Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук»

Акционерное общество «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

ДВЕНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Москва, 31 января — 3 февраля 2023 года

Труды конференции

Том 2

BAUMANPRESS
Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2023

УДК 536.75
ББК 22.317
Н52

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://bmstu.press/catalog/item/7873/

Н52 **Необратимые процессы в природе и технике** : Двенадцатая Всероссийская конференция (Москва, 31 января — 3 февраля 2023 года) : труды конференции : в 2 т. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук», Акционерное общество «Центр прикладной физики МГТУ им. Н. Э. Баумана». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023.

ISBN 978-5-7038-6011-3

Т. 2. — 349, [1] с. : ил.
ISBN 978-5-7038-6013-7

В трудах Двенадцатой Всероссийской конференции приведены результаты, полученные авторами в области исследования необратимых процессов в природе и технике. Во второй том вошли материалы третьей, четвертой и пятой секций. В третьей секции размещены оригинальные работы, посвященные фундаментальным проблемам создания новой техники. Работы четвертой секции посвящены результатам исследований необратимых оптических процессов. В работах пятой секции рассмотрены научно-методические проблемы преподавания естественнонаучных дисциплин.

Труды конференции предназначены для студентов, аспирантов и научных работников.

УДК 536.75
ББК 22.317

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7038-6013-7 (Т. 2)

ISBN 978-5-7038-6011-3

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Двенадцатая Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике», как все предыдущие, посвящена изучению необратимых процессов и явлений, которые играют большую роль в нашей жизни и в окружающей нас природе. Ее тематика остается востребованной и интересной для широкого круга научных работников и преподавателей вузов. В ее работе все большее участие принимают молодые ученые, аспиранты и студенты.

На конференции будут доложены новые результаты, которые получены при изучении необратимых процессов в последнее время, а также возможности их применения в технических устройствах. Конференция позволит обсудить новые научные направления и обменяться мнениями и взглядами на дальнейшее развитие наших представлений о необратимых процессах в природе и технике.

Наибольший интерес представляют исследования, направленные на совершенствование нанотехнологий для создания новых материалов с уникальными свойствами, на изучение необратимых физических процессов, включая оптические процессы и процессы тепломассопереноса, на исследование мягкой материи, на разработку новых медицинских приборов и оборудования, на совершенствование средств обнаружения беспилотных летательных аппаратов и на решение многих других проблем науки и техники. На конференции запланировано обсуждение принципиальных проблем фундаментальной физики, включая регистрацию реликтовых гравитационных волн.

Традиционно на конференции будут работать пять секций, охватывающих проблемы физики необратимых процессов, их математического моделирования и применения в технике. Кроме этого предусмотрено рассмотрение проблем разработки адекватной методики преподавания естественнонаучных дисциплин, ориентированной на изложение последних достижений науки.

Работа конференции, неформальные обсуждения и дискуссии должны позволить выработать программу дальнейших исследований необратимых процессов в природе и технике.

Председатель организационного
и программного комитетов
А.Н. Морозов

СОСТАВ ОРГАНИЗАЦИОННОГО И ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТОВ

Председатель:

Морозов Андрей Николаевич,
д-р физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Члены оргкомитета:

Бункин Николай Федорович,
д-р физ.-мат. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Гладышев Владимир Олегович,
д-р физ.-мат. наук, профессор (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Еркович Ольга Станиславовна,
канд. физ.-мат. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Есаков Артем Александрович (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Киверин Алексей Дмитриевич,
д-р физ.-мат. наук (ОИВТ РАН);
Левина Екатерина Юрьевна,
канд. техн. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Назолин Андрей Леонидович,
д-р техн. наук, профессор РАН (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Ученый секретарь:

Фуфурин Игорь Леонидович,
канд. физ.-мат. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Технический секретарь:

Есаков Артем Александрович (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Члены программного комитета:

Бункин Николай Федорович,
д-р физ.-мат. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Гладышев Владимир Олегович,
д-р физ.-мат. наук, профессор (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Еркович Ольга Станиславовна,
канд. физ.-мат. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Ерофеев Владимир Иванович,
д-р физ.-мат. наук, профессор (ИПМ РАН);
Иванов Вадим Константинович,
д-р физ.-мат. наук, профессор (СПбГПУ);
Киверин Алексей Дмитриевич,
д-р физ.-мат. наук (ОИВТ РАН);
Коротаев Сергей Маратович,
д-р физ.-мат. наук, профессор (ИГЭИ РАН);
Махутов Николай Андреевич,
чл.-корр. РАН (ИМАШ РАН);
Назолин Андрей Леонидович,
д-р техн. наук, профессор РАН (МГТУ им. Н.Э. Баумана);
Показеев Константин Васильевич,
д-р физ.-мат. наук, профессор (МГУ им. М.В. Ломоносова);
Харитонов Александр Олегович,
д-р техн. наук, профессор (МГУТУ им. К.Г. Разумовского);
Хохлов Дмитрий Рэмович,
чл.-корр. РАН (МГУ им. М.В. Ломоносова).

СЕКЦИЯ 3

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Руководитель секции —
д-р техн. наук, профессор РАН

Назолин Андрей Леонидович

УДК 620.19

Исследование влияния технологических факторов на защитные свойства энергоресурсоэффективных лакокрасочных покрытий

Болдырев Вениамин Станиславович boldyrev.v.s@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Савина Анастасия Сергеевна savina.a.s@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Богатов Никита Алексеевич nikitabogatov@list.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зоткин Александр Павлович zotkin.a.p@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Пентюхин Егор Игоревич pentyukhin.e.i@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Халаджан Евгения Арменовна e.khaladzhan@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) являются одним из основных видов защиты металлов от коррозионных процессов. Долговечность ЛКП зависит от многих факторов: природы применяемых лакокрасочных материалов (ЛКМ), физико-химического воздействия окружающей среды, технологии формирования ЛКП. При оптимальном выборе ЛКМ и систем защитного ЛКП в зависимости от условий эксплуатации окрашиваемых изделий решающее влияние на долговечность ЛКП оказывает технология его формирования на окрашиваемой поверхности. В статье рассматривается влияние ключевых технологических факторов на защитные свойства ЛКП.

Ключевые слова: *пейнт-технологии, лакокрасочные покрытия, технологические факторы, защита от коррозии*

Технологические процессы получения лакокрасочных покрытий (ЛКП) разнообразны. Это связано с функциональным назначением окрашиваемого изделия, условиями эксплуатации, характером окрашиваемой поверхности, применяемыми методами окрашивания и формирования ЛКП.

Процесс получения ЛКП заключается в выполнении следующих обязательных стадий [1]:

- подготовка поверхности перед окрашиванием;
- нанесение лакокрасочного материала (ЛКМ);
- отверждение.

Каждая стадия оказывает влияние на качество получаемого ЛКП и его долговечность. Немаловажное значение в обеспечении защитного действия ЛКП при прочих равных условиях имеет природа применяемого грунтовочного слоя как фактора обеспечения хорошей адгезии комплексного ЛКП и общая толщина покрытия. В связи с этим при разработке конкретных технологических процессов окрашивания для получения долговечного ЛКП важен оптимальных выбор каждой стадии процесса окра-

шивания, грунтовочного слоя и толщины ЛКП. Рассмотрим влияние указанных факторов на долговечность ЛКП в отдельности.

Подготовка поверхности перед окрашиванием играет важную роль в обеспечении долговечности всего ЛКП. Многолетний опыт применения ЛКП в различных отраслях промышленности показывает, что их долговечность на 65…75 % определяется качеством подготовки поверхности перед окрашиванием. Недостаточная подготовка поверхности металла перед окрашиванием вызывает ряд нежелательных последствий:

- ухудшение сцепления ЛКП с основой (адгезия);
- развитие под ЛКП коррозионных процессов;
- образование в ЛКП пузырьков;
- растрескивание и расслоение ЛКП;
- ухудшение декоративных свойств ЛКП.

Между долговечностью ЛКП и степенью очистки поверхности существует четко прослеживаемая зависимость. В случае применения механических способов подготовки поверхности ориентировочные коэффициенты повышения сроков службы систем ЛКП в зависимости от подготовки поверхности можно представить следующим образом [2, 3]:

- окрашивание по ржавой или неподготовленной поверхности – 1,0;
- очистка ручным способом — 2,0–1,5;
- абразивная очистка — 3,5–4,0.

В качестве примера можно привести данные по долговечности комплексного ЛКП на основе хлорвинилового пленкообразователя толщиной 120 мкм в зависимости от способа подготовки поверхности перед окрашиванием, представленные в табл. 1. Данные получены при проведении натурных испытаний ЛКП эмалью ХВ-16 (4 слоя) по грунтовке ФЛ-03к (2 слоя) на атмосферной станции в г. Хотьково (Московская область).

В табл. 1 показаны также данные по влиянию способа подготовки поверхности на долговечность системы ЛКП грунтовкой ГФ-017 и эмалью МЛ-12 красной толщиной 80 мкм в условиях умеренного климата.

Таблица 1

Долговечность комплексного ЛКП в зависимости от способа подготовки поверхности перед окрашиванием

Способ подготовки поверхности	Долговечность, лет	
	Эмаль ХВ-16	Эмаль МЛ-12
Ручная очистка	3	—
Механическая очистка	4	—
Травление	6	—
Пескоструйная очистка	8	—
Обезжиривание	—	3
Пескоструйная очистка	—	7
Фосфатирование без активатора	—	10
Фосфатирование с активатором	—	12

Нами было изучено влияние свойств фосфатных слоев на защитные и физико-механические характеристики покрытия эпоксидно-перхлорвиниловой эмалью ЭП-1267 при ее нанесении на стальную поверхность, подвергающуюся при эксплуатации воздействию нефти, пластовых вод, повышенной температуры до 100 °С. Как правило, в указанных условиях эксплуатации ЛКП выходят из строя из-за отслаивания пленки в следствии плохой адгезии, связанной с недостаточной подготовкой поверхности [4].

На основании проведенных испытаний и сравнения защитных свойств ЛКП, сформированных на поверхностях, обезжиренных уайт-спиритом, специальным моющим составом КМ-17, а также обработанных фосфатирующим составом КФА-8, было установлено, что защитные свойства ЛКП на поверхности, обработанной составом КФА-8, увеличиваются в 2,5 раза по сравнению с поверхностью, обезжиренной уайт-спиритом.

Влияние способов подготовки поверхности на защитные свойства ЛКП объясняется тем, что в случае применения механической и тем более пескоструйной очистки повышается адгезия ЛКП к поверхности металла; в случае применения фосфатных слоев наряду с повышением адгезионной прочности [5]. ЛКП наблюдается сохранение ее стабильности в процессе эксплуатации. Имеющиеся на поверхности металла фосфатный слой препятствует распространению под пленочной коррозии при воздействии агрессивных факторов. При этом фосфатирование с активаторами способствует образованию на поверхности металла малопористого кристаллического слоя, что также повышает физико-механические показатели ЛКП.

