. А. Минаков подали в отставку со своих постов, ибо, как информировал П. Н. Лебедев редактора журнала «*Physikalische Zeitschrift*» Ф. Крюгера, «полицейское управление по собственной инициативе взяло на себя поддержание порядка в помещениях университета, не подчиняясь ректору» [5, письмо 476]. Реакция министра Кассо была максимально жесткой: руководство Московского университета было уволено не просто с занимавшихся постов, а полностью из университета. А 3 февраля 1911 г. начался исход преподавательского состава из университета в знак поддержки прежнего руководства университета. В течение нескольких дней из университета ушли, по данным К. А. Тимирязева [6], 125 профессоров и приват-доцентов (один из них, правда, вскоре изменил свое решение).

6 февраля 1911 г. университет покинул и П. Н. Лебедев. Это решение далось ему крайне тяжело: несколько дней он мучительно размышлял о судьбе всего дела своей жизни, к которому были теперь причастны и его ученики. К тому же с уходом из университета он терял квартиру в Физическом институте, близость которой к работе, собственно, и давала ему возможность трудиться в лаборатории при его тревожном состоянии здоровья.

И все же последний год своей жизни П. Н. Лебедев смог достойно работать и вне стен университета. Это стало возможным благодаря беспрецедентной поддержке фондов, образованных на пожертвования двух российских подвижников науки и образования, благотворителей-патриотов Христофора Семёновича Леденцова (1842–1907) и Альфонса Львовича Шанявского (1837–1905), а также их семей<sup>23</sup>.

Созданное по духовному завещанию Х. С. Леденцова от 13 апреля 1905 г. «Общество содействия успехам опытных наук и их практических применений» на базе двух крупнейших учебных учреждений – Императорского Московского университета и Императорского Московского технического училища – могло распоряжаться процентами с капитала в 2 миллиона рублей, в его распоряжении были также серьезная недвижимость и крупные земельные владения, что в целом не уступало капиталу А. Нобеля<sup>24</sup>.

На одном из заседаний Общества весной 1911 г. «было заслушано ходатайство проф. П. Н. Лебедева об оказании поддержки в продолжении как его личных работ, так и тех 20 лиц, которые занимались под его руководством научными исследованиями в находившейся в его заведывании физической лаборатории Университета. Перерыв в его личных занятиях, последовавший по непредвиденным обстоятельствам, вообще не представляется непоправимым, так как ему открыты заграничные лаборатории, но чрезвычайно тягостно нарушение всего состава лаборатории, устранение коего и составляет главный мотив его ходатайства. В последовавшем обмене мнений было высказано пожелание сохранить в России выдающуюся научную силу, представляемую членом Лондонского Королевского Института Петром Николаевичем Лебедевым и обеспечить существование лаборатории как школы научных работников, которыми далеко не так богата Россия. В данном случае поддержка имеет особое значение, так как представляется возможным соединить те научные и творческие силы, которые составляют существо лаборатории и дают ей жизнь. Работы П. Н. Лебедева и его школы, кроме чисто научной ценности, имеют и серьезное практическое значение по своему отношению к задачам беспроволочной телеграфии и телефонии. По этим мотивам Совет постановил ассигновать 12 тысяч рублей на оборудование лаборатории и до 3 тысяч рублей на наём для неё помещения» [32].

О полученных средствах Петр Николаевич сообщает 20 мая 1911 г. в правление университета имени Шанявского, называет место (Мертвый (Пречистенский) пер., 20) и дату открытия лаборатории – 15 августа 1911 г., а также предлагает «причислить эту лабораторию к научным учреждениям университета», чтобы его слушатели смогли в ней работать [5, письмо 499].

Преподавательскую же деятельность бывшие профессора и приват-доценты Московского университета смогли, в частности, продолжить в Московском городском народном университете им.

<sup>23</sup> См. : Шноль С. Э. Герои, злодеи, конформисты российской науки. М. : Либроком, 2010. 720 с.

<sup>24</sup> Все эти средства были национализированы постановлением президиума ВСНХ от 8 октября 1918 г.

А. Л. Шанявского, открытого после больших хлопот в 1908 г. Согласно уставу, университет находился в ведении Московской городской думы и не входил в систему учреждений Министерства народного просвещения. Первые годы университет действовал в доме Шанявских на Арбате, 4 (по другим источникам – на Волхонке, 14), а в 1912 г. переехал в специально построенное здание (в его проектировании принимал участие А. А. Эйхенвальд) на Миусской площади.

П. Н. Лебедев подал в отставку и со всеми своими сотрудниками и учениками покинул Московский университет. Он перенес свою работу в Народный Университет им. Шанявского, помещавшийся на Волхонке в здании бывших Голицынских сельскохозяйственных курсов, где П. П. Лазарев заведовал кафедрой физики.

В физической лаборатории Шанявского начинали работать, кроме меня и С. И. Вавилова, еще многие молодые физики (А. Г. Калашников, Э. В. Шпольский, Т. К. Молодой, К. А. Леонтьев, С. Я. Турлыгин, Н. Т. Федоров и другие). По стенам зала физического кабинета мы строили индивидуальные фанерные кабинки, мастерили столы и полки, своими руками выполняли токарные и стеклодувные работы, бегали по магазинам и покупали материалы – таким образом создавались самодельные исследовательские установки. Сергей Иванович налаживал работу по изучению фотохимических процессов, а я – по изучению скачка температуры на границе твердого тела и разреженного газа.

Осенью 1911 г. вступила в строй лаборатория П. Н. Лебедева (в Мертвом пер., дом № 20), организованная на средства Общества им. Леденцова. Сергей Иванович и я перешли работать в эту лабораторию. В этом же доме поселились П. Н. Лебедев и П. П. Лазарев<sup>25</sup>.

*С. Н. Ржевкин*

Огромную популярность университету обеспечили свобода поступления, небольшая плата за обучение, а также высокий уровень преподавания, сопровождавшийся насыщенностью учебных планов и высокой требовательностью преподавателей. Как писал в газете «Русские ведомости» от 13 сентября 1912 г. заместитель председателя Попечительского совета университета Н. М. Кулагин, «быть преподавателем университета им. А. Л. Шанявского считают за честь выдающиеся ученые силы». В числе преподавателей университета были В. И. Вернадский, П. Н. Лебедев, П. П. Лазарев, С. А. Чаплыгин, Н. Д. Зелинский, И. А. Каблуков, В. А. Кистяковский, К. А. Тимирязев и другие известные ученые России. Университет обладал хорошей лабораторной базой, в которую входили физическая, кристаллографическая, биологическая лаборатории, лаборатория органической химии и количественного анализа. Примечательно, что в университете им. Шанявского возобновились «лебедевские» научные семинары, в которых принимали участие преподаватели различных высших учебных заведений Москвы и России.

В 1912 г., незадолго перед смертью, П. Н. Лебедев сделал карандашный эскиз лабораторных помещений для будущего Физического института Московского научного института. На его строительство потребовалось в общей сложности 225 тыс. руб. Здание было построено на Миусской площади, недалеко от университета имени Шанявского. В нем с 1 января 1917 г. стал функционировать Институт биофизики и физики. История строительства и первые шаги института подробно описаны академиком П. П. Лазаревым в первом выпуске журнала «Успехи физических наук» [33].

8 ноября 1911 г. П. Н. Лебедев опубликовал в газете «Русские ведомости» статью к 200-летию со дня рождения Михаила Васильевича Ломоносова [34]. Там есть и строки о важности научной и эпистемической преемственности различных поколений:

*«На примере своего учителя Вольфа Ломоносов видел, что плодотворная научная деятельность обусловлена не только личными занятиями учёного, но и созданием школы для подготовки учёных работников; в Марбурге Ломоносову стало ясно, что учёная сила немецкого университета кроется в преемственности знания <...> Если бы русское общество, вспоминая всё то, что оно получило в наследие от реформатора своего языка и своей умственной культуры, захотело не словом, а делом выразить признательность памяти Ломоносова, – оно могло бы это сделать, осуществляя заветную мечту первого русского учёного – создавая и обеспечивая в России такие центры нашей научной работы, в которых эта работа могла бы идти беспрепятственно. Эти научные центры, вне сомнения, дадут ряд важных и полезных работ, а самое их существование благотворно отзо-*

<sup>25</sup> См. : Ржевкин С.Н. Из воспоминаний о С. И. Вавилове // Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания. 3-е изд. М.: Наука, 1991. С. 160–163.

*вётся на жизни общества, поднимая и его самосознание, и его культурный уровень. Заботясь об успехах науки, общество будет заботиться о себе самом».*



Пётр Николаевич Лебедев

Я не встречал человека, в котором глубокий и творческий ум так гармонически сочетался бы с изумительной выносливостью в труде, а физическая сила и красота сливались с таким искрящимся остроумием и заражительной жизнерадостной веселостью.

**К. А. Тимирязев**

После смерти П. Н. Лебедева (1 марта 1912 г.), в газете «Русские ведомости» за 4 марта 1911 г. в заметке «Письмо в редакцию» 17 учеников Лебедева подвели итоги деятельности первой русской физической школы и ее влияния на развитие отечественной и мировой физики:

*«За короткое время, в течение которого [П. Н. Лебедев] занимает в Москве самостоятельное положение, он успел создать вокруг себя обширную научную школу. Его лаборатория превосходит едва ли не все существующие в мире по количеству ведущих в ней научных работ, что находится далеко не в соответствии с ее небольшими размерами и отпускаемыми на нее скромными средствами. В последнее время в ней велось до 30-ти научных работ, объединенных общей программой. Некоторые вопросы физики именно в московской школе, совместными трудами ее представителей, получили свое полное и исчерпывающее разрешение.*

*Плоды этой деятельности налицо: за короткое время существования лаборатории из нее вышло 5 докторских и магистерских диссертаций, свыше трех десятков других научных исследований. Ее питомцами уже замещены две университетские кафедры. Она же дала несколько десятков лаборантов, ассистентов, приват-доцентов и преподавателей высших учебных заведений как в Москве, так и в других университетских центрах» (цит. по [25]).*

Из научной школы П. Н. Лебедева – П. П. Лазарева вышли [12]: три академика – П. П. Лазарев, С. И. Вавилов, Н. Н. Андреев, четыре члена-корреспондента Академии наук СССР – В. К. Аркадьев, Т. П. Кравец, А. С. Предводителев, Н. К. Щодро, академик Академии педагогических наук РСФСР А. Г. Калашников, доктора наук и профессора – Е. В. Богословский, В. Д. Зёрнов, Б. В. Ильин, Н. А. Капцов, А. Р. Колли, П. Б. Лейберг, В. Л. Лёвшин, А. Б. Млодзеевский, С. Н. Ржевкин, В. И. Романов, Н. Я. Селяков, А. К. Тимирязев, Н. Е. Успенский, Э. В. Шпольский, П. С. Эпштейн, К. П. Яковлев, преподаватели и научные работники – В. Я. Альтберг, Ф. К. Курепин, Н. П. Неклепаев, К. А. Леонтьев, Т. К. Молодой, Г. Б. Порт, В. Е. Сребницкий, С. Я. Турлыгин, Н. Т. Федоров и др.

## 4. НАУЧНАЯ ШКОЛА П.Н. ЛЕБЕДЕВА В ИСТОРИИ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

*Пётр Николаевич Лебедев является  
одной из наиболее крупных фигур,  
давших направление всей моей жизни и деятельности.*  
В. Д. Зёрнов

Лебедевские принципы и методы научного руководства, как представляется, в должной степени воплотились во взаимоотношениях П. Н. Лебедева и его ученика «первой волны» Владимира Дмитриевича Зёрнова. В биографии Лебедева фигура Зёрнова носит определенный знаковый характер, ибо Зёрнов стал его первым учеником, который и защитил магистерскую диссертацию, и сделал почетную административную карьеру, став одним из профессоров-основателей, а затем и ректором последнего<sup>26</sup> открытого в царской России университета – Саратовского (1909 г.). К тому же опубликованные воспоминания [11, 20–22] и богатый архив В. Д. Зёрнова доносят до нас черты выдающейся личности его учителя.

Студентом физико-математического факультета Московского университета Владимир Зёрнов стал осенью 1897 г. Во время ректорства<sup>27</sup> в Московском университете его отца – профессора анатомии Дмитрия Николаевича Зёрнова, он прервал учебу<sup>28</sup>, но поскольку к тому времени он уже познакомился к Петром Николаевичем Лебедевым в физической студенческой лаборатории, то решил там заниматься по предложенной Лебедевым экспериментальной теме «Исследование изменения диэлектрической постоянной при переходе бензола в кристаллическое состояние». Это были первые шаги Зёрнова как экспериментатора, а предметом его гордости стало совершенное владение прибором Ф. Кольрауша [22, с. 73]. Новая тема исследования, сформулированная Лебедевым для Зёрнова, была связана с акустикой и называлась «Сравнение методов измерения силы звука в абсолютной мере». Эту тему нужно рассматривать в контексте развивавшегося Лебедевым научного направления по исследованию давления волн различной природы. Для Зёрнова же проблемы акустики стали центральными в дальнейших его занятиях.

В 1900 г. Зёрнов присутствовал на Всемирном физическом конгрессе, который проводился в рамках Всемирной выставки в Париже<sup>29</sup> и слушал выступление своего учителя. Всего на конгресс было заявлено около 80 докладов [35], которые к конгрессу были отпечатаны в виде отдельных оттисков, что оказалось весьма полезным для участников. Многие знаменитости физического мира съехались тогда в Париж<sup>30</sup>. Почетным председателем был лорд Кельвин. В русской делегации было «много молодежи» [35]. Зёрнов ехал с группой физиков Московского университета [22, с. 76], куда входил и талантливый изобретатель И. Ф. Усагин, ассистент кафедры физики. Знакомство с физиками Европы у Зёрнова не ограничилось мероприятиями конгресса. По пути на съезд он и его товарищи в Берлине побывали в физико-техническом институте (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) у

<sup>26</sup> Если не считать университетов, открытых в период Первой мировой войны: Ростовского (1915) – на базе эвакуированного Варшавского университета и Пермского (1916) – как отделения Императорского Петроградского университета. Кстати, в 1915–1916 гг. Саратовский университет «приютил» у себя преподавательский состав и студентов Киевского университета.

<sup>27</sup> Д. Н. Зёрнов был ректором Московского университета ровно год: с 8 августа 1898 г. по 7 августа 1899 г.

<sup>28</sup> Причиной «второгодничества» Зёрнова-младшего были студенческие волнения [22, с. 73].

<sup>29</sup> Всемирная выставка 1900 г. в Париже функционировала несколько месяцев – с 15 апреля по 12 ноября. Это была масштабная демонстрация достижений XIX в. в области науки, техники и искусства. Россия входила в число 35 стран-участниц, представивших национальные экспозиции, за которые она, кстати, получила 1 589 наград: 212 высших, 370 золотых, 436 серебряных, 347 бронзовых медалей и 224 почетных отзыва. Будущий символ Парижа – Эйфелева башня была построена за год до этого, к предыдущей (четвертой по счету) всемирной выставке в Париже 1889 г., не носившей «официальный» представительский характер. Золотой медали выставки 1900 г., наравне с Эйфелевой башней, был, в частности, удостоен железнодорожный мост через реку Енисей (см.: Енисейская губерния на Всемирной выставке в Париже. URL : <http://region.krasu.ru/article/335>).

<sup>30</sup> От России в работе конгресса участвовали академики Б. Б. Галицын и М. А. Рыкачев, профессора П. А. Зиллов (Варшава), Д. А. Гольдгаммер (Казань), Г. Г. Де-Метц (Киев), П. Н. Лебедев (Москва), Н. Д. Пильчиков, Ф. Н. Шведов (Одесса), И. И. Боргман, Н. А. Гезехаус, Н. Г. Егоров, С. Ф. Терешин, М. А. Шателен (Петербург), А. Е. Ефимов, Ф. Я. Капустин (Томск) и др. [35].

профессора Ф. Кольрауша, а также осмотрели электромеханический завод. В [22] приведено немало колоритных воспоминаний об этой поездке.

В 1900/1901 учебном году Зёрнов занимался главным образом в физической лаборатории и слушал специальные лекции по физике. В помещении старой лаборатории было тесно, и свою установку он соорудил в преподавательской комнате, проходной и холодной. Потом Лебедев «отвоевал» для В. Д. Зёрнова и его однокурсника В. И. Романова дополнительную комнату. Сохранились лебедевская «Инструкция студенту Зёрнову» по проведению экспериментальных исследований, удивляющая своей доскональностью, предусмотрительностью и знанием студенческой психологии [5, письма 206, 212, 222].

Весной 1902 г. Зёрнову предстояло сдать государственные экзамены за полный университетский курс математики (письменный и устный экзамены), курсы по механике (два экзамена), физике (два экзамена), астрономии и метеорологии. Кроме того, выпускники представляли два конспекта по избранной специальности. Тему одного сочинения – «Тепловая диссоциация» Зёрнову дал профессор Алексей Петрович Соколов, ученик А. Г. Столетова, Г. Гельмгольца и Г. Кирхгофа. Вторая, названная выше, экспериментальная тема выполнялась под руководством П. Н. Лебедева. Зёрнов писал в своих воспоминаниях:

*«В отличие от Лебедева Соколов абсолютно не интересовался данной мне работой, и для меня совершенно было очевидно, что из довольно толстой тетради страниц в 150, которую я дал ему, он едва ли прочел больше первой страницы. На полях первой страницы стояла какая-то непонятная галка и затем ни одной пометки во всем тексте. Когда же Соколов собирался поставить мне за сочинение удовлетворительную отметку, я настоял, чтобы он написал на тетради, что работа выполнена под его руководством, чего, конечно, вовсе не было. Пётр Николаевич Лебедев, напротив, моей работой интересовался» [22, с. 76].*

Лебедев предъявлял к работе Зёрнова весьма жесткие требования, но когда тот после окончания физико-математического факультета<sup>31</sup> обратился к нему с просьбой разрешить работать в его лаборатории независимо от того, будет ли он оставлен в университете «для приготовления к профессорскому званию» или нет, Лебедев свое согласие дал. Ситуация разрешилась для Зёрнова своеобразно: он был оставлен при кафедре физики, но без стипендии. Все же осенью 1902 г. Зёрнов был избран лаборантом кафедры физики для руководства лабораторными работами студентов в практикуме А. П. Соколова, т.е. стал преподавателем Московского университета.

Одновременно Зёрнов подрабатывал в гимназиях и вел «незамкнутый» образ жизни – увлеченно занимался музыкой под руководством специалистов, играл на скрипке в оркестрах и соло, посещал театры, поддерживал широкий круг знакомств в творческой московской среде, со знатными фамилиями. Естественно, это занимало время, но все же в 1904 г. Зёрнов добился первого научного успеха. Как он вспоминал, «Петру Николаевичу мои эксперименты, по-видимому, нравились. Он велел мне описать их и очень жестко критиковал описания, так что приходилось переделывать тексты несколько раз. По этому поводу я бывал у Петра Николаевича на квартире, когда он жил еще в своем доме на Маросейке» [22, с. 110].