Таким образом, по степени увеличения защитных свойств комплексных ЛКП способы подготовки поверхности располагаются в следующем ряду: обезжиривание, ручная очистка, механическая очистка, пескоструйная очистка, фосфатирование, фосфатирование с активаторами.

Метод окрашивания и условия нанесения ЛКМ существенно влияют на долговечность ЛКП. Определение долговечности ЛКП на основе эмали ПФ-115, полученного различными методами, при эксплуатации в атмосферных условиях показало следующее. Более высокая устойчивость декоративных и защитных свойств наблюдается у ЛКП, нанесенных методом электростатического распыления. Затем по убыванию долговечности ЛКП следуют пневматическое распыление, обезвоздушное распыление, струйный облив, окунание. Разница в сроках службы ЛКП при переходе от одного метода окрашивания к другому может составлять 15...25 %. Объясняется эта разница различием в структуре сформированных ЛКП.

Условия нанесения ЛКМ (влажность и температура окружающего воздуха) влияют на качество и долговечность ЛКП. При несоблюдении температурно-влажностных параметров процесса окрашивания на поверхности сформированного ЛКП появляются различные дефекты (шагрень, проколы), которые приводят не только к ухудшению внешнего вида ЛКП, но и значительно снижают его долговечность. Температурно-влажностные параметры окрашивания регламентируются ГОСТ 9.105 «Покрытия лакокрасочные. Классификация и основные параметры методов окрашивания». Согласно указанному стандарту, температура воздуха при окрашивании должна быть не менее 15 и не более 30 °С, относительная влажность — не выше 80 %. Тем не менее часто возникает вопрос о возможности окрашивания при другой влажности и температуре. Стандартом допускаются другие значения указанных параметров при достижении требуемого качества ЛКП.

Режим отверждения также влияет на защитные и физико-механические свойства ЛКП. Покрытия, сформированные в результате горячей сушки, более устойчивы к воздействию климатических факторов и агрессивных сред. Это объясняется тем, что формировании ЛКП при повышенных температурах образуется более плотная сшивка ЛКП. Физико-механические свойства неоднозначно зависят от применяемой температуры сушки ЛКМ. Часто при горячей сушке наблюдается охрупчивание ЛКП, что приводит к снижению их прочностных свойств.

Природа грунтовочного слоя определяет защитное действие ЛКП. Грунтовочный слой обеспечивает прочную адгезионную связь покрытия с металлом, изоляция его от проникновения коррозионно-активных реагентов, пассивация металла.

Механизм действия грунтовок разнообразен. В соответствии механизмом защитного действия грунтовки долговечность комплексного ЛКП различна в одних и тех же условиях эксплуатации. По механизму защитного действия грунтовки подразделяются на изолирующие (ГФ-020, ГФ-021), фосфатирующие (ВЛ-02, ВЛ-08), пассивирующие (ГФ-017, ФЛ-03К, ГФ-0119), протекторные (ЭП-057), модификаторы ржавчины (ЭП-0199, ЭП-0180).

Пассивирующие грунтовки имеют лучшие защитные свойства по сравнению с изолирующими грунтовками, так как наряду с барьерной защитой металлической поверхности обладают и ингибирующими действием.

Исследовано влияние грунтовок различной природы на долговечность ЛКП эмалью ХВ-774 при воздействии уксусной кислоты. Полученные экспериментальные данные приведены в Таблице 2, откуда видно, что в данном случае влияние природы грунтовочных слоев на долговечность комплексного ЛКП связано с развитием подпленочных коррозионных процессов и характером его подавления грунтовочным слоем.

Таблица 2

Влияние грунтовочного слоя на долговечность покрытий эмалью ХВ-774 (6 сл.) при воздействии 60%-ной уксусной кислоты

Грунтовки	Скорость подпленочной коррозии, мм/год	Индукционный период, ч	Эффективный коэффициент диффузии, $Д \cdot 10^{-10}$, $см^2 \cdot с^{-1}$
ХС-068	0,701	112,2	0,59
ФЛ-03К	0,894	78,8	0,85
ХВ-050	5,430	66,6	0,99
ХС-059	7,880	57,6	1,16

Толщина ЛКП, обеспечивающих противокоррозионную защиту, должна быть достаточно большой. Толщина ЛКП влияет на скорость проникновения агрессивных агентов к поверхности металла. Поэтому для условий эксплуатации с различными параметрами агрессивности толщина ЛКП устанавливается в соответствии со степенью агрессивности среды. Так, рекомендуемая толщина ЛКП для сельской атмосферы — 120 мкм, промышленной — 150 мкм, морской — 200 мкм, химической — 300 мкм. Вместе с тем существует мнение, что не всегда наращивание толщины ЛКП приводит к повышению его противокоррозионных свойств. При значительной толщине в ЛКП могут возникать внутренние напряжения, приводящие к его растрескиванию. О целесообразности чрезмерного наращивания толщины ЛКП свидетельствуют литературные данные, приведенные в [1]. Толщина ЛКП должна гарантировать

отсутствие капиллярной проницаемости, т. е. быть несколько больше критической толщины ЛКП. Для различных условий эксплуатации превышение толщины ЛКП сверх критической колеблется в 1,5–5 раз. В идеальном случае этот коэффициент подбирается экспериментальным путем.

Таким образом, высокая долговечность и хорошие физико-механические свойства ЛКП обеспечиваются при выборе оптимальных стадий технологических операций получения ЛКП с учетом правильного выбора ЛКМ, грунтовочных слоев и толщины покрытия.

Литература

[1] Болдырев В.С., Кузнецов С.В., Меньшиков В.В. Инновационное развитие малотоннажных научно-производственных предприятий лакокрасочной отрасли. Москва, Пэйнт-Медиа, 2021.

[2] Недашковский К.И., Гульшин А.В., Аверина Ю.М. и др. Исследование коррозионной стойкости крепежных деталей из высокопрочных сталей применительно к узлам, работающим при высоком давлении в условиях морского климата. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2020, № 1, с. 94–106.

[3] Boldyrev V., Bogatov N., Razvodova A. et al. General approaches to improving anticorrosion and antifouring coatings. METAL-2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceeding, 2020, pp. 702–705.

[4] Болдырев В.С., Меньшиков В.В., Богомолов Б.Б., Аверина Ю.М., Зубарев А.М. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств. Химическая технология, 2021, т. 22, № 4, с. 183–192.

[5] Болдырев В.С., Меньшиков В.В., Ильдарханова Ф.И., Аверина Ю.М., Степаньков Е.К. Методика испытаний противокоррозионно-противообрастающих лакокрасочных покрытий с продолжительным сроком службы. Лакокрасочные материалы и их применение, 2020, № 10, с. 28–32.

УДК 536-12:538.935

Недиссипативные необратимые процессы в наномасштабных линиях передачи

Браже Рудольф Александрович brazhe@ulstu.ru
УлГТУ

Лебедев Егор Юрьевич mrcrazyspace@gmail.com
УлГТУ

Фуфаев Иван Валентинович ivan-fufaev@yandex.ru
УлГТУ

Рассмотрены следующие явления переноса в нанопроводниках с поперечными размерами менее 100 нм, например, в графеновых нанолентах с краями типа «зигзаг», обладающих металлическими свойствами, длиной, не превышающей средней длины свободного пробега электронов и дырок в двумерном газе свободных носителей заряда: диффузия, вязкость, теплопроводность и электропроводность. Показано, что при баллистическом режиме транспорта носителей заряда эти явления не сопровождаются диссипацией энергии, а соответствующие кинетические коэффициенты становятся квантованными вследствие квантово-размерных эффектов. Получены выражения для квантов диффузии, вязкости, теплопроводности и электропроводности, а также для числа квантовых каналов электропроводности, позволяющие рассчитывать потоки переносимой физической величины в нанолентах.

Ключевые слова: *необратимые процессы, квантово-размерные эффекты, явления переноса, линии передачи, баллистический режим*

Необходимым и достаточным условием обратимости любого сложного процесса является его равновесность. Обратимый процесс представляет собой последовательность равновесных состояний. Если в системе имеются градиенты каких-либо величин, описывающих ее состояние, то в ней могут протекать только необратимые процессы. Типичным примером являются явления переноса: диффузия, вязкость, теплопроводность, электропроводность и др. В них соответственно имеют место перенос массы, импульса, количества теплоты, электрического заряда [1] и других физических величин. При этом столкновения частиц — переносчиков указанных величин – приводят к рассеянию (диссипации) энергии и, в конечном счете, к повышению энтропии в замкнутой системе.

Возникает вопрос: а что, если перенос осуществляется в баллистическом режиме, т. е. на расстояние меньшее, чем средняя длина свободного пробега частиц? Тогда диссипация энергии просто не успевает произойти.

В макроскопических масштабах мы с такой ситуацией не сталкиваемся. Например, средняя длина свободного пробега молекул воздуха при нормальных условиях составляет около 10^{-7} м. Если же мы возьмем графеновую наноленту с краями типа «зигзаг» (заведомо обладающую металлическими свойствами) шириной менее 100 нм и длиной, не превышающей 1 мкм (длина баллистичности в графене), то обнаружим, что вышеуказанные явления переноса для двумерного электронного газа в этой наноленте приобретут новые, не встречающиеся в макромасштабах, свойства.

Казалось бы, при наличии градиента плотности, скорости, температуры или потенциала электрического поля электроны пройдут без столкновений с кристаллической решеткой и, уж тем более, друг с другом весь образец, не встречая никакого сопротивления. Однако тут в дело вступают процессы размерного квантования. На ширине наноленты W должно укладываться целое число полуволн де Бройля для электрона [1], так как она представляет собой одномерную (по ширине) потенциальную яму, т. е. $W_{\min} = \lambda_B/2 = \pi/k_F$, где k_F — волновое число Ферми. В названных явлениях переноса это приводит к квантованию соответствующих кинетических коэффициентов [2].

Рассмотрим поставленную проблему более детально.

Диффузия. В случае диффузии электронов (дырок) в наноленте длиной L, не превышающей длины баллистичности, коэффициент двумерной диффузии

$$D_2 = \frac{1}{2} v_F L = \frac{1}{2}\frac{E_F}{p_F} L = \frac{1}{2}\frac{k_B T}{\hbar k_F} L = \frac{k_B T}{h}\frac{L W_{min}}{N} N = \frac{k_B T}{h n_2} N,$$

где v_F, E_F, p_F — соответственно скорость, энергия и импульс Ферми; k_B — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; $\hbar$ — ее приведенное к 2π значение; T — абсолютная температура; n_2 — двумерная концентрация собственных носителей заряда; N — их число в образце.

В расчете на 1 электрон (дырку) получаем квант *квант диффузии*

$$D_{20} = \frac{k_B T}{h n_2}. \qquad (1)$$

Вязкость. Выражение для *кванта вязкости* электронного (дырочного) газа в наноленте легко получить, умножая (1) на плотность носителей заряда $n_2 m^*$ (здесь m^*— эффективная масса носителя):

$$\eta_{20} = \frac{m^* k_B T}{h}. \qquad (2)$$

Теплопроводность. Аналогично, выражение для *кванта теплопроводности* в рассматриваемой наноленте может быть получено из (2) путем умножения на удельную теплоемкость электронного (дырочного) газа $c_V = i k_B/(2m^*)$, где $i = 2$ – число степеней свободы частиц в таком двумерном газе:

$$\kappa_{20} = \frac{k_B^2 T}{h}. \qquad (3)$$

Заметим, что *квант фононной теплопроводности* в баллистическом режиме транспорта фононов в нанолентах находится в виде [3–5]:

$$\kappa_{20}^{(ph)} = \frac{\pi^2}{3}\frac{k_B^2 T}{h},$$

т. е. его величина примерно в три раза больше.

Электропроводность. Как показано Р. Ландауэром [6], в случае квантового транспорта носителей заряда в двумерном электронном газе, каждый из них дает вклад в двумерную удельную электропроводность (*квант электропроводности*):

$$\sigma_{20} = \frac{e^2}{h}. \tag{4}$$

Он обратен по величине сопротивлению фон Клитцинга $R_K = 25{,}8128$кОм — сопротивлению одного квантового канала одномерного движения электронов. Квантовая теория явлений переноса [2] дает такой же результат.

Поскольку удельную электропроводность можно выразить через концентрацию носителей заряда и их подвижность μ: $\sigma_{20} = en_2\mu$, то, приравнивая это выражение правой части формулы (4), получаем $hn_2 = e/\mu$, откуда, в соответствии с (1) приходим к хорошо известному соотношению Эйнштейна:

$$\sigma_{20} = \frac{\mu k_B T}{e}$$

теперь уже для двумерного нанопроводника.

С учетом спинового g_s и долинного g_v вырождений электронных состояний в наноленте конечной ширины W число каналов квантового транспорта носителей заряда

$$M(E_F) = g_s g_v W k_F/\pi. \tag{5}$$

В случае нанотрубки на длине окружности ее поперечного сечения должно укладываться целое число волн де Бройля для электрона. Аналогично рассуждая, легко получить выражение для числа квантовых каналов транспорта носителей заряда в нанотрубках в виде

$$M(E_F) = \tfrac{1}{2} g_s g_v d k_F. \tag{6}$$

Волновое число Ферми в формулах (5), (6) можно выразить через концентрацию свободных носителей заряда: $k_F = \sqrt{4\pi n_2/(g_s g_v)}$. При термическом возбуждении в графене это будут в равной концентрации электроны и дырки. Концентрацию и тех, и других можно вычислить по формуле [7]:

$$n_2 = p_2 = g_s g_v \frac{\pi}{24}\left(\frac{k_B T}{\hbar v_F}\right)^2.$$

Тогда

$$\frac{k_F}{\pi} = \frac{1}{\sqrt{6}}\frac{k_B T}{\hbar v_F}$$

и число каналов электропроводности в наноленте можно найти по формуле

$$M(E_F) = g_s g_v \frac{W}{\sqrt{6}}\frac{k_B T}{\hbar v_F}. \tag{7}$$

Для нанотрубки

$$M(E_F) = g_s g_v \frac{\pi d}{\sqrt{6}} \frac{k_B T}{\hbar v_F}. \quad (8)$$

Конечно, конкретные значения W и d зависят от типа края наноленты и хиральности нанотрубки. Поскольку в случае явлений переноса в двумерном электронном газе нас интересуют металлические наноленты и нанотрубки, то края графеновых нанолент должны быть типа «зигзаг», а углеродные нанотрубки должны быть типа «кресло». Тогда для нанотрубки типа (n,n) получаем диаметр [8]:

$$d = \frac{3}{\pi} l_{C-C} n,$$

где l_{C-C} – длина межатомной связи (в случае углеродной нанотрубки $l_{C-C} = 0{,}142$нм).

Наряду с выражениями (1)–(4), формулу (7) нужно учитывать при расчетах плотностей потоков переносимой физической величины в конкретных явлениях переноса в нанолентах, а формулу (8) — в нанотрубках.

Во всех описанных явлениях мы имеем дело с квантовыми явлениями переноса без диссипации энергии. Поскольку волны де Бройля электронов и дырок имеют стохастическую природу, то явления переноса в нанопроводниках и изготовленных из них линиях передачи являются необратимыми. Если же длина нанопроводников не превышает средней длины свободного пробега носителей заряда, то они, оставаясь необратимыми, являются еще и недиссипативными. Кроме того, при поперечных размерах нанопроводников менее 100 нм заметным образом проявляется квантование кинетических коэффициентов, описывающих соответствующие явления переноса.

Литература

[1] Браже Р.А. Лекции по физике. Санкт-Петербург, Лань, 2013, 320 с.

[2] Браже Р.А., Фуфаев И.В. Размерное квантование кинетических коэффициентов, описывающих явления переноса в графеноподобных нанолентах. Физическое образование в вузах, 2021, т. 27, № 2, с. 90–97.

[3] Rego L.G., Kirczenow G. Quantized thermal conductance of dielectric quantum wires. Phycical Revew Letters, 1998, vol. 81, pp. 232–235.

[4] Schwab K. et al. Measurement of the quantum of thermal conductance. Nature, 2000, vol. 404, pp. 974–977.

[5] Yamamoto T. et al. Universal features of quantized thermal coarbon nanotubes. Physical Revew Letters, 2004, vol. 92, art. no. 075502.

[6] Landauer R. Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices. The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical, Experimental and Applied Physics, 1970, vol. 21, no. 172, pp. 863–867.

[7] Fang T., Konar A., Xing H., Jena D. Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons. Applied Physics Letters, 2007, vol. 91, no. 9, art. no. 092109.

[8] Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки. Успехи физических наук, 1997, т. 167, № 9, с. 945–972.

УДК 621.372.21:53.043

О необходимости учета квантово-размерных эффектов при расчете характеристик наномасштабных линий передачи

Браже Рудольф Александрович brazhe@ulstu.ru
УлГТУ

Долгов Дмитрий Андреевич deimosrffi@yandex.ru
УлГТУ

Лебедев Егор Юрьевич mrcrazyspace@gmail.com
УлГТУ

На примере наномасштабных линий передачи двух типов: несимметричной линии на графене и двухпроводной линии на углеродных нанотрубках показано, что определяемые малыми поперечными размерами проводников, из которых они выполнены, квантовые погонные сопротивления, индуктивности и емкости значительно превышают по величине соответствующие значения, находимые из уравнений классической электродинамики. Получены выражения, которые следует использовать для расчета электрических и волновых параметров указанных линий передачи.

Ключевые слова: *линии передачи, наноленты, нанотрубки, квантово-размерные эффекты, характеристики*

Важной частью многих наноэлектронных и наноэлектромеханических устройств терагерцового диапазона частот являются нанополосковые и нанотрубные линии передачи, связывающие устройство с источником сигнала и нагрузкой. Для расчета их электрических и волновых характеристик недостаточно методов, успешно применяемых в классической электронике СВЧ. Во-первых, необходимо учитывать, что в таких линиях передачи распространяются не чисто электромагнитные волны, а связанные между собой электромагнитные волны и волны зарядовой плотности — поверхностные плазмон-поляритоны. Во-вторых, при поперечных размерах наноленты и нанотрубок порядка нескольких десятков нанометров заметную роль начинают играть квантово-размерные эффекты, которые приводят к появлению квантов электропроводности, индуктивности и емкости. Квант удельной электропроводности [1]:

$$\sigma_{20} = \frac{e^2}{h}, \qquad (1)$$

где e — элементарный заряд; h — постоянная Планка.

Выражение (1) легко получить даже из классической теории электропроводности металлов, согласно которой удельная электропроводность (в данном случае двумерная):

$$\sigma_2 = e^2 n_2 < \lambda > /(2m^*,$$

где $n_2 = 1/(WL)$ — вклад в двумерную концентрацию одного электрона в наноленте шириной W и длиной L; $< \lambda >$ — средняя длина свободного пробега электрона (в режиме баллистического транспорта $< \lambda > = L$); m^*— эффективная масса электрона, — средняя скорость движения электрона, равная его скорости Ферми ($= v_F$).

Полагая, что в случае одного канала электропроводности на ширине наноленты укладывается одна полуволна де Бройля для электрона ($W = \lambda_B/2 = h/(2m^*v_F)$ — единственное квантовое допущение, из приведенных соотношений получаем (1):

$$L_{20} = \frac{h}{2e^2 v_F}. \quad (2)$$

Также поясним физическую природу выражения (2). Сила тока, создаваемого при движении одного электрона в одном канале электропроводности, равна $I = U/R_K$, где $U = \Delta\mu$ — падение напряжения, равное работе по перемещению единичного заряда по соответствующему участку цепи.

Эта работа, в свою очередь, равна приращению средней энергии электронов, приходящейся на единицу заряда, т. е. изменению химического потенциала системы $\Delta\mu$. Здесь $R_K = 1/\sigma_{20} \approx 25{,}8128$ кОм — сопротивление фон Клитцинга — сопротивление двумерного электронного газа, приходящееся на один канал электропроводности.

Кинетическая энергия каждого электрона возрастает в среднем на ну $\Delta E_k = e\Delta\mu/2$. Число электронов, участвующих в переносе заряда, можно найти, поделив ΔE_k на расстояние между подуровнями энергии в зоне проводимости $\delta E = \hbar v_F k_F = \hbar v_F \cdot 2\pi/L$, где $\hbar = h/2\pi$ — приведенная постоянная Планка. Тогда полное приращение кинетической энергии двумерного электронного газа при протекании электрического тока будет равно:

$$(\Delta E_k)_{tot} = \frac{1}{2}\left(\frac{hL}{2e^2 v_F}\right) I^2,$$

что аналогично по своей структуре формуле для энергии магнитного поля в классической электродинамике, если под выражением в скобках индуктивность проводника. Поделив это выражение на длину проводника, получаем формулу (2) для кванта погонной индуктивности. Подчеркнем, что физическая природа этой индуктивности (называемой также кинетической индуктивностью) не магнитная, а квантовая:

$$C_{20} = \frac{e^2}{2hv_F}. \quad (3)$$

Данное выражение вытекает из того, что переход электрона в зоне проводимости с одного подуровня энергии на другой эквивалентен заряду некоторого конденсатора до энергии $\delta E = hv_F/L = (1/2)e^2/C_2$ где $C_2 = C_{20}L$ — емкость такого конденсатора. Во избежание недоразумений отметим, что в цитируемой работе [2] вместо (3) приводится выражение $C_{20} = 2e^2/(hv_F)$. Это связано с тем, что там учтены спиновое и долинное вырождения энергетических состояний электронов в графене и углеродных нанотрубках [3]. Мы здесь приводим выражение для кванта погонной емкости без учета этого обстоятельства, не привязываясь к конкретному материалу и принимая во внимание только один канал электропроводности, соответствующий транспорту лишь одного электрона.