П. Н. Лебедев представил работу В. Д. Зёрнова «Сравнение методов измерения звуковых колебаний в резонаторе» в Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете на учрежденную в 1887 г. премию имени В. П. Мошнина. Эта премия после выступления Зёрнова на представительном заседании Общества в Политехническом музее ему была

---

<sup>31</sup> Факультет В. Д. Зёрнов окончил с дипломом первой степени (по Университетскому уставу 1884 г. выпускникам выдавались дипломы двух степеней – первой и второй), «соответственно объему и качеству приобретенных знаний», «за подписью Попечителя округа и председателя комиссии, производившей испытание, и за скрепою Правителя канцелярии Попечителя» (Общий Устав Императорских Российских университетов 1884 г., ст. 81). В воспоминаниях Зёрнова есть любопытная фраза: «Диплома своего я никогда не видел. Он остался в архиве университета» [22, с. 92]. Можно предположить, что диплом переложили в личное дело Зёрнова как магистранта, поскольку ст. 86 названного Устава требовала наличие диплома университета при сдаче магистерских испытаний. Окончивших физико-математический факультет в тот год, по воспоминаниям Зёрнова, было около 25 человек, хотя поступало более трехсот.



присуждена<sup>32</sup>. Как говорилось в положении о премии, она назначалась «за самостоятельные научные исследования в области физики и химии, а также за выдающиеся изобретения и усовершенствования по практическому приложению этих наук»<sup>33</sup>.

Работу над магистерской диссертацией Зёрнов продолжил в 1906–1908 гг. События лета 1906 г. В. Д. Зёрнов так описал в своих воспоминаниях [1.20]:

*«Результатами моей первой работы П. Н. был доволен, я уже докладывал о ней на коллоквиумах, и П. Н., уезжая на лето за границу, взял русский текст с собой, чтобы перевести работу на немецкий язык и послать для печатания в “Annalen der Physik” – журнале, который задавал тогда тон всей физической литературе. Расстались мы друзьями. И вдруг в начале лета я получаю из-за границы исключительно резкое письмо от П. Н. с рядом эпитетов по отношению ко мне и к моей работе, едва ли не более красочных, чем слышал я от него при первом знакомстве<sup>34</sup>: я не привел какой-то формулы Вина, я небрежно составил таблицы, я еще что-то не так сделал... Тут я уж дал себе выкипеть и написал П. Н. письмо, которое начал несколько официально: “Глубокоуважаемый Пётр Николаевич! Любезное письмо Ваше от (такого-то числа) я получил и отвечаю Вам подробно по пунктам...”. В ближайшее время ответа я не получил, а к концу лета получил длинное ласковое письмо и заказной бандеролью корректурный оттиск работы, принятой для напечатания в “Annalen der Physik”<sup>35</sup>, с собственноручной надписью Петра Николаевича:*

*«Поздравляю Вас с первым, самым важным шагом начинающего ученого. До сих пор Вы только брали – теперь сами даете. Помните добрый совет: работайте много, сколько можете, но печатайте только тогда, когда вполне разобрались в вопросе, и излагайте только то, что важно узнать читателю-специалисту по данному вопросу. Чем короче и сжатее статья – тем больше читателей, тем больше проку. П. Л.»*

*Эта надпись интересна еще и тем, что дает понятие об отношении П. Н. к работе и к способам ее изложения.*

*Когда осенью мы встретились с П. Н. в Москве, он расцеловался со мной, еще раз поздравил с первым научным успехом и о “любезной” переписке не поминал...»*

Публикации первой статье Зёрнова в Журнале Русского физико-химического общества (ЖРФХО) сопутствовал инцидент, возникший в результате резкой критики П. Н. Лебедевым статьи «пробивного» физика Мышкина. «Анонимные цензоры» журнала пытались сгладить эту критику, но Пётр Николаевич в письме к редактору физической части журнала В. К. Лебединскому ([5, письмо 324]) категорически настаивал на включении в его отзыв слов о бессмысленности данной работы для

<sup>32</sup> Премия имени Владимира Петровича Мошнина была присуждена в 1897 г. Ивану Филипповичу Усагину в качестве поддержки его приоритета в изобретении промышленного трансформатора. Такой же премии были удостоены ученики Петра Николаевича – Т. П. Кравец (1901), В. Я. Альтберг (1902, 1907). Б. В. Ильин и В. Е. Сребницкий (1911) [4]. В денежном выражении премия первоначально составляла 300 руб.

<sup>33</sup> Правила для соискания премии имени В. П. Мошнина // Вестник опытной физики и элементарной математики. 1888. Вып. 59. С. 255-257. URL : <http://www.vofem.ru/ru/issues/1888/5/11/59/>

<sup>34</sup> «Первое знакомство» Лебедева и Зёрнова состоялось в физическом практикуме осенью 1898 г. Студент второго курса Зёрнов изучал в библиотечной комнате пособие Кольрауша (книги с круглого стола библиотеки выносить не разрешалось), оставив без присмотра в лаборатории парообразователь. «Вода в парообразователе закипела неожиданно скоро, и пар веселой струей выходил из отводного отверстия прибора, а я, не подозревая этого, мирно сидел за книжкой в библиотеке. – вспоминал Зёрнов. – Вдруг слышу резкий окрик: “Кто это тут пакостит приборы?” Подозревая, что это именно я “пакошу приборы”, так как в соседней комнате других практикантов в это время не было, я выскочил из библиотеки и у моего места увидел красавца-мужчину, который продолжал весьма неместно отзываться о виновнике бедствия. Заметив сразу, что никакой беды не произошло, я спокойно выслушал еще несколько замечаний, не оправдываясь и не возражая, так как некоторую оплошность я все же допустил, и отметил с удовлетворением в актив события, что знакомство с знаменитым Лебедевым все же состоялось, хотя не знаю, вспоминал ли впоследствии П. Н. о нашем первом знакомстве» [22, с. 143–144].

<sup>35</sup> Zernov W. Über absolute Messungen der Schallintensität. (Erste Mitteilung) // Annalen der Physik. 1906. В. 21. № 1. S. 131–140. Зёрнов В. Д. Сравнение методов абсолютного измерения силы звука. (Первое сообщение) // ЖРФХО. 1906. Т. 38. Физика. Вып. 7. С. 410–419.

физики<sup>36</sup>. Одновременно письмо в редакцию ЖРФХО написал В. Д. Зёрнов, где поддерживал позицию Петра Николаевича и просил вернуть рукопись своей статьи, если мнение Лебедева не найдет отражения на страницах журнала. Обе работы – и Лебедева, и Зёрнова – были напечатаны, но по неизвестным причинам авторам задержали высылку отдельных оттисков [5, письмо 326].

В декабре 1907 г. В. Д. Зёрнов, П. П. Лазарев, Т. П. Кравец представляли школу физиков П. Н. Лебедева на Первом Менделеевском съезде в Петербурге. Сам Пётр Николаевич плохо себя чувствовал и не смог поехать. Однако он «отрежиссировал» выступления своих учеников; эксперименты и демонстрации были тщательно отрепетированы. Докладам из Московского университета было предоставлено целое заседание секции физики, и переполненная аудитория Физического института Петербургского университета встретила их аплодисментами.

В конце 1907 г. Зёрнов закончил вторую работу по исследованию диска Рэлея как прибора для измерения силы звука в абсолютной мере. Окончательной отделкой статьи, как признает Зёрнов, занялся П. Н. Лебедев [20]:

*«Работа была закончена и дала хорошие результаты; текст в уже усвоенном стиле был написан, чертежи сделаны, и П. Н. опять взял весь материал, чтобы перевести работу на немецкий язык для отсылки в редакцию “Annalen der Physik”. Когда перевод был закончен, П. Н. поручил мне проверить русский текст по немецкому, так как им в немецком тексте были сделаны некоторые поправки. Я взял оба текста и все чертежи домой и сверил русский текст с немецким. Теперь все в порядке, надо отнести рукописи П. Н., и он со своим отзывом пошлет русский текст в журнал “Русского физико-химического общества”, а немецкий – в редакцию “Annalen der Physik”»<sup>37</sup>.*

Около года у В. Д. Зёрнова заняла подготовка к сдаче магистерских экзаменов. П. Н. Лебедев относился к подобным экзаменам скептически, считая, что главное для молодых – сделать самостоятельную научную работу. В число магистерских экзаменов входили математика, механика, включая гидродинамику, метеорология, экспериментальная физика, теоретическая физика. О том, как были организованы и проходили магистерские экзамены, Зёрнов описал так:

*«Магистерский экзамен всегда проходил в заседании факультета. Во время заседания из числа членов факультета выделялись экзаменатор и ассистент. <...> По теоретической физике Соколов дал мне два отдела – теорию тепла и теоретическую оптику по Друде. Спрашивал меня Соколов, а Лебедев демонстративно, не слушая моего ответа, расхаживал по комнате и не то что-то мурлыкал про себя, не то насвистывал. <...> Математику принимали профессор Лахтин и Егоров, оба были преподавателями еще в гимназии. Механику я отвечал Н. Е. Жуковскому и С. А. Чаплыгину. Метеорологию сдавал Э. Е. Лейсту, секретарю факультета» [22, с. 123, 133].*

Получив разрешение физико-математического факультета, Зёрнов отпечатал диссертацию отдельной брошюрой (таковы были требования того времени; оттиски выставлялись даже в витринах книжных магазинов) в московской типографии Г. Лисснера и Д. Собко – традиционном месте издания трудов семейства Зёрновых.

Защита магистерской диссертации В. Д. Зёрновым состоялась 12 марта 1909 г.<sup>38</sup> Он так вспоминал об этом важном событии в своей жизни [22, с. 135, 136]. :

<sup>36</sup> Как писал Лебедев, фраза о бессмысленности «как раз рассчитана на тех махровых тупиц, которые, считая “работу” Мышкина за ценный научный вклад, чего доброго и мою заметку без этой фразы поймут как-нибудь по-своему; для того чтобы и таким физикам облегчить уяснение основной мысли моей заметки, я счел нужным высказаться в форме, и для них ясно понятной» [1.5, письмо 324].

<sup>37</sup> Zernov W. Über absolute Messungen der Schallintensität. (Zweite Mitteilung). Die Rayleighsche Scheibe // Annalen der Physik. 1908. В. 26. № 1. S. 79–94; Зёрнов В. Д. Об абсолютном измерении силы звука. (Второе сообщение). Диск Рэлея // ЖРФХО. 1908. Т. 40. Физика. № 3. С. 70–83.

<sup>38</sup> Отчет о процедуре защиты газета «Московские ведомости» напечатала уже на следующий день под рубрикой «Академическая жизнь»:

«Вчера, около 3-х час. дня в аудитории физического института В. Д. Зёрнов, сын известного профессора Д. Н. Зёрнова и внук покойного профессора же Н. Е. Зёрнова, публично защищал диссертацию на соискание степени магистра физики: “Абсолютное измерение силы звука”. После прочтения проф. Лейстом *curriculum vitae* диспутанта, с перечислением его учёных трудов, оппонентами выступили профессора Соколов, Лебедев и Умов, единогласно признавшие, что

*«Я облёкся в новый фрак и заблаговременно отправился в Физический институт. Мы с товарищами по лаборатории заварили чай. Я немного волновался. Верно, с усов я капнул капельку чая на лацкан пиджака. Тут вошел Пётр Николаевич и, увидевши эту капельку, говорит:*

*– Что это вы заранее слезы проливаете?*

*Мне почему-то было неприятно, что он так пошутил, хотя, конечно, шутка была совершенно невинная. Но бывает, что ничего не значащая фраза запоминается на всю жизнь, оставляя приятный или неприятный след.*

*Когда я вышел в большую физическую аудиторию, все члены факультета сидели в ряд на стульях, поставленных перед рядами скамей аудитории. В те времена профессора на лекциях и на заседаниях были одеты в форменные фраки (вицмундиры). Аудитория была полна народа. Пришло много студентов, ученики Лебедева, увидел я и моих домашних.*

*Я уже много раз докладывал свои работы, вошедшие в диссертацию, и говорить мне было легко. Речь свою я произносил без записки. Начались выступления официальных оппонентов. Н. А. Умов говорил довольно расплывчато, но работу похвалил, и мне нечего было ему отвечать. Очень придирчиво говорил А. П. Соколов, но его главное возражение было отведено моим предшествующим выступлением и замечанием Петра Николаевича, которое он сделал после выступления Соколова. Из возражений Соколова одно было правильное, но незначительное. С ним я, конечно, согласился и признал, что здесь имеет место недосмотр. Во всяком случае, три профессора: Умов, Соколов и Лебедев – признавали меня “достойным искомой степени”.*

*Декан предложил и другим высказаться или сделать замечания. Из членов факультета никто слова не взял. Только работавший в лаборатории Лебедева Е. А. Гопис сделал уточняющее замечание, на которое я дал возражение. Этим защита была закончена. После описанных разговоров декан факультета обошёл всех членов факультета, и каждый должен был открыто сказать, считает ли он диссертанта достойным искомой степени или нет. Все ответили положительно.*

*Аудитория долго аплодировала, а я стоял у двери, через которую выходили члены факультета, и каждый поздравлял меня и целовался со мной – таков был старинный обычай: члены факультета, доктора как бы принимали в свою среду нового члена, молодого учёного».*

П. Н. Лебедев был искренне рад, когда его второй учитель – Ф. Кольрауш в 1910 г. отметил работы В. Я. Альтберга и В. Д. Зёрнова в 11-м издании своего учебника «Lehrbuch der praktischen Physik» [5, письмо 379].

Уже спустя месяц после защиты магистерской диссертации, 11 апреля 1909 г., В. Д. Зёрнов вместе с семьёй выехал в зарубежную поездку. П. Н. Лебедев дал ему рекомендательные письма, указал, «какие институты полезно посетить, лекции каких профессоров послушать, и непременно рекомендовал побывать в Англии – в Лондоне, Кембридже и Манчестере» [20]. Зёрнов воочию мог убедиться, каким уважением пользовался Лебедев: «имя П. Н., его записка открывали передо мною любые лаборатории. Стоило сказать, что я ученик Лебедева, и передать работу, сделанную под его руководством, и я был желанным гостем» [20]. Своеобразным «промежуточным» отчетом Зёрнова о заграничной поездке является его письмо Лебедеву от 23 июня 1909 г. [5, письмо 374]:

*«Многоуважаемый Пётр Николаевич!*

*Сегодня первый день провел в Англии и ездил в Кембридж. Был у Томсона, говорил с ним, и его ассистент показывал мне институт. <...> В Германии все, которому Вы позволили передать свой поклон, очень внимательны и, в свою очередь, просили Вам кланяться. До сих пор я был у Ленарда, Брауна, Рентгена, Вина, Фогта и Симона, да еще у Ваксмута во Франкфурте. <...> Симон с особым вкусом показывает свой институт и, видимо, гордится своим произведением. Он просит дать в Zeitschrift коротенькое описание фонометра <...>*

---

работа В. Д. Зёрнова является весьма ценным вкладом в науку. На этом основании и принимая также во внимание и всю прежнюю плодотворную деятельность диссертанта на научном поприще, факультет нашёл его вполне заслуживающим искомой степени. Постановление это было встречено аплодисментами всей аудитории. В. Д. отправляется на казённый счёт в научную заграничную командировку на 2 года» (цит. по [1.22, с. 313]).

*Завтра попытаюсь проникнуть в Лондонский университет, потом поеду в Манчестер и на обратном пути побываю в Davy–Faraday lab[oratory]. <...>*

*Искренне уважающий Вас*

*Вл. Зёрнов»*

Здесь не случайно подробно описывается заграничный маршрут Зёрнова по университетским местам Европы. Дело в том, что еще до защиты диссертации, не без активного участия Петра Николаевича Лебедева, Зёрнов был вовлечен в многолетнюю эпопею по созданию нового в России университета – Саратовского. Вот как это начиналось [20]:

*«Осенью 1908 г., в день возвращения моего из деревни в Москву, П. Н. позвонил мне вечером по телефону и без всякого вступления говорит: “Владимир Дмитриевич, хотите быть профессором?” Я чуть не сел на пол. “Пётр Николаевич, вы знаете, что это то, к чему я стремлюсь, к чему направлены все мои усилия”. – “Ну, так отлично. Я рекомендовал вас на кафедру в Варшавский университет”<sup>39</sup>. Спешите с деканом, но требуйте себе лабораторию и достаточные средства, чтобы с самого начала поставить там научную работу”.*

*Я благодарил П. Н. за доверие ко мне и за хорошее обо мне мнение и начал переписку с деканом физико-математического факультета Варшавского университета. Но так как факультет затягивал переговоры, предполагая поставить меня до известной степени в зависимость от более старшего профессора, а П. Н. не рекомендовал уступать, то после защиты диссертации я предпочел кафедру физики во вновь организуемом Саратовском университете».*

Узнав об открытии Саратовского университета, Зёрнов отказался от идеи стать профессором в Варшаве. Он сразу же после защиты магистерской диссертации поехал в Петербург и обратился непосредственно к министру народного просвещения Александру Николаевичу Шварцу, у которого учился в гимназии. Шварц принял у него докладную записку и обещал свою поддержку [22, с. 137–139]. В свою очередь в мае 1909 г. П. Н. Лебедев направил письмо Николаю Николаевичу Шиллеру, уважаемому российскому физическому, занимавшему пост в совете министра народного просвещения. Письмо интересно характеристикой, которую он давал Зёрнову, и кратким рассказом о своей работе [5, с. 369]:

*«...Мой ученик магистр физики Владимир Дмитриевич Зёрнов подал в Министерство прошение о зачислении его кандидатом по физике вновь учреждаемого Саратовского Университета. Так как его прошение поступит, вероятно, на Ваше рассмотрение, то я позволил бы себе сказать несколько слов о Зёрнове как о физике: у меня он работал около пяти лет [неразб.] над своей задачей – всегда добросовестно и внимательно, а в случае возникающих сомнений как настоящий физик и притом физик ловкий, умеющий критически относиться к своей работе, не жалел рабочего времени; хотя работа и сделана в моей лаборатории, я все-таки могу сказать, что сделана она хорошо. Зёрнов принимал деятельное участие в наших коллоквиумах – лектор он хороший: говорит ясно, толково, спокойно, и всегда только о том, что ему самому совершенно ясно. Добавлю еще, что он лет пять был ассистентом у Соколова и имеет достаточный опыт в обхождении со студентами на практических работах. Со своей стороны я бы мог рекомендовать его со спокойной совестью, вполне уверенный, что он любит самоё дело, сможет толково его организовать и быть хорошим руководителем.*

*За последние пять лет я наладил тут **фабрику молодых физиков** (выделено мной. – Авт.) и был бы очень рад, если бы Вы весной, при проезде на юг, заехали бы к нам посмотреть, как тут это дело поставлено: у меня сейчас работают 18 человек на разные темы по разным волнам, по теплопроводности паров».*

<sup>39</sup> Речь идет о письме с рекомендацией В. Д. Зёрнова на должность профессора, которое П. Н. Лебедев направил декану физико-математического факультета Варшавского университета П. И. Митрофанову 25.10 (7.11) 1908 г. [1.5, письмо 356].

10 июня 1909 г. Николай II подписал закон об учреждении Саратовского университета<sup>40</sup>, при этом В. Д. Зёрнов в числе первых 7 профессоров был назначен с 1 июля 2009 г. исполняющим обязанности экстраординарного профессора Саратовского университета. Интересная деталь, характеризующая «настороженное» отношение властей к университетам: когда А. Н. Шварц вручал царю памятные медали к открытию Саратовского университета, тот сказал: «Кстати, я не имел случая Вам этого говорить, но теперь скажу: в другой раз Вы ко мне за утверждением проекта нового университета не ходите. Их больше не надо»<sup>41</sup>.