Пространственное квантование энергетических состояний электронов в наноленте состоит в том, что на ее ширине W должно укладываться целое число полуволн де Бройля для электронов, что определяет общее число квантовых каналов для их транспорта в наноленте:

$$M(E_F) = g_s g_v W k_F/\pi, \quad (4)$$

где g_s и g_v — спиновое и долинное вырождения электронных состояний в материале нанопроводника соответственно; k_F — волновое число Ферми.

В случае нанотрубки на длине окружности ее поперечного сечения должно укладываться целое число дебройлевских волн, откуда число квантовых каналов электропроводности в нанотрубке диаметром d получается равным

$$M(E_F) = (1/2) g_s g_v d k_F. \quad (5)$$

Разумеется, что значения W и d не произвольные, а определяются типом края наноленты и индексами хиральности нанотрубки. Кроме того, эти нанопроводники должны обладать металлическими свойствами.

С учетом выражений (1)-(5) погонные значения квантовых электрических параметров наноленты и нанотрубки будут находиться в виде

$$(R_0)_{ribbon} = [2M(E_F)\sigma_{20}W]^{-1}, \quad (R_0)_{tube} = [2M(E_F)\sigma_{20}\pi d]^{-1}; \quad (6)$$

$$L_0 = \frac{L_{02}}{2M(E_F)}; \quad (7)$$

$$C_0 = 2M(E_F)C_{20}. \quad (8)$$

Появление коэффициента «2» в выражениях (6)—(8) связано с тем обстоятельством, что здесь имеется в виду термическая генерация электронов и дырок, при которой

$$k_F = \sqrt{4\pi n_i/(g_s g_v)},$$

где двумерная концентрация свободных носителей заряда:

$$n_i = n = p = g_s g_v \frac{\pi}{24}\left(\frac{k_B T}{\hbar v_F}\right)^2. \quad (9)$$

Здесь в выражении (9) k_B — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\hbar$ — приведенная постоянная Планка.

Рассмотрим для определенности два типа наномасштабных линий передачи (рисунок, *а*, *б*): несимметричную нанополосковую линию передачи на графене и двухпроводную линию на углеродных нанотрубках. Будем считать, что графеновая нанолента имеет края типа «зигзаг», а ее ширина W = 13 нм, что соответствует 30 гексагонам из атомов углерода и 29 «перемычкам» между ними. Между наноленто и широкой металлической пластиной находится диэлектрическая подложка из карбида кремния (SiC) с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r = 9,66. Углеродные нанотрубки имеют торцы типа «кресло» и хиральность (30, 30), что соответствует их диаметру d = 4,1 нм. Указанные наноленто и наотрубки заведомо обладают металлическими свойствами, т. е. являются хорошими проводниками и могут быть использованы в линиях передачи. В таблице представлены результаты расчета погонной ин-

дуктивности $L_0^{(кл)}$, погонной емкости $C_0^{(кл)}$ и волнового сопротивления $Z_0^{(кл)}$ исследуемых линий передачи (без учета их квантовых составляющих) по формулам классической электродинамики, взятым из [4, 5]. Там же содержатся результаты расчета числа квантовых каналов электропроводности $M(E_F)$ в этих линиях и погонных значений сопротивления $R_0^{(кв)}$, индуктивности $L_0^{(кв)}$ и емкости $C_0^{(кв)}$ по формулам (6)–(8), учитывающим квантово-размерные эффекты в соответствующих нанопроводниках.

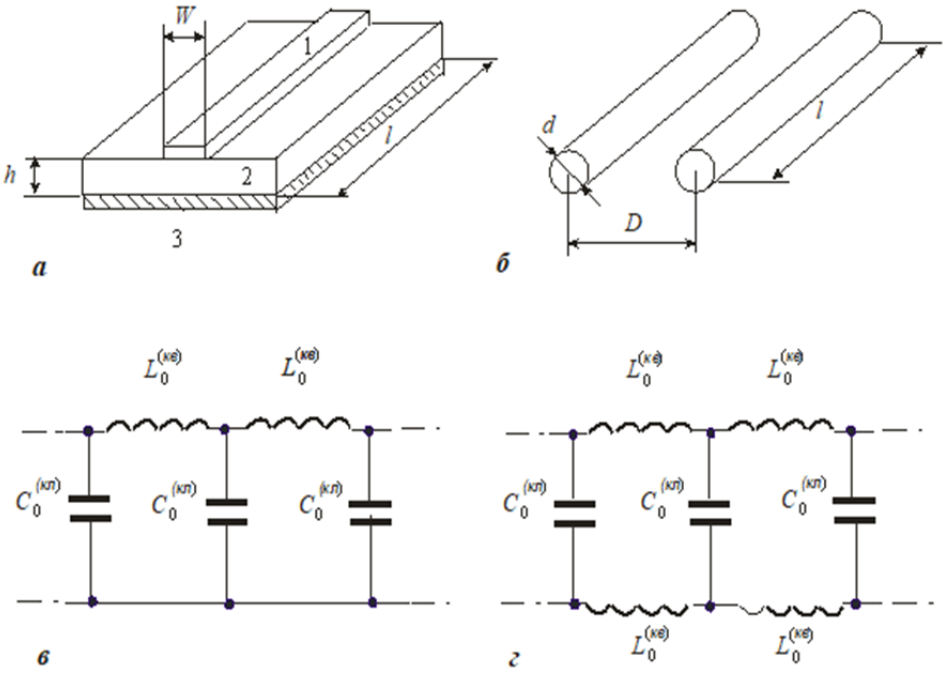


Рис. Исследуемые наномасштабные линии передачи:

несимметричная на графене (а), двухпроводная на углеродных нанотрубках (б) и соответствующие им эквивалентные схемы (в) и (г): 1 — нанолента; 2 — диэлектрик; 3 — металлическая пластина

Из приведенных результатов видно, что $L_0^{(кв)} \gg L_0^{(кл)}$ и $C_0^{(кв)} \gg C_0^{(кл)}$, поэтому для расчета волнового сопротивления рассматриваемых здесь линий передачи $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ приняты следующие значения погонной индуктивности и погонной емкости: $L_0 = L_0^{(кв)}$ и $C_0 = C_0^{(кл)}$. Здесь учтено, что при последовательном соединении индуктивности складываются, а у емкостей складываются их обратные величины.

Результаты расчета Z_0 производились в соответствии с эквивалентными схемами (рисунок, *в*, *г*) и также представлены в таблице.

Анализ полученных результатов показывает, что даже в баллистическом режиме транспорта свободных носителей заряда в наномасштбных проводниках вследствие квантово-размерных эффектов в них имеет место квантовое сопротивление. От обычного активного сопротивления, обусловленного рассеянием носителей заряда на фононах, оно отличается тем, что не вызывает нагрев проводника.

Характеристики исследуемых наномасштабных линий передачи

Параметр	Несимметричная нанополосковая линия	Двухпроводная линия на углеродных нанотрубках
W, нм	13	–
D, нм	–	41
h, мкм	1,0	–
d, нм	–	4,1
$L_0^{кл}$, Гн/мкм	$1{,}28\times10^{-12}$	$1{,}18\times10^{-12}$
$C_0^{кл}$, Ф/мкм	$4{,}61\times10^{-18}$	$9{,}45\times10^{-18}$
$Z_0^{кл}$, Ом	167	125
$M(E_F)$	10	5
$R_0^{кв}$, Ом/мкм	$99{,}3\times10^{3}$	201×10^{3}
$L_0^{кв}$, Гн/мкм	$8{,}10\times10^{-9}$	$1{,}62\times10^{-8}$
$C_0^{кв}$, Ф/мкм	$4{,}82\times10^{-15}$	$2{,}41\times10^{-15}$
Z_0, кОм	41,9	41,4

Кроме того, появляются также квантовая индуктивность и квантовая емкость, которые могут превосходить их классические аналоги в линии передачи на два-три порядка. Таким образом, при расчете электрических и волновых характеристик наномасштабных линий передачи необходимо учитывать эффекты размерного квантования, обусловленные их малыми поперечными размерами.

Литература

[1] Landauer R. Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices. The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical, Experimental and Applied Physics, 1970, vol. 21, no. 172, pp. 862–867.

[2] Luryi S. Quantum capacitance. Applied Physics Letters, 1988, vol. 52, no. 6, pp. 501–503.

[3] Burke P.N. An RF circuit model of carbon nanotubes. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2003, vol. 2, no. 1, pp. 55–58.

[4] Hammerstadt E.O. Equation for Microstrip Circuit Design. 5th European Microwave Conference. Hamburg, IEEE, 1975, pp. 268–272.

[5] Малков Н.А., Пудовкин А.П. Устройства сверхвысоких частот. Тамбов, Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2008, 92 с.

УДК 53.087.3

Стенд оптического обнаружения беспилотных летательных аппаратов в видимом и УФ-диапазоне

Винтайкин Иван Борисович Vintaikin_IVan@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Назолин Андрей Леонидович nazolin72@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Морозов Андрей Николаевич amor@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Глушков Владимир Леонидович vladimirglushkov@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Голяк Илья Семенович iliyagol@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Свирин Виктор Витальевич v_svirin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Фуфурин Игорь Леонидович igfil@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Анфимов Дмитрий Романович anfimovdr@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Голяк Игорь Семенович golyakis@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

События последних месяцев выявили, что широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) несет с собой растущую угрозу применения БПЛА в террористических целях. Использование оптических методов в решении задач обнаружения, идентификации и определения параметров БПЛА приобретает большое значение. Ранее проведенные исследования оптических методов обнаружения в видимом и ИК-диапазонах показали, что использование нескольких оптических диапазонов позволяет компенсировать недостатки каждого из них, повысить надежность оптического обнаружения БПЛА.

Ключевые слова: *оптические методы, идентификация, видимый диапазон, беспилотный летательный аппарат, ультрафиолетовый диапазон*

События последних месяцев выявили, что широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) несет с собой растущую угрозу применения БПЛА в террористических целях. Использование оптических методов в решении задач обнаружения, идентификации и определения параметров беспилотных летательных аппаратов приобретает большое значение. Ранее проведенные исследования оптических методов обнаружения в видимом и нфракрасном (ИК) диапазонах [1, 2] показали, что использование нескольких оптических диапазонов позволяет компенсировать недостатки каждого из них, повысить надежность оптического обнаружения БПЛА.

Для оценки эффективности оптических методов обнаружения БПЛА на фоне инфраструктуры, живой и неживой природы был создан и испытан экспериментальный стенд оптического обнаружения БПЛА в видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазоне с УФ-лазерной подсветкой, внешний вид которого показан на рисунке. Стенд представляет собой платформу, на которой размещены компоненты обнаружения и наблю-

дения за объектами БПЛА, а также вспомогательные технические средства. Компоненты стенда смонтированы на единой платформе, которая представляет собой алюминиевую сэндвич-панель, обладающую высокой жесткостью на изгиб при малой массе.