Естественно, особая заслуга в продвижении Саратовского университета в начальный период его существования принадлежит его ректору – Василию Ивановичу Разумовскому. Но что касается физического направления, то Зёрнов очень грамотно определил все приоритеты и успешно разрешил взаимосвязанные задачи по утверждению проекта и строительства Физического института Саратовского университета (по проекту Л. П. Шишко и К. Л. Мюфке), оснащению его лабораторным оборудованием (приобретенные при Зёрнове приборы хранятся сегодня в Музее физических приборов физического факультета СГУ), обеспечению учебной литературой (Зёрнов ездил в Петербург за библиотекой видного физика и методиста члена-корреспондента Петербургской АН Ореста Даниловича Хвольсона), привлечению для работы московских физиков. Из непосредственного окружения Петра Николаевича Лебедева и его ближайшего ученика Петра Петровича Лазарева в Саратовском университете стали работать Константин Александрович Леонтьев, Николай Павлович Неклепаев и Владимир Ефимович Сребницкий. Под руководством П. Н. Лебедева Неклепаев и Сребницкий выполняли научные исследования по акустике. Как уже отмечалось, Зёрнов и Сребницкий были отмечены престижной для начала прошлого века научной премией имени В. П. Мошнина в области физики и химии, «распорядителем» которой являлось Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии при Московском университете.

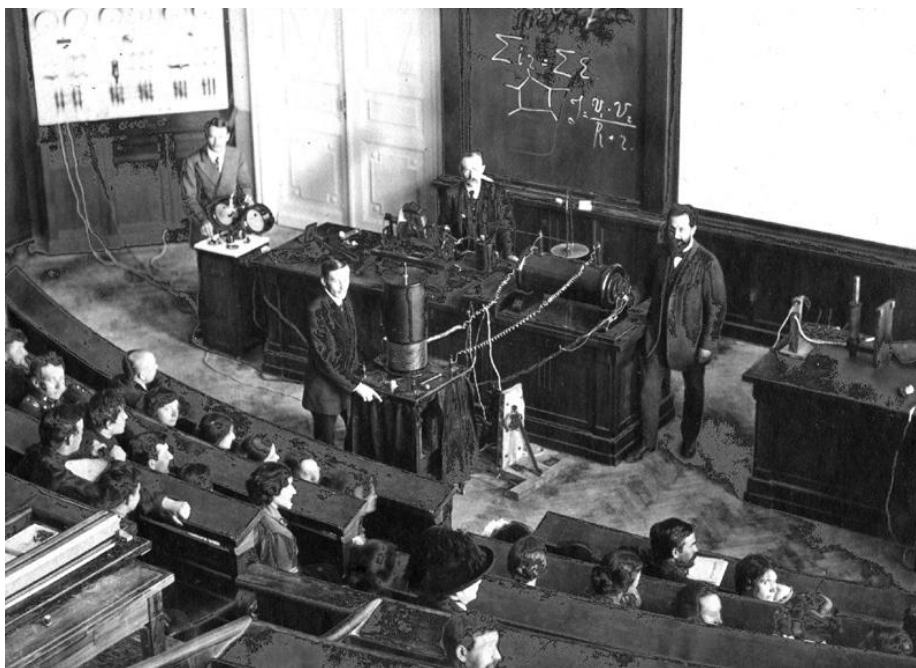
Постановка первых работ в физическом практикуме Саратовского университета и экспериментальные демонстрации на лекциях – заслуга еще одного сотрудника физического факультета Московского университета Ивана Максимовича Серебрякова, бывшего механика в практикуме профессора Алексея Петровича Соколова. Всех названных людей, работавших на факультете в первые годы его существования, запечатлел снимок, сделанный в 1914 г. на лекции по физике в Большой физической аудитории.

Вот как вспоминал В. Д. Зёрнов о времени создания Физического института в Саратове и о том интересе, который проявлял к нему П.Н. Лебедев [20]:

*«Когда я начал свою работу в Саратове, П. Н. живо интересовался организацией нового Физического института, помогая мне при обсуждении проекта здания и его оборудования. При частых посещениях Москвы мой первый визит был всегда к П. Н., и мы обсуждали, как и что приобретать и устраивать. У меня хранится переплетенная тетрадь, подаренная мне П. Н. во время одной из первых бесед об оборудовании нового института. Тетрадь назначалась для записи в ней всех заказов, сделанных для физической лаборатории Саратовского университета.»*

<sup>40</sup> Редкая из публикаций, относящихся к истории основания Саратовского университета, обходится без упоминания о том, что одобренный Государственным Советом и Государственной думой России «Закон об учреждении Университета в городе Саратове» был утвержден императором Николаем II 10 июня 1909 г. на яхте «Штандарт»: «Быть по сему», – такую визу поставил самодержец на документе. Заложённая Александром III в 1893 г. на верфи в Копенгагене, яхта «Штандарт» при Николае II стала, по выражению служившего на ней капитана второго ранга Н. В. Саблина, «плавучим дворцом с канцеляриями, управлениями, штабами и множеством придворной прислуги». Судно было размером с небольшой крейсер, обладало великолепными мореходными качествами, техническим оснащением, носовым и кормовым украшениями, особой внутренней отделкой. По утверждению Н. В. Саблина, в 1909 г. царская семья, начав пребывание на «Штандарте» в мае, вернулась в Царское Село только в декабре (см.: Саблин Н. В. Десять лет на императорской яхте «Штандарт». М.: Петроний, 2008. 400 с.). Во время плаваний на «Штандарте» совершались официальные визиты Николая II, встречи с главами государств и представителями царствующих домов Европы, посещение Крыма, торжественные приемы и встречи, утверждались необходимые решения. И только две недели в июне на яхте для Николая II считались чисто «отпускными».

<sup>41</sup> См.: Шварц А.Н. Моя переписка со Столыпиным. Мои воспоминания о Государе. М.: Греко-латинский кабинет, 1994. С. 60.

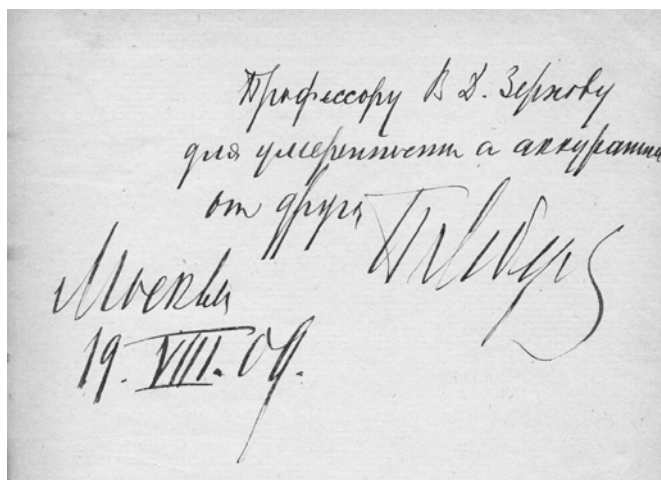


Лекция в Большой физической аудитории (1914 г.): крайний справа – исполняющий должность экстраординарного профессора В. Д. Зёрнов, на переднем плане, рядом с трансформатором Н. Теслы, – ассистент Н. П. Неклепаев, у доски – лаборант В. Е. Сребницкий, крайний слева – лаборант И. М. Серебряков

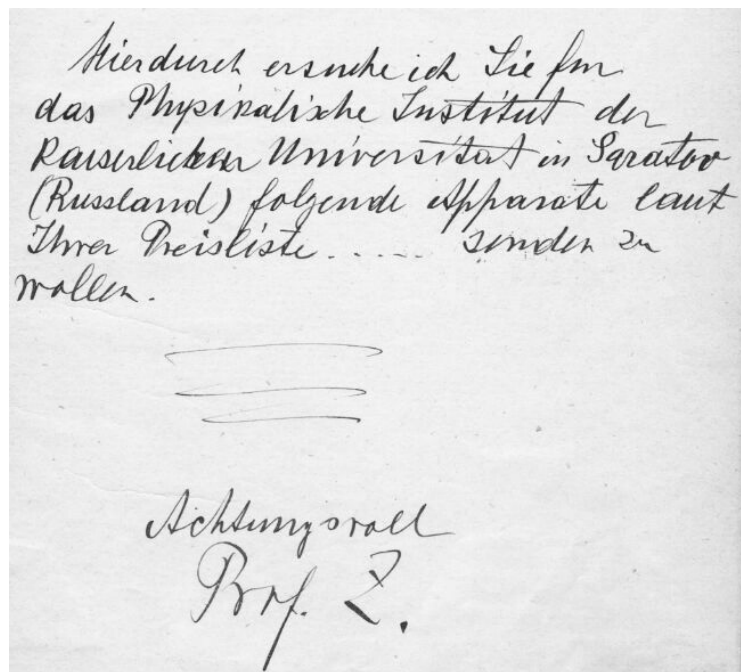
*На первом листе П. Н. сделал надпись: “Профессору В. Д. Зёрнову для умеренности и аккуратности от друга – П. Лебедева. Москва. 19.VIII.09”. На следующей странице П. Н. написал форму обращения к заграничной фирме; первые страницы, где записан заказ Лорху и Шмидту на станки и оборудование мастерской, сделаны под диктовку П. Н., отчасти и прямо его рукой.*

*Очень характерно, что П. Н. именно с этого заказа рекомендовал начать оборудование физической лаборатории, – он не допускал возможности нормальной работы физической лаборатории без хорошо оборудованной мастерской. Сколько раз впоследствии мне приходилось при организации новых лабораторий доказывать администрации эту элементарную истину – и иногда безуспешно!*

*В день официального открытия Саратовского университета 6 декабря 1909 г. я получил от П. Н. телеграмму с горячими пожеланиями успеха: “Приветствую нарождающийся Физический институт. Желаю ему расти большим, иметь силы, много успешно работать”.*



Авторгарф П. Н. Лебедев на записной книжке, хранящейся в Музее физических приборов физического факультета СГУ



Проект заявки в заграничную фирму, написанный П. Л. Лебедевым в записной книжке В. Д. Зёрнова

Эпопею строительства и оборудования Физического института В. Д. Зёрнов подробно описал в статье, помещенной в 1916 г. в журнале «Физическое обозрение» П. А. Зилова. Её текст воспроизведен в юбилейном (посвященном 100-летию физического корпуса СГУ) выпуске журнале «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика» за 2014 год [36]. Там же опубликованы другие исторические материалы, посвященные этой дате [37, 38]. Последние годы работы в Саратове Зёрнов занимал также посты декана физико-математического факультета, образованного в июле 1917 г., и ректора Саратовского университета. С июля 1945 г. физический факультет функционирует как самостоятельное структурное подразделение университета.



Телеграмма П. Н. Лебедева, присланная в день открытия Саратовского университета 6 (19) декабря 1909 г. (экспонат Музея физических приборов физического факультета СГУ)

«Московский след» в истории Саратовского университета прослеживается и в таком неординарном событии 1928 г., которое произошло в стенах физического корпуса СГУ – одно из выездных заседаний 6-го Всесоюзного съезда физиков с представительным международным участием [39]<sup>42</sup>. Организатором и президентом съезда был академик А. Ф. Иоффе, ратовавший за организацию физических исследований в крупных провинциальных городах, вице-президентами съезда – ближайший сотрудник П. Н. Лебедева академик П. П. Лазарев и ученик П. Н. Лебедева профессор В. И. Романов, а секретарем съезда – ученик П. П. Лазарева, доцент, будущий академик и президент Академии наук СССР С. И. Вавилов.

Иностранным гостям помогал владевший тремя «техническими» иностранными языками Дмитрий Владимирович Зёрнов сын В. Д. Зёрнова, в то время студент четвертого курса физико-математического факультета Московского государственного университета [40]. В детстве он учился в одной из саратовских гимназий. Впоследствии стал член-корреспондентом Академии наук СССР, руководителем Научного совета по физической электронике при Отделении общей и прикладной физики АН СССР, заместителем директора Института радиотехники и электроники РАН.

В 1921 г. преемником В.Д. Зёрнова на постах заведующего кафедрой и директора Физического института был назначен Константин Александрович Леонтьев [37]. Ученики П. Н. Лебедева задали хороший старт научным исследованиям в Саратовском университете, которые впоследствии привели к формированию разнообразных образовательных и научных направлений на физическом факультете СГУ – радиофизики, нелинейной динамики, теоретической физики, оптики, физики полупроводников, вакуумной и твердотельной электроники, радиотехники. Эти направления в рамках признанных научно-образовательных школ профессоров Д. И. Трубецкого, В. С. Анищенко, В. В. Тучина, Д. А. Усанова и поддерживаются и сегодня на новом качественном научном и техническом уровне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Как рождается интерес? Возможно, для того чтобы прирожденная человеческая любознательность переросла в более сильное чувство – интерес, нужна какая-то эмоциональная искра, вызванная новым явлением, или яркий жизненный пример.

Когда-то офицер-инженер Александр Николаевич Бекнев показал 12-летнему Пете Лебедеву серию простых «самодельных» опытов по электричеству, которые буквально зажгли мальчика интересом к физике. Хотя его отец, Николай Всеволодович, поначалу пытался направить его учебу по своей – торговой – линии, видя истинные стремления сына, согласился на изменения профиля его обучения. Но из коммерческого немецкого училища, первого своего образовательного учреждения, Лебедев вынес прекрасные знания немецкого языка, что очень пригодилось ему потом в научном общении. В Техническом училище Петр Николаевич обучился слесарному и токарному делу, черчению и конструированию, что помогло ему в дальнейшем при создании тонких физических приборов.

Пройдя непростой путь научных исканий в немецких университетах, П.Н. Лебедев сформулировал для себя программу научных работ, которую с блеском выполнял все последующие годы. Он предположил и установил в процессе исследования пондеромоторного действия волн на резонаторы общие для волн различной природы (звуковых, гидравлических, электромагнитных) закономерности (при резонансе для всех видов волн наблюдается максимальное отталкивание резонаторов). Он внес свой уникальный вклад в экспериментальное подтверждение электромагнитной природы света, создав в 1895 г. (впервые в мире) генератор миллиметровых электромагнитных волн (3–6 мм), исследо-

---

<sup>42</sup> Текст статьи М. Борна доступен на сайте издательства Springer. Заседания съезда проходили в августе 1928 г. в университетских городах по маршруту: Москва (МГУ-1, Большая физическая аудитория на Моховой, 5–9 августа) – Нижний Новгород (10 августа) – Казань (11 августа) – Саратов (СГУ, Большая физическая аудитория, 15 августа). Среди выступивших на съезде М. Борн выделяет среди зарубежных ученых Л. Н. Бриллюэна, Дж. Э. Дарвина, К. Шебля, Ст. Пиенковского, Ч. Бялобржеского, Р. В. Ладенбурга, П. Принсгейма, П. Д. У. Дебая, П. А. М. Дирака, Ф. Франка, Г. Н. Льюиса, Р. В. Поля, Р. Э. фон Мизеса, В. Г. Гайтлера, Ф.В. Лондона, П. Йордана, А. ван Аркеля. Из российских ученых Борн называет А. Ф. Иоффе, П. П. Лазарева, Д. Д. Иваненко, Л. Д. Ландау, Я. И. Френкеля, Г. С. Ландсберга, Л. И. Мандельштама, В. Р. Бурсиана, Т. П. Кравца, Д. А. Рожанского, Н. Н. Семенова, В. А. Ульянина. В числе участников съезда (а их было более 150) были также А. А. Лебедев, П. А. Ребиндер, Д. С. Рождественский, В. А. Фок и другие.



вал процессы их отражения, двойного лучепреломления, интерференции. Вершиной творчества П. Н. Лебедева стало экспериментальное обнаружение и измерение давления света на твёрдые тела (1901) и газы (1909), что заложило экспериментальный фундамент теории Дж. Максвелла и одновременно открыло новые горизонты для развития физической науки. В последние годы жизни он занимался проблемой возникновения земного магнетизма.

2 марта 1912 г. телеграммой я был вызван в Москву; 1 марта П. Н. скончался. На кладбище П. Н. провожали его ученики, ученые, студенты и много людей, просто знавших и любивших этого замечательного человека. По возвращении в Саратов я посвятил публичную лекцию памяти П. Н. Лекция была обставлена экспериментами, искусству которых я научился у П. Н. Несколько раз во время лекции я должен был прерывать чтение, не будучи в состоянии совладать с волнением при воспоминании о моем дорогом учителе и друге.

*В. Д. Зёрнов*

2. Работы П. Н. Лебедева до сих пор остаются образцом экспериментального искусства. Выдающейся научно-педагогической заслугой Петра Николаевича является создание им **«фабрики молодых физиков»** (по его собственному выражению) – первой научной физической школы России. Естественно, мера таланта, степень приверженности физике, эрудиция, трудолюбие и все другие качества, необходимые для работы в науке, у учеников П.Н. Лебедева были разными. Одни прочертили заметный след в истории физики, создали свои научные школы, другие плодотворно работали в университетах страны и за рубежом. Все они прошли лебедевскую школу, им посчастливилось жить и работать рядом с ярким, выдающимся человеком, который даже внешне, как писал Т. П. Кравец, «резко выделялся среди других: огромного роста, громадной физической силы и редкой красоты мужественного лица», с «огромным темпераментом» и «пламенем, горевшим в глазах».

...Труды П. Н. вошли в сокровищницу науки, и имя его навсегда запечатлено в истории физики... Но кроме того, имя П. Н. не менее, а может быть, еще более дорого, как имя создателя первой русской школы физиков. Важны не только труды и достижения этой выдающейся школы, обогатившие мировую науку, но и само ее возникновение, давшее пример организации подобных научных коллективов.

*В. Л. Лёвшин*

3. Спустя многие годы после своего первого знакомства с физикой, Лебедев невольно сыграл роль «Бекнева» в судьбе одного мальчика, ставшего впоследствии академиком Российской академии наук, претендентом на Нобелевскую премию. Этот мальчик был племянником друга детства П. Н. Лебедева – известного физика Александра Александровича Эйхенвальда. В сентябре 1908 г. Лебедев женился на сестре Эйхенвальда, Валентине Александровне (по первому мужу – Дерягиной). Её сын Борис Владимирович Дерягин оставил воспоминания о последних годах жизни Петра Николаевича и о том влиянии, которое тот на него оказал. Академик рассказывал [41]:

*«О Петре Николаевиче у меня остались главным образом эмоциональные впечатления. При его жизни я даже не думал, что стану физиком, наоборот, был убежден, что никогда не смогу им быть – настолько недостижимо высокой казалась мне эта наука и таким великим в ней сам Лебедев. Но как я сейчас понимаю, подсознательная тяга к физике зародилась именно тогда. Любовь к Лебедеву, благоговение и трепет, даже страх перед ним рождали такие же чувства и к самой физике. Я не сомневался, что она самая важная и увлекательная из всех наук. И самая недоступная.*

*Чувство страха вызывалось еще и болезнью Лебедева. У него была тяжелая стенокардия с сильными и частыми приступами, сопровождавшимися угнетенностью и раздражительностью. И близкие жили в постоянном, непреходящем страхе за него <...>*

*В марте 1909 г. мы отправились в Италию. Сначала жили в Рапалло. Потом во Флоренции и в Сестри ди Леванте. Там нас навещил Лазарев с женой. Они с Лебедевым часто беседовали об астрономии, о значении для нее давления света. Мы все присутствовали при этих беседах. Да и вообще-то Пётр Николаевич много рассказывал домашним о своей работе. Помню, с каким увлечением он объяснял матери, как ему удалось получить самые короткие в мире электромагнитные волны –*

длиной в 6 миллиметров (Герц получал волны длиной в несколько десятков сантиметров). Шести-миллиметровое излучение вело себя подобно видимому свету. С помощью специально сконструированной призмы Пётр Николаевич заставил эти волны испытывать даже двойное лучепреломление, которое, как все были убеждены, есть чисто оптический эффект. Не только моя мать, но и я, мальчишка, был в курсе всех его работ по давлению света.