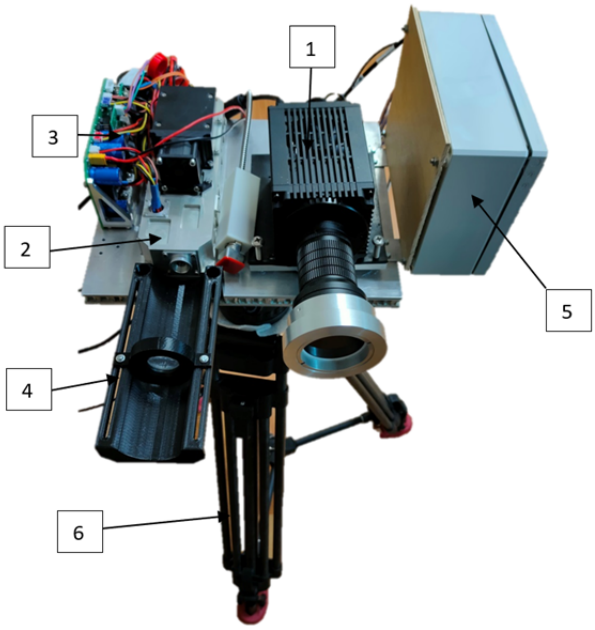


Рис. Внешний вид экспериментального стенда:

1 — блок УФ-камеры; *2* — излучатель НТЕВ.433712.016; *3* — блок питания и управления НТЕВ.436218.013; *4* — крепление линзы УФ-излучателя; *5* — модуль синхронизации; *6* — штатив

Базовым блоком стенда выступает УФ-камера Dhyana 400BSI на основе КМОП-сенсора с обратной засветкой. Камера позволяет регистрировать изображения в диапазоне от 200 нм до 1000 нм. Главная особенность УФ-камеры — возможность предварительной калибровки для подавления структурных помех, таких как DSNU (неоднородность темнового сигнала) и PRNU (неоднородность чувствительности матрицы). УФ-камера устанавливается своими штатными местами крепелния на алюминиевое основание, которое соединено с шаровым механизмом, позволяющим установить параллельность оптических осей УФ-камеры и УФ-излучателя. Для изучения возможности обнаружения и распознавания БПЛА в УФ-диапазоне применен светофильтр УФ-излучения. Светофильтр УФ-излучения крепится непосредственно на объектив видеокамеры.

Генерация УФ излучения осуществляется импульсным твердотельным лазером с диодной накачкой, работающим на длине волны 266 нм (УФ-излучатель). УФ-излучатель выполнен в отдельном герметичном корпусе и представляет собой Nd-лазер с полупроводниковой накачкой. Излучатель имеет плоский оптический резонатор, модуляция добротности осуществляется пассивным лазерным затвором на основе кристалла YAG:Cr4+. Для достижения необходимой расходимости излучения лазера, при облучении объектов на малых расстояниях, на выходе установлена линза, выполненная из кварца. Линза располагается на таком расстоянии от лазера, чтобы исключить попадание бликов от нее в апертуру излучателя. Линза может перемещаться вдоль направления облучения для достижения необходимой расходимости излучения.

Для получения УФ-изображений разработана система синхронизации УФ камеры и лазера. Система синхронизации реализована в двух вариантах на основе микроконтроллеров Arduino и STM32. Микроконтроллер связан через гальвано-оптическую развязку с камерой и УФ-лазером.

Наблюдение флюоресценции исследуемых объектов в видимом диапазоне осуществляется посредством цветной видеокамеры DFK 39GX265-Z20, способной работать в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Данная камера устанавливается отдельно на треногу и связана с УФ-лазером системой синхроимпульсов.

Управление работой стенда выполняется с помощью ноутбука. Питание осуществляется от сети переменного тока ~220 В. Информационная связь компонентов стенда с рабочим местом оператора, осуществляется по протоколам USB и COM.

В ходе проведения лабораторных и полевых испытаний проведена настройка сопряжения составных частей стенда, системы синхронизации УФ-лазера с УФ-камерой и видеокамерой, отработка прикладного программного обеспечения управления работой стенда, приема, обработки и регистрации изображений. При непосредственном направлении излучения на интересующий объект и наличии отраженного от него УФ-излучения эффективное обнаружение может быть выполнено только по геометрическим параметрам объекта. Получены изображения тест-объектов в УФ и видимом диапазоне, а также спектров люминесценции различных тест-объектов, по которым можно сделать вывод о возможности идентификации объектов в УФ-спектре при облучении УФ-лазером. Построена база УФ-изображений, с разной степенью освещенности и дистанции до БПЛА, на открытой местности на фоне естественных и искусственных объектов. Такой набор УФ-изображений необходим для настройки и обучения сверточной нейронной сети реального времени [4, 5].

Экспериментальный стенд, позволяет в автоматизированном режиме проводить регистрацию УФ-изображений отраженного УФ-излучения и видеоизображений с УФ-флюоресценцией удаленных объектов, возбуждаемых импульсным УФ-лазером. Экспериментальный стенд предназначен для отработки алгоритмов экспресс-обработки УФ-изображений и видеоизображений, оценки эффективности оптических методов обнаружения и идентификации БПЛА на фоне инфраструктуры, объектов живой и неживой природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 19-29-06009.

Литература

[1] Адоньев Е.А., Зинкевич А.В. Анализ методов идентификации беспилотных летательных аппаратов в реальном времени и способы их реализации. Информационные технологии XXI века, 2020, с. 197–202.

[2] Golyak I. S. et al. Methods for real-time optical location and tracking of unmanned aerial vehicles using digital neural networks. Automatic Target Recognition XXX. International Society for Optics and Photonics, 2020, vol. 11394, art. 113941B. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2573209

[3] Назолин А.Л. и др. Экспериментальный стенд обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов. Необратимые процессы в природе и технике. тр. XI Всерос. конф.: в 2 т., 2021, т. 2, с. 76–79.

[4] LeCun Y. et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. Neural computation, 1989, vol. 1, no. 4, pp. 541–551. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541

[5] Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: better, faster, stronger. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017, pp. 7263–7271. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.690

УДК 535.41

Система сбора и обработки данных высокочастотных гравитационных волн

Голяк Илья Семенович iliyagol@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Назолин Андрей Леонидович nazolin72@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Морозов Андрей Николаевич amor@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены вопросы создания макета системы синхронизации и сбора данных с двух лазерных интерференционных гравитационных антенн (на основе резонатора Фабри — Перо), работающих в широком диапазоне частот регистрации гравитационных волн от 100 Гц до не менее 5 МГц. Приведены и описаны глобальная и локальная схема считывания и синхронизации на основе высокоскоростной платы аналого-цифрового преобразователя и стандарта частоты.

Ключевые слова: *гравитационные волны, система сбора данных, система синхронизации, интерферометр Фабри — Перо*

Регистрация гравитационных волн является одной из важнейших проблем современности, представляющее несомненный интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для дальнейших многочисленных приложений [1–7]. Космологические теории предсказывают существование реликтовых гравитационных волн, которые могут быть обнаружены гравиволновыми детекторами в диапазоне частот $10^5...10^{10}$ Гц [6–10]. Подтверждением обнаружения гравитационно-волновых возмущений является их одновременная регистрация несколькими независимыми детекторами, синхронизированные с большой точностью между собой.

В настоящей работе рассматриваются вопросы создания макета системы сбора данных с двух лазерных интерференционных гравитационных антенн [11] (на основе резонатора Фабри — Перо) наземного и космического базирования, работающих в широком диапазоне частот регистрации гравитационных волн от 100 Гц до не менее 5 МГц [3].

Распределенная система сбора данных должна в реальном времени вести синхронную оцифровку сигналов двух антенн (частота дискретизации не более 20 МГц, разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) не менее 12 бит) с передачей данных на удаленный компьютер для кросс-корреляционной обработки сигналов двух антенн с целью выявления синхронных событий в сигналах двух детекторов гравитационных волн. Рассматривается вариант реализации разрабатываемой системы с использования плат сбора данных ADlink PCIe-9834P. Плата имеет 4 независимых канала АЦП 16 бит. В ней реализована аппаратная синхронизации отсчетов внутреннего кварцевого генератора 80 МГц по сигналу референтной эталонной частоты 10 МГц, например, с сервера времени типа Метроном-microSync или стандарта частоты типа FS740.

Объем математической обработки данных с двух гравитационных антенн напрямую зависит от погрешности синхронизации взятия отсчетов. Чем погрешность синхронизации больше, тем большее число значений кросс-корреляционной функции

требуется рассчитать. В идеале при оцифровке сигналов антенн от одного источника тактовой частоты погрешность синхронизации равна нулю и достаточно рассчитать одно значение кросс-корреляции – коэффициент корреляции Пирсона.

В случае удаленного расположения антенн погрешность синхронизации взятия отсчетов отлична от нуля и зависит от точности синхронизации и временной стабильности сигналов тактовой частоты 80 МГц плат PCIe-9834P, которая в свою очередь зависит от точности синхронизации сигналов 1 PPS (1 Гц) и 10 МГц с мировым временем UTC, их временной стабильности. Расчеты показывают, что на интервалах времени до 21 минуты Метроном-microSync HR 1xx и стандарт частоты FS740 обеспечивают идентичную погрешность синхронизации взятия отсчетов с использованием плат сбора данных PCIe-9834P.

Функциональная схема системы сбора данных двух гравитационных антенн с использованием плат PCIe-9834P и стандарта частоты FS740 представлен на рис. 1. Система сбора данных работает следующим образом. Компьютер обработки данных (PC обработки данных) по сети Ethernet заблаговременно передает компьютерам сбора данных PC1 и PC2 информацию, содержащую:

- время начала одновременной регистрации сигналов двух гравитационных антенн (например, UTC 10:55:01 октябрь 9, 2022);
- число секунд измерения (передачи) данных (например, 100).

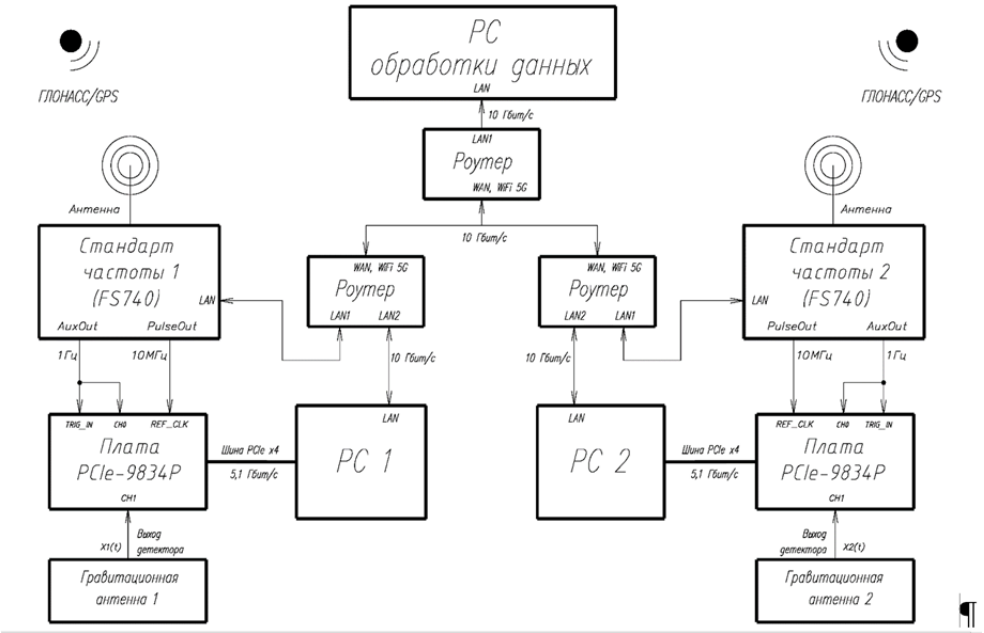


Рис. 1. Функциональная схема глобальной системы сбора данных гравитационных антенн с использованием плат PCIe-9834P и стандарта частоты FS740

Системное время компьютеров PC1 и PC2 должно быть предварительно синхронизировано с мировым временем UTC по сигналу ГЛОНАСС/GPS через спутники с использованием, например стандарта частоты FS740. На аналоговые входы CH0 и

CH1 платы PCIe-9834P подается аналоговый сигнал гравитационной антенны и сигнал 1 PPS (1 Гц) соответственно.