*Из Италии мы переехали в Швейцарию и поселились у Фирвальдштетского озера – Озера четырех кантонов. Всех нас пленяла здешняя природа – зеленовато-голубая поверхность озера, темно-зеленые скалы и снега, пылавшие на закате солнца... Пётр Николаевич, еще с юности страстный альпинист, всегда любил горы, и они действительно облегчали его страдания <...>*

*Пётр Николаевич был страшный говорун. И слушать его было необычайно интересно. Высокообразованный человек, он мог при случае рассказать массу вещей. И был остроумен, любил шутку»<sup>43</sup>.*

Академик РАН Б. В. Дерягин (1902–1994) причислен к классикам отечественной науки, является основателем научной школы, снискал мировую известность, в частности, за работы в области теории устойчивости коллоидных систем и тонких пленок, получившей название теории Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека (ДЛФО), молекулярной теории трения, поверхностных явлений, расклинивающего давления (определение Дерягина) тонких слоев жидкостей между двумя плоскими твердыми телами, адгезии, синтеза алмазных кристаллов<sup>44</sup>.

В статье «Идеи П.Н. Лебедева о природе молекулярных сил» [41], оценивая научный вклад Лебедева в этой области, Б.В. Дерягин писал и о характерных чертах его личности:

*«Если проследить истоки современного развития в нашей стране молекулярно-физических исследований, то большая часть их ведет к П. Н. Лебедеву и его ученикам. В этой области роль П. Н. Лебедева как учителя и создателя школы еще больше, чем его роль как исследователя. В связи с этим уместно напомнить, что влияние П. Н. Лебедева на его учеников обрело особую силу благодаря характерной для него страстности и бескомпромиссности в науке.*

*О повышенной эмоциональности П. Н. Лебедева и его особом отношении к науке я сохранил воспоминания еще со школьных лет, когда я вовсе не собирался стать физиком. Однако до сих пор его эмоциональное воздействие сохранило надо мной свою власть, и, несомненно, во многом помогло в работе над трудными проблемами. Ставить трудные проблемы — вот, пожалуй, один из главных заветов П. Н. Лебедева. Влияние личного воздействия Лебедева, несомненно, передавалось и через его учеников, в первую очередь П. П. Лазарева и С. И. Вавилова, и через их учеников и в той или иной форме присутствует в нашей науке и сейчас».*

**Из письма лауреата Нобелевской премии по физике 1902 г.  
Гендрика Антона Лоренца к жене Петра Николаевича Лебедева  
Валентине Александровне Лебедевой [5, с. 453]:**

... Кончина Вашего супруга означает невозвратимую потерю и для науки. Я считал его одним из первых и лучших физиков нашего времени и восхищался тем, как он в последний год при неблагоприятных условиях сумел поддержать в целостности основанную им Московскую школу и нашел возможность продолжать общую работу. Теперь я узнаю, что он делал все это с уже с расстроенным здоровьем, принося последние силы в жертву поставленной перед собой прекрасной цели. Пусть дух его живет в его учениках и сотрудниках по работе, и пусть посеянные им семена принесут богатый плод!

1 мая 1912 г.

<sup>43</sup> После смерти П. Н. Лебедева (в марте 1912 г.) и смерти матери Дерягина (осенью 1919 г.) участие в его судьбе принимал академик П. П. Лазарев.

<sup>44</sup> См.: Ролдугин В. М. Борис Владимирович Дерягин (1902–1994) // Российский химический журнал. 2006. Т. 50, № 5. С. 134–136. Большой резонанс вызвала работа Б.В. Дерягина в журнале «Nature», способствовавшая выявлению сильного взаимодействия воды с силикатами: Derjaguin B.V. and Churaev N.V. (1973). Nature of «Anomalous Water» // Nature. 1973. Vol. 244, No 5416. P. 430–431. DOI:10.1038/244430a0

4. У 19-летнего Владимира Зёрнова после окончания гимназии сомнений, куда пойти учиться, не было, – только Московский университет, ибо все его предки, начиная с прадеда, были «универсантами», причем «непростыми»: дед Николай Ефимович, профессор университета, считается первым доктором наук в России по математике, отец Дмитрий Николаевич – профессор анатомии, ректор. В семье сложилось мнение, что младшему Зёрнову нужно поступать на физико-математический факультет, специализируясь на старших курсах по математике. Физика же, как писал в своих мемуарах В. Д. Зёрнов, в гимназии была поставлена плохо; «проходили физику только чисто «меловую», без единого опыта» [22, с. 55]. На физику Зёрнов «пошел» по совету академика Федора Александровича Бредихина, знаменитого астронома, директора Пулковской обсерватории, профессора Московского университета в 1890–1895 гг. Поинтересовавшись однажды у Д. Н. Зёрнова, на какой факультет поступил его сын, Бредихин добавил: «Посоветуйте сыну заниматься физикой. Физиков постоянно не хватает, и потом эта специальность всегда даст кусок хлеба» [22, с. 55]. Советом этим В. Д. Зёрнов не пренебрег и уже на втором курсе стал целеустремленно заниматься в физическом практикуме, где и познакомился с Петром Николаевичем Лебедевым. И такое вот «совпадение»: классификация кометных хвостов Ф. А. Бредихина привела П. Н. Лебедева к созданию теории их образования под действием светового давления, что снискало ему первую громкую славу.

5. И еще одно интересное пересечение судеб людей, близких к П. Н. Лебедеву, произошло в Москве, в Императорском Московском инженерном училище. Училище было основано в 1896 г. в ведомстве Министерства путей сообщения для подготовки инженеров-строителей. Заведовать кафедрой физики был приглашен Пётр Николаевич Лебедев. Но вскоре он передал пост заведующего кафедрой А. А. Эйхенвальду, защитившему в июле 1897 г. в Страсбурге диссертацию «Поглощение электромагнитных волн электролитами»<sup>45</sup>. Интересно, что Эйхенвальд, помимо посещения лекций по математике, физике и химии, начиная с 1896 г., работал ассистентом в лаборатории у директора Физического института Фердинанда Брауна – того Брауна, который в 1909 г. вместе с Г. Маркони получил Нобелевскую премию за развитие беспроводной телеграфии. Ф. Браун так писал П. Н. Лебедеву 3 марта 1908 г. об Эйхенвальде: «Жаль, что я не чувствую себя вправе (как Вы) причислить Эйхенвальда к своим ученикам. Он приехал сюда уже вполне сложившимся ученым. Я мог бы им гордиться» [5, письмо 337].

В инженерном училище (переименованном в 1913 г. в Московский институт инженеров путей сообщения, а в 1924 г. – в Московский институт инженеров транспорта – МИИТ) А. А. Эйхенвальд создал лабораторию для научных исследований и физический кабинет, где и написал свою докторскую диссертацию «О магнитном действии тел, движущихся в электростатическом поле». Защитив в 1908 г. диссертацию в Московском университете, он по совместительству работал также в университете, который покинул вместе с П. Н. Лебедевым в 1911 г. После смерти П. Н. Лебедева в 1912 г. Эйхенвальд возглавил Московское физическое общество, заседания которого проходили в стенах его кафедры. На основе прочитанных курсов А. А. Эйхенвальд написал пользовавшиеся большой популярностью учебники: «Акустика и оптика», «Теоретическая физика» и «Электричество», проявив себя, по выражению А. Ф. Иоффе, как «блестящий физик и педагог»<sup>46</sup>.

В 1920 г. А. А. Эйхенвальд выехал по служебным делам за границу, не прерывая научных связей с Россией. Несколько лет должность заведующего кафедрой физики МИИТ оставалась вакантной. А в 1924 г. ее занимает ... Владимир Дмитриевич Зёрнов, которому в 1937 г. была присуждена по рекомендации академика Н. Н. Андреева ученая степень доктора физико-математических наук за работы в области акустики без защиты диссертации<sup>47</sup>.

<sup>45</sup> «За плечами» Эйхенвальда к тому времени были два курса физико-математического факультета Московского университета, Петербургский институт путей сообщения, который он окончил в 1888 г., семь лет практической работы инженером-строителем и двухлетнее пребывание в Страсбургском университете.

<sup>46</sup> Иоффе А.Ф. Советские физики и дореволюционная физика в России // УФН. 1947. Т. 33, вып. 4. С. 453–468.

<sup>47</sup> В звании директора-полковника административной службы Зёрнов в годы войны руководил работами по эвакуации московских институтов в тыл и последующим их возвращением в Москву. За эту деятельность награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Владимир Дмитриевич Зёрнов скончался 30 сентября 1946 г., потеряв сознание во время лекции в МВТУ.

В 1949–1952 гг. кафедрой физики МИИТ заведовал сын В. Д. Зёрнова – Дмитрий Владимирович Зернов, с 1952 г – член-корреспондент РАН и заместитель директора Института радиотехники и электроники Академии наук. Этот институт до настоящего времени располагается в старом здании физического факультета (института) Московского университета – в том здании, где работала «фабрика по производству молодых физиков» Петра Николаевича Лебедева...