В назначенное время специализированное программное обеспечение PC1 и PC2 подает сигнал 1 PPS (1 Гц) стандарта частоты FS740 на вход TRIG_IN плат PCIe-9834P. По фронту сигнала 1 PPS (1 Гц) запускается АЦП сигналов, поступающих на входы CH1 и CH2, с частотой дискретизации 80 МГц. Оцифровка сигнала 1 PPS ведется для контроля числа оцифрованных значений сигнала CH1 на интервалах времени 1 с и формирования посекундных меток данных (рис. 2).

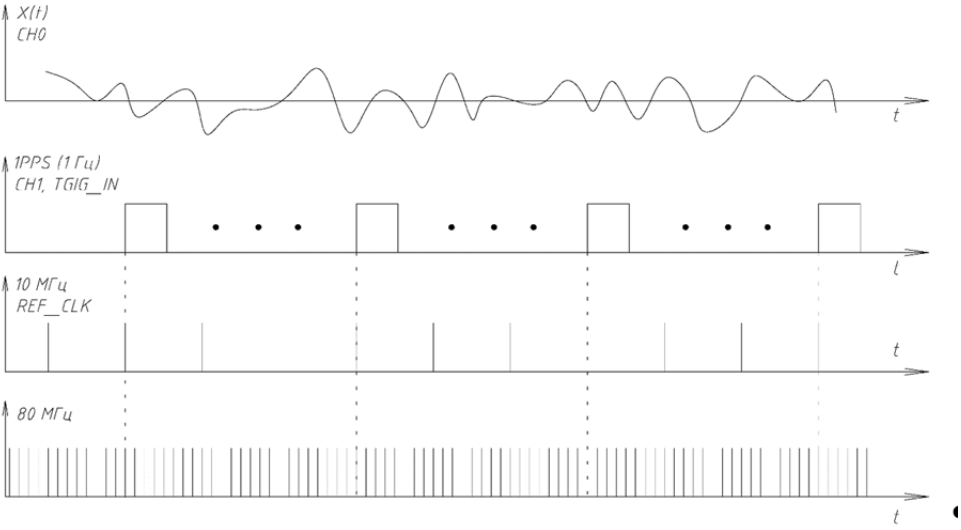


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов платы сбора данных PCIe-9834P

В режиме непрерывной потоковой передачи данных оцифрованные значения сигналов антенн предаются в ОЗУ компьютеров PC1 и PC2, где осуществляется формирование секундных меток данных и их последующая передача по каналу Ethernet в оперативную память компьютера обработки данных PC. В оперативной памяти компьютера PC работает программа, осуществляющая непрерывный прием и математическую обработку данных с компьютеров сбора данных PC1 и PC2 в реальном масштабе времени. При максимальной частоте дискретизации сигналов 80 МГц ежесекундно с двух компьютеров сбора данных PC1 и PC2 по сети Ethernet в компьютер PC должны поступать (2 антенны × 2 байта × 80 10^6) = 320 Мбайт оцифрованных данных. То есть нагрузка на сеть Ethernet составит 2,56 Гбит/с. Следовательно, сеть должна поддерживать скорость приема-передачи данных не менее 10 Гбит/с. При этом вычислительная мощность компьютера PC должна быть достаточной не только для приема, но и одновременного расчета не менее 8 значений функции кросс-корреляции в реальном масштабе времени. В случае недостаточной вычислительной мощности PC проблема решается распараллеливанием числа компьютеров обработки данных.

Современные WAN сети поддерживают до 1 Гбит/с. С внедрением технология 5G пропускную способность достигнет 10 Гбит/с и станет возможным практическая реализация разрабатываемой системы сбора данных с удаленным размещением гравитационных антенн.

В настоящее время система сбора данных может быть протестирована в локальной сети. Функциональная схема реализации такой системы представлена на рис. 3. Здесь для организации локальной сети с пропускной способностью 10 Гбит/с на каждом из компьютеров PC, PC1 и PC2 должен быть Ethernet порт 10 Гбит/с, например, сетевая плата TP-Link TX401 (интерфейс PCI-E x4, скорость 10 Гбит/с, 1 разъем RJ-45). Связь компьютеров в локальной сети может осуществляться как по витой паре cat.6, так и по оптоволоконному кабелю через коммутатор, например QNAP QSW-1208-8C.

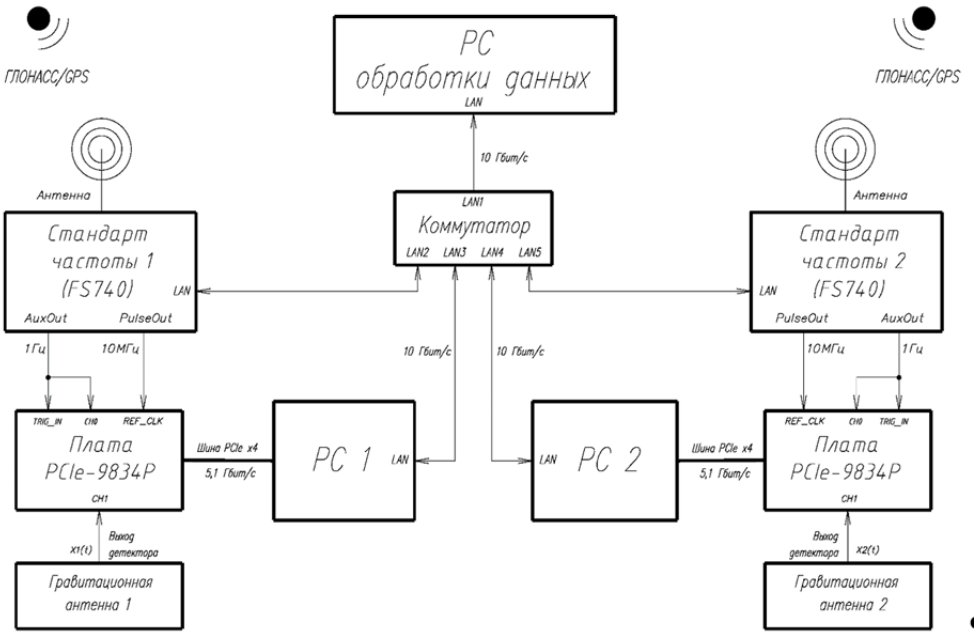


Рис. 3. Функциональная схема локальной системы сбора данных гравитационных антенн с использованием плат PCIe-9834P и стандарта частоты FS740

Программно-аппаратная реализация локальной системы сбора данных (см. рис. 3) позволит отработать технологию регистрации и обработки данных двух гравитационных антенн в лабораторных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 19-29-11015мк.

Литература

[1] Maggiore M. Gravitational wave experiments and early universe cosmology. Phys Rept, 2000, vol. 331, art. 283. DOI: https://doi.org/10.1016/S0370-1573(99)00102-7

[2] Sahni V., Sami M., Souradeep T. Relic gravity waves from brane world inflation. Phys Rev. D, 2002, vol. 65, art. 023518. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.65.023518

[3] Морозов А.Н., Назолин А.Л. Динамические системы с флуктуирующим временем. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001, 200 с.

[4] Амальди Э., Пицелла Г. Поиск гравитационных волн. Астрофизика, кванты и теория относительности. Москва, Мир, 1982, с. 241–396.

[5] Abbott B.P. et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory. Rep Prog Phys, 2009, vol. 72, art. 076901. DOI: https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/7/076901

[6] Accadia T. et al. A state observer for the Virgo invented pendulum. Review of scientific instruments, 2011, vol. 82, art. 094502. DOI: https://doi.org/10.1063/1.3637466

[7] Морозов А.Н. Необратимые процессы и броуновское движение: физико-технические проблемы. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 332 с.

[8] Фомин И.В., Червон С.В., Морозов А.Н. Гравитационные волны ранней вселенной. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 154 с.

[9] Голяк Ил.С., Морозов А.Н., Фомин И.В. Регистрация реликтовых гравитационных волн с помощью низкочастотного оптического резонанса. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки, 2022, № 4 (103), с. 50–58.

DOI: https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-2-57-67

[10] Fomin I.V., Chervon S.V., Morozov A.N., Golyak Il.S. Relic gravitational waves in verified inflationary models based on the generalized scalar–tensor gravity. Eur Phys. J.C, 2022, vol. 82, no. 642. DOI: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10601-9

[11] Голяк Ил.С., Дворук С.К., Есаков А.А., Морозов А.Н., Пустовойт В.И., Строков М.А., Табалин С.Е. Разработка и создание макета для регистрации высокочастотных гравитационных волн. Физические основы приборостроения, 2016, т. 5, № 3, с. 40–47.

УДК 546.30

Способы изготовления металлических пен

Горячева Валентина Николаевна vanigor2009@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Костылев Илья Герасимович ilyakostylev11@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Елисеева Елена Анатольевна el.yakusheva@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Карнюшкин Александр Иванович him_expert@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Приведены уравнения химических реакций разложения порофоров (гидридов и карбонатов металлов), которые широко используют в литейном методе получения металлической пены (металлы с пористой структурой). Отмечено, что металлические пены получают тремя способами (твердофазный, жидкофазный, литейный). Наиболее эффективным считают твердофазный способ, основанный на использовании металлических порошков. Указано, что металлические пены характеризуются низкой гигроскопичностью. Материалы находят применение в автомобильной и аэрокосмической отраслях, при строительстве в сейсмически опасных районах. Сделан вывод, что металлические пены находят применение при решении проблем улучшения таких свойств металлов, как жесткость, легкость, коррозионная стойкость, устойчивость к колебаниям температур.

Ключевые слова: *порофоры, пенообразователь, металлическая пена, способ получения металлической пены, твердофазный способ, жидкофазный способ, литейный способ*

Металлические пены — металлы с пористой структурой. Интерес к металлическим пенам возрос в связи с проблемами улучшения некоторых свойств металлов:

- легкость;
- жесткость;
- коррозионная стойкость;
- устойчивость к колебаниям температуры;
- демпфирующие свойства и др.

Металлические пены обладают уникальным сочетанием механических и физических характеристик. Так, например, низкая гигроскопичность данного материала способствует морозостойкости и отсутствию трещин при перепаде температур. Хорошая газопроницаемость обуславливает отличные тепло- и шумоизолирующие свойства. В автомобильной и авиакосмической отраслях вместо штампованных стальных деталей используют, в основном, сэндвич-модели.

Эти многослойные материалы состоят из прочных внешних металлических листов со средним слоем из пенометалла [1]. В сейсмически опасных районах используемые при строительстве металлические пены предохраняют конструкции от разрушения при землетрясениях. Важные в практическом плане характеристики пористых метал-

лов закладываются на стадии их получения. Среди известных способов изготовления металлических пенвыделяют:

- твердофазный;
- жидкофазный;
- литейный.

Первый способ получения металлических пен основан на использовании металлических порошков, этот способ считают наиболее эффективным. Измельченные до порошка металлы или сплавы спекают с добавление порофоров – соединений, выделяющих газ при термическом разложении. Способов введения порофоров в металлы много [2]. Например, процесс Фраунгофера состоит в смешении порошков металла с порофором, прессовании смеси и ее нагреве (использовать можно три способа получения формы — прессование, прокатка, экструкзия). Придание формы способствует равномерному распределению пенообразователя.

Второй способ получения металлических пен основан на смешении металлического порошка и порофора с последующим нагревом при высокой температуре в сушильной печи. Газ при разложении порофора вызывает вспенивание. Пористость при данном способе достигает 5...75 %.

Третий (литейный) способ изготовления металлических пен на основе расплавов металлов нашел широкое применение благодаря его экономичности. В литейном способе выделяют:

- продувку газом;
- введение порофора;
- литье в форму.

При продувке газом (воздух, азот, аргон) через металлический расплав непрерывно поступает газ. Пузырьки газа быстро поднимаются на поверхность из-за большой выталкивающей силы жидкости с высокой плотностью. Впрыск газа производят через вращающиеся или вибрирующие форсунки. Металлическую пену снимают с поверхности жидкости (например, с помощью конвейерной ленты), она затем остывает, затвердевает. Способ позволяет получать большие объемы металлической пены с низкой плотностью продукта [3]. Размеры пор можно регулировать. В частности, при помощи колебаний, вызванных продольными волнами (как правило, ультразвуковыми). Порофоры вводят в жидкий металл. В качестве последних, как правило, используют:

- гидрид титана ($TiH_2 \rightarrow Ti + H_2 \uparrow, T = 488$ °C);
- гидрид магния ($MgH_2 \rightarrow Mg + H_2 \uparrow, T = 287$ °C);
- гидрид циркония ($ZrH_2 \rightarrow Zr + H_2 \uparrow, T = 300$ °C);
- карбонат кальция ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow, T = 900$ °C).

Порофоры различаются разными температурами разложения и составом выделяющегося газа. Гибрид титана часто вводят в алюминиевый расплав, размер ячеек варьируется от 0,5 до 5 мм [4]. Алюминиевые металлические пены, полученные по литейному способу, описаны в [5]. Расплав алюминия перемещают по обогреваемому лотку, одновременно через дозатор непрерывно вводят гидрид металла (TiH_2, ZrH_2, LiH). Из камеры металл поступает в электропечь с $T = 600...700$ °C. У выхода из печи происходит пенообразование.Далее пена поступает на движущийся кристаллизатор, где ее охлаждают путем подачи воды.Пористость пены лежит в диапазоне 80...97 %. Способ позволяет получать материалы в большом объеме, однако пенунеобходимо резать [6]. При атмосферном давлении металлы, сплавы нагревали до температуры, соответствующей интервалу температуры их плавления и температуры образования

пара, содержащегося в летучем материале. При понижении давления расплавленная масса вспенивается, при охлаждении получают пористый металл (сплавы Fe – Al – Zn, Fe – Mg – Zn, Mg – Hg, Cr – Cd, Al – Mg – Fe – Hg и др.).

Особенность литья в форму [3] – создание ячеистого каркаса с дальнейшим заполнением его жидким металлом без продувки газом и введением порофора. В первом случае металл осаждается на поверхности полиуретана: полиуретан опускают в раствор, в котором осаждается металл. В течение 10-20 мин металл оседает на полиуретане. Далее материал помещают в печь при температуре сжигания полиуретана, затем пену охлаждают.

В литейном способе по выплавляемым моделям полимерную пену превращают в структуру с открытыми порами. Основу заполняют суспензией из термостойкого материала, высушивают и заполняют открытые пустоты расплавленным металлом. После удаления формовочного материала (например, под давлением воды) получают пенометалл. Продукт имеет ту же форму, что и исходная полимерная пена. Пористость получаемых пор составляет 2,5...16 пор на 1 $см^3$. Пена дорогая, способ применим для металлов с высокой и средней жидкотекучестью, именно это свойство определяет заполняемость формы. В частности, так можно получать никелевую пену.

Разработка новых способов получения пенометаллов актуальна для современных научных исследований, так как промышленности необходимы новые материалы с новыми качественными характеристиками.

Литература

[1] Лепешкин И.А. Сэндвич-модели из вспененного алюминия. Перспективы применения. Известия МГТУ «МАМИ», 2010, № 1, с. 135–147.

[2] Лапин И.В., Кузнецов В.Г., Аминова Г.А. Новые модификации металлов в современном производстве. Известия КГАСУ, 2017, № 3, с. 188–195.

[3] Назаров М.А., Аминова Г.А., Кузнецов В.Г. Способы получения металлической пены. Вестник Казанского технологического университета, 2015, № 1, с. 204–205.

[4] Прохорчук Е.А., Леонов А.А., Власова К.А. и др. Перспективы применения пеноалюминия для изделий авиакосмической техники. Труды ВИАМ, 2021, № 12, с. 21–30.

[5] Альтман М.Б., Борок Б.А., Головчанский Б.В., Маркулов В.В., Миняев Б.Ф. Устройство для получения пеноалюминия из алюминиевых сплавов. Патент СССР № 125682. Класс 40b/330. 49/3, 1960, бюл. № 2, 2 с.

[6] Sosnic B. Process for making foamlike mass of metal. Patent no. 2.434.775 US, 1948, 2 p. URL: https://patentimages.storage.googleapis.com/06/29/49/6523873c0dcc1c/US2434775.pdf (дата обращения 20.10.2022).

УДК 621.383.51

Определение КПД солнечной батареи при искусственном освещении

Дементьева Ольга Юрьевна do06@rambler.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тимченко Светлана Леонидовна svtimchenko@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Боровикова Маргарита Михайловна rborovikova@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Павлючкова Александра Вячеславовна pavluchkova02@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Цветкова Анастасия Алексеевна anastasya.tzvet@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследовано влияние спектра падающего излучения на коэффициент полезного действия солнечной батареи. За основу взяты готовые спектральные составы источников света, экспериментально измеренные в лаборатории до начала проведения исследования. Рассчитаны коэффициенты полезного действия солнечной батареи при ее освещении различными видами ламп. На основе построенных вольт-амперных характеристик установлено, что КПД в случае освещения лампой накаливания составил 9,5 %, что является наибольшим полученным значением, лампой накаливания с люминофорным покрытием – 8,7 %, люминесцентной – 8,0 % и светодиодной – 6,3 %.

Ключевые слова: *солнечная батарея, коэффициент полезного действия, излучение, источники света, спектр*

Тенденция последних десятилетий такова, что ученые по всему миру ищут способы получения энергии, которые не затрагивали бы исчерпываемые природные ресурсы и, в идеале, уменьшали бы наносимый экосистемам вред. Наиболее перспективной является выработка энергии солнечными батареями, так как данные устройства представляют собой экологически безопасные источники энергии, способные работать достаточно долгое время без расхода дополнительных ресурсов.

Солнечная батарея (СБ) – устройство, непосредственно преобразующее энергию солнечного излучения в электрическую энергию. СБ состоит из нескольких солнечных элементов. Элемент солнечной батареи (СЭ) представляет собой пластинку кремния *n*-типа, окруженную тонким слоем кремния *p*-типа толщиной около одного микрона, с контактами для присоединения к внешней цепи. Его действие основано на использовании внутреннего фотоэффекта в неоднородных полупроводниковых структурах. При попадании света на *p*-область *p–n*-перехода в полупроводнике генерируются дополнительные носители заряда, обладающие избыточной потенциальной энергией, которые перемещаются под действием электрического поля и создают на внешних выводах фото ЭДС. Таким образом, избыточная потенциальная энергия носителей преобразуется в электрическую энергию [1, 2].

В данной работе был определен искусственный источник света, при котором солнечная батарея обладает наибольшим КПД.

Экспериментальная часть

Для достижения цели исследования было необходимо: получить экспериментально вольт-амперные характеристики солнечного элемента при освещении его четырьмя разными видами ламп: накаливания, светодиодной, люминесцентной и накаливания с люминофорным покрытием; для каждой лампы определить *максимальную мощность,* вырабатываемую СБ; вычислить *поток излучения падающего света* как произведение значения интенсивности света каждой лампы, измеренного термоэлектрической батареей (принцип работы которойоснован на эффекте Зеебека) на площадь солнечной батареи; и, далее, во всех четырех случаях найти КПД СБ, как отношение потока излучения падающего света к максимальной мощности; сделать выводы, проанализировав спектральный состав излучений и полученные значения коэффициентов полезного действия.

В работе использовалась *солнечная батарея*, состоящая из четырех кремниевых солнечных элементов, имеющих суммарную площадь, соединенных последовательно, используемая для питания устройств постоянным напряжением около 94,24 см^2 (4×3,1×7,6 см) при максимальном токе 0,8 А; т*ермоэлектрическая батарея*, площадь измерительной поверхности которой, согласно паспортным данным, равна 4,9 см^2; реостат и цифровой мультиметр; штатив с линейкой; *комплект ламп*: 1) *накаливания с люминофорнымпокрытием* (1545 лм); 2) *накаливания без покрытия* (415 лм); 3) *светодиодная* (300 лм); 4) *люминесцентная* (405 лм). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 (подробно о установке [3, 4]).

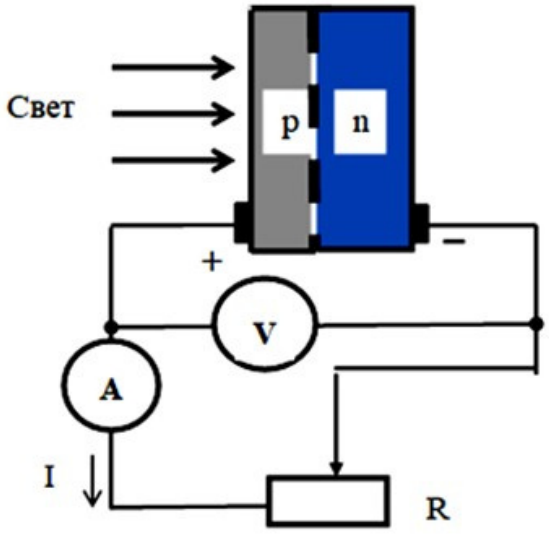


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (подключения солнечного элемента)

Спектры ламп, использованных в исследовании, представлены на рис. 2.

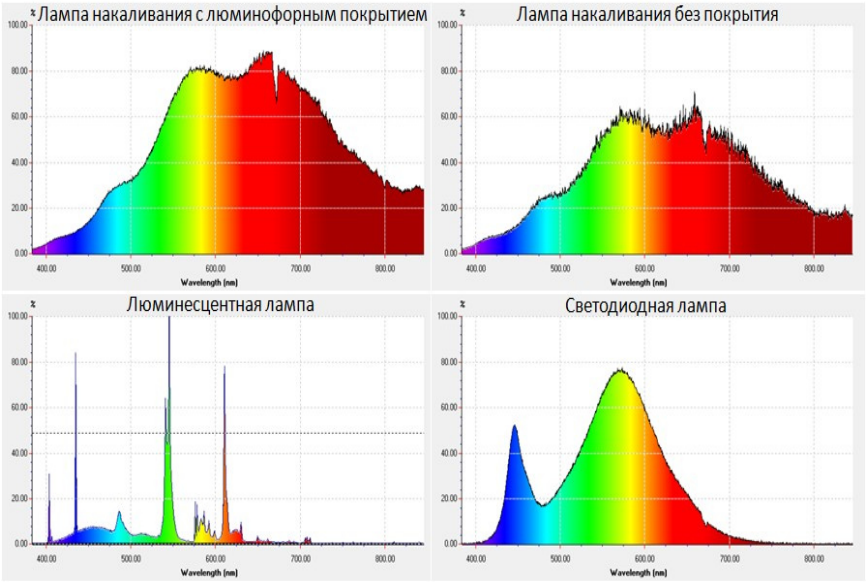


Рис. 2. Спектры ламп, использованных в исследовании

В результате измерений и математических расчетов были получены ВАХ всех четырех ламп (рис. 3), и определены КПД солнечной батареи в каждом случае.

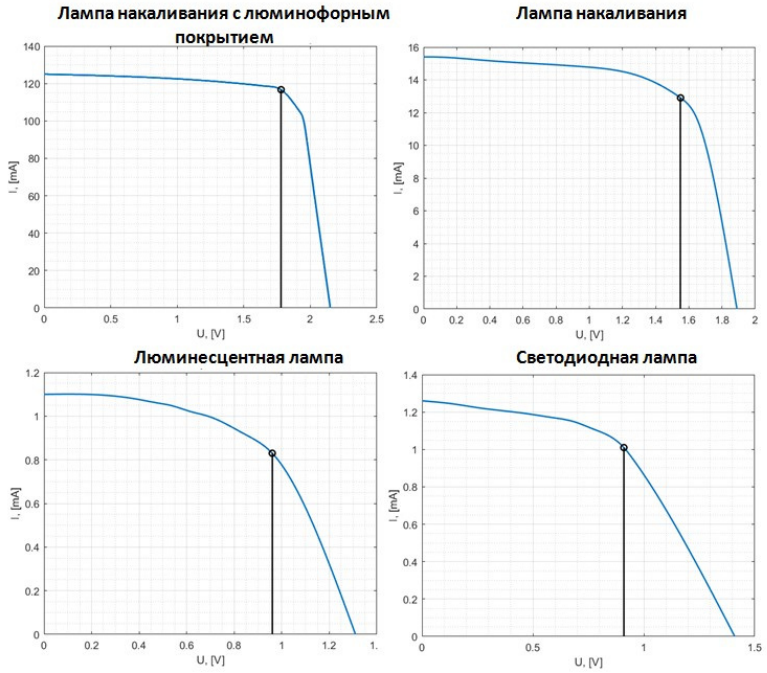


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики солнечной батареи при освещении разными видами ламп

Важно отметить, что площадь излучения лампы накаливания с люминофорным покрытием значительно превышает значения площадей излучения остальных ламп, в результате чего площадь поверхности СБ, освещаемая разными источниками будет различной. Для более точного сравнения КПД необходимо умножить значение каждого из них на коэффициент, представляющий из себя отношение площади излучения лампы накаливания с покрытием к площади каждой из трех других соответственно (этот коэффициент, по сути, корректирует расчеты потока излучения на СБ).

На рис. 3 при освещении СБ лампой накаливания с люминофорным покрытием мощность излучения, падающего на СБ, составляла 2,38 Вт. При этом максимальная электрическая мощность солнечной батареи P_{max} = 207,726 мВт, что соответствует КПД солнечной батареи η_1 = 8, 7 %.

Рис. 3 демонстрирует также ВАХ солнечной батареи при ее освещении лампой накаливания без покрытия (мощность излучения составляла 0,373 Вт). При этом максимальная мощность СБ составила P_{max} = 19,995 мВт. Учитывая коэффициент, описанный ранее, КПД солнечной батареи η_2 = 9,5 %. В случае освещения люминесцентной лампой (см. рис. 3), мощность излучения которой 0,016 Вт, на СБ вырабатывается максимальная электрическая мощность P_{max} = 0,796 мВт, и, с учетом коэффициента отношения площадей излучения, получаем КПД солнечной батареи равный η_3 = 8,0 %. Светодиодное же освещение с потоком 0,0198 Вт вырабатывает на СБ электрическую мощность P_{max} = 0,910 мВт, что соответствует коэффициенту полезного действия η_4 = 6,3 % (с учетом коэффициента отношения площадей излучения) — наименьшее значение.

Столбчатая диаграмма, отражающая полученные результаты, изображена на рис. 4.

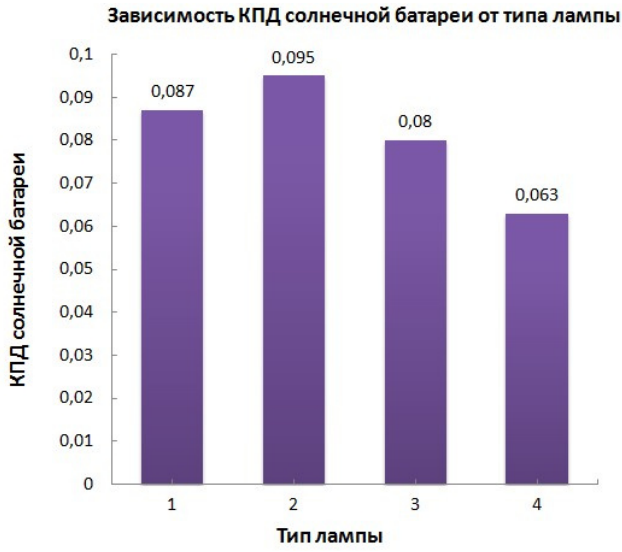


Рис. 4. Столбчатая диаграмма с полученными значениями КПД:

1 — лампа накаливания с люминофорным покрытием; *2* — лампа накаливания; *3* — люминесцентная; *4* — светодиодная

Обсуждение полученных результатов

Анализируя спектры ламп накаливания (см. рис. 2), можно заметить, что для ламп накаливания они практически совпадают и являются непрерывными, в то время как для люминесцентной он будет более дискретным. Непрерывным является и спектр светодиодной лампы, однако для последних двух видов ламп количество фотонов красного цвета (с длиной волны $\lambda > 600$ нм) минимально по сравнению с лампами накаливания. Это означает, что по сравнению с освещением светодиодной и люминесцентной лампами, поверхность солнечной батареи будет сильнее нагреваться; с теоретической точки зрения, это приведет к снижению КПД. Однако полученные экспериментально результаты не совпадают с ожидаемыми. Это могло произойти по ряду причин. Помимо обыкновенных погрешностей измерений, необходимо учитывать, что мы имели дело с лампами, имеющими разные значения светового потока, измеряемого в люменах. Совершенно очевидно, что лампа накаливания на 1545 лм будет вырабатывать гораздо больший КПД, чем светодиодная со световым потоком 300 лм, если сравнить их спектры. Не удалось добиться теоретически ожидаемой иерархии значений коэффициента полезного действия даже численным приведением площадей излучения к одной с помощью соответствующих коэффициентов. Существует и второе предположение, почему были получены такие результаты. Возможно, это связано с тем, что при проведении опытов с люминесцентной и светодиодной лампами, солнечная батарея была уже нагрета выше комнатной температуры из-за предыдущих экспериментов с лампами накаливания, что могло привести непосредственно к понижению КПД, поскольку электрическая мощность, вырабатываемая солнечным элементом, зависит от температуры самого элемента.

Заключение

Исследование показало, что коэффициент полезного действия солнечной батареи напрямую зависит от спектра падающего на нее излучения так как последний, в свою очередь, непосредственно влияет на значение вырабатываемой на солнечном элементе электрической мощности. Также немаловажным фактором влияния является температура самого солнечного элемента, ведь при ее повышении КПД заметно уменьшается. Определяющий фактор здесь — наличие достаточного количества фотонов длины волны, меньшей по значению красной границы внутреннего фотоэффекта.

Несмотря на многообещающие перспективы развития, на сегодняшний день остается нерешенной столь важная проблема, как хранение выработанной энергии. Также немаловажную роль играет вопрос утилизации материалов, требующихся для изготовления солнечных батарей, и довольно высокая стоимость этих материалов.

Литература

[1] Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 360 с.

[2] Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В. Изучение работы солнечной батареи. Казань, Казанский университет, 2014, 33 с.

[3] Дементьева О.Ю., Тимченко С.Л. Характеристические кривые солнечных батарей. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 21 с.

[4] PHYWE. Available at: https://www.phywe.de/ (accessed September 16? 2022).

УДК 681.7

Разработка и юстировка квантового каскадного лазера

Дёмкин Павел Павлович Demkin.Pavel1996@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Анфимов Дмитрий Романович anfimovdr@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Голяк Игорь Семенович golyakis@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Голяк Илья Семенович iliyagol@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гылка Роман Андреевич gyylkara@student.bmstu.ru
ЦПФ МГТУ им. НЭ. Баумана

Карпов Иван Александрович kia21f012@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Морозов Андрей Николаевич amor@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Небритова Ольга Александровна onebritova@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Фуфурин Игорь Леонидович igfil@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Разработка новых лазеров для исследования веществ в окружающей среде, в частности диагностики выдыхаемого человеком воздуха, является одной из важных задач развития лазерной спектроскопии. Для исследования многокомпонентных смесей представляется перспективным анализ ИК спектров, полученных с использованием широкополосных квантово-каскадных лазеров. Рассмотрена разработка перестраиваемого квантово-каскадных лазеров.

Ключевые слова: *ИК-спектрометрия, приборные устройства, квантово-каскадный лазер, разработка и проектирование*

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются полупроводниковыми лазерами, которые излучают в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне [1]. В отличие от типичных полупроводниковых лазеров, которые излучают свет путем рекомбинации пар электрон-дырка через энергетический разрыв между материалами, ККЛ однополярные, а лазерная