6. П.Н. Лебедев считал, что сила науки определяется наличием научных национальных или интернациональных школ. Полноценным научным и организационным двигателем своей первой российской школы он был сам. Практически он охватывал (в последние годы жизни – при соруководстве с Петром Петровичем Лазаревым) все направления работ, которые велись его сотрудниками.

Имея поучительный опыт научных исканий в Страсбургском университете на заре своей научной карьеры, Лебедев вносил в руководство работой своей лаборатории большую гибкость. Единодушно признавались целесообразными практиковавшиеся П. Н. Лебедевым высокая требовательность к качеству научной деятельности, к материальному обеспечению этой деятельности, комплексность и гармоничность исследования, приверженность истинному эксперименту, организация творческих обсуждений (на «формальном» и «неформальном» уровнях) и научных семинаров.

При виде какого-либо беспорядка Лебедев был резок в требованиях к ученикам и откровенно высказывал своё нелицеприятное суждение. И одновременно он был очень терпим. И даже подвергался критике со стороны сильных учеников-партнеров (П. П. Лазарева, прежде всего) за чрезмерную, на их взгляд, опеку своих учеников. Эта «опека» заключалась в том, что Лебедев детально продумывал эксперименты и прописывал действия при выполнении работы, помогал непосредственным участием при возникновении трудностей и задержек, правил и писал за учеников на немецком языке статьи (от их имени!), вел «вдохновляющие» психологические беседы, делал «поблажки» в процессе сдачи магистерских экзаменов и т.д.

Все это отражалось на его здоровье, поскольку создавало для него дополнительное физическое и психологическое напряжение. Но, возможно, Лебедев, «подгоняя» учеников, думал о том, как бы успеть сделать как можно больше, ибо его тяготило серьезное сердечное заболевание.

Болезненное состояние, когда оно проявлялось, сильно угнетало Лебедева. Но когда со здоровьем было хорошо, он, по отзыву близких людей, проявлял себя как остроумный, веселый, любивший шутку собеседник, охотно рассказывал о ходе своих научных дел. Культурные интересы у него с юности были разнообразны: театр, музыка, литература. В молодости он увлекался альпинизмом и водными путешествиями (правда, одно из них едва не закончилось трагически – от физического перенапряжения у Лебедева на какой-то момент остановилось сердце).

Думается, что мудрость П. Н. Лебедева как научного учителя (именно учителя, не руководителя) состояла в том, что он, реализуя цель подготовки научной смены для России, действовал адекватно конкретной ситуации. Манкируя некоторыми формальностями, абсолютная полезность которых для функционирования науки и образования была недоказуема, он готовил кадры, прежде всего «*наученные*» решать научно-технические и образовательные задачи, что было и остается архиважным для страны в любой исторический период ее развития. И его поддержка, которая требовала от него и времени, и сил, открывала ученикам дорогу в сферу образования и науки, где они, как можно судить по перечню их имен, себя и проявили должным образом.

7. Одним из символов признания выдающейся роли П. Н. Лебедева в развитии современной физики и укрепления авторитета отечественной науки служит его памятник, установленный перед Физическим корпусом Московского университета. Памятная же доска с портретом В.Д. Зёрнова на стене Физического корпуса Саратовского университета, несомненно, ассоциируется и с непреходящей ролью Петра Николаевича Лебедева как зачинателя российских научных физических школ.

... У отечественных физиков разных поколений своеобразным гимном была и остается песня, в которой рефреном звучали слова «физика – соль». Действительно, объективно физика, фундаментальные и прикладные исследования и работы в этой области всегда имеют значение «соли», поскольку образуют научно-технический фундамент цивилизации. Соответственно должен пониматься и статус физики как приоритетной образовательной дисциплины.

## Литература

1. Лебедев П. Н. Собрание сочинений – М.: Изд-во АН СССР, 1963. <http://books.e-heritage.ru/book/10081289>.
2. Лебедев П. Н. Избранные сочинения – М.; Л.: Гостехиздат, 1949.
3. Лебедев П. Н. Собрание сочинений: I. Научные работы. II. Популярные статьи и речи.- М.: Типография тов-ва И.П. Кушнерева и К°, 1913. <http://books.e-heritage.ru/book/10070526>.
4. Петр Николаевич Лебедев: Библиографический указатель / Сост. А. М. Лукомская; ред. К. И. Шафрановский; отв. ред. акад. Д. В. Наливкин - М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
5. Научное наследство / АН СССР. Архив АН СССР; Редкол.: Микулинский С.Р. (отв. ред.) и др. – М.: Наука, 1990. Т. 15: Научная переписка П.Н. Лебедева / Сост. и авт. коммент. Погребысская Е. И.; отв. ред. Фабрикант В. А. Указ.: с. 455–499. <http://www.arran.ru/?q=publication&guid=42C5C81A-EDAA-1038-3B07-940A455980B2>.
6. Тимирязев К.А. Наука и демократия - М.: Соцэгиз, 1963.
7. Лазарев П. П. // Природа 2010, № 4, с. 63–65<sup>48</sup>. <http://ras.ru/publishing/nature.aspx>.
8. Лазарев П. П. // Природа 2010, № 4, с. 66–70<sup>49</sup>. <http://ras.ru/publishing/nature.aspx>.
9. Лазарев П. П. // УФН 1937, Т. 17, № 4, с. 405–420.
10. Вавилов С. И. // Природа 1937, № 5, с. 94–96.
11. Зёрнов В. Д. Пётр Николаевич Лебедев. Очерк жизни и деятельности // Учен. зап. МГУ. Юбил. сер. Вып. ЛП. Физика. М.: 1940. С. 125–150.
12. Капцов Н. А. Школа Петра Николаевича Лебедева. // Учен. зап. МГУ. Юбил. сер. Вып. ЛП. Физика. М.: 1940. С. 151–165.
13. Кравец Т. П. // УФН 1952, Т. 46, № 3, с. 306–320.
14. Тимирязев А. К. // УФН 1952, Т. 46, № 3, с. 321–324.
15. Капцов Н. А. // УФН 1952, Т. 46, № 3, с. 325–328.
16. Лебедев П. Н. // УФН 1952, Т. 46, № 3, с. 329–330.
17. Лазарев П. П. // УФН 1962, Т. 77, № 4, с. 571–582.
18. Капцов Н. А. // УФН 1962, Т. 77, № 4, с. 583–588.
19. Лёвшин В. Л. // УФН 1967, Т. 91, № 2, с. 331–339.
20. Зёрнов В. Д. // Вопросы истории естествознания и техники 2004, № 4, с. 143–149<sup>50</sup>.
21. Письма П.Н. Лебедева В.Д.Зёрнову // Вопросы истории естествознания и техники 2004, № 4, с. 149–162.
22. Зёрнов В. Д. Записки русского интеллигента / Публ., вступ. статья, коммент. и указ. имен В. А. Соломонова; под ред. А. Е. Иванова. М. : «Индрик», 2005.
23. Храмов Ю. А. // УФН 1986, Т. 150, № 4, с. 307–318.
24. Гинзбург В. Л. // УФН 2009, Т. 179, № 6, с. 562–570.
25. Рагульский В. В. // УФН 2011, Т. 181, № 3, с. 307–318.
26. Измайлов И. В., Пойзнер Б. Н. О науке, событиях в истории изучения света, колебаний, волн, об их исследователях, а также глоссы и этимоны : учеб. пособие / под ред. А.В. Войцеховского. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2014.
27. Аникин В. М. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 2014, Т. 22, № 4, с. 117–120.
28. Визгин Вл. П., Кессених А. В., Томилин К. А. // УФН 2011, Т. 181, № 12, с. 1352–1356.
29. Аникин В. М. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика, 2011, Т.19, № 3, с. 52–76.
30. Чолаков В. Учёные и открытия – М. : Мир, 1987.
31. Ростовцев Е. А. // J. of Modern Russian History and Historiography 2009, Vol. 2, p. 75–121. [http://history.spbu.ru/userfiles/Rostovcev/Borba\\_sa\\_avtonomiyu.pdf](http://history.spbu.ru/userfiles/Rostovcev/Borba_sa_avtonomiyu.pdf).
32. Леденцов Н. Н. Христофор Семёнович Леденцов: семья, соратники, партнёры. <http://ledentsov.de/2009-12-17-Ledentsov.pdf>.
33. Лазарев П. П. // УФН 1918, Т. 1, № 1, с. 54–66.
34. Лебедев П. Н. // УФН 2011, Т. 181, № 11, с. 1183–1186.
35. Вейнберг Б.П. // Вестник опытной физики и элементарной математики 1900, № 283, с. 145–150. [www.vofem.ru/ru/issues/1900](http://www.vofem.ru/ru/issues/1900).
36. Зёрнов В. Д. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика 2014, Т. 14, № 1, с. 59–64.
37. Голубков П. В. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика 2014, Т. 14, № 1, с. 65–68.
38. Аникин В. М. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика 2014, Т. 14, № 1, с. 53–58.
39. Born M. VI Kongreß der Assoziation der russischen physiker», напечатанной в журнале «Die Naturwissenschaften». 1928. В. 16, Heft 39–September 1928. S. 741-743. DOI 10/1007/BF01506295.
40. К 100-летию со дня рождения Дмитрия Владимировича Зёрнова (1907-1971) // Радиотехника и электроника 2007, Т. 52, № 5, с. 637–638.
41. Дерягин Б. В. // УФН 1967, Т. 91, № 2, с. 341–346.

<sup>48</sup> Перепечатка статьи из журнала «Природа» за 1912 год, № 4.

<sup>49</sup> Перепечатка статьи из журнала «Природа» за 1917 год, № 3.

<sup>50</sup> Источники 20 и 21 являются приложениями к статье: Соломонов В. А. «Имя П.Н., его записка открывали передо мною любые лаборатории» (К истории взаимоотношений П.Н. Лебедева и В.Д. Зёрнова) // Вопросы истории естествознания и техники. 2004. № 4. С. 131–143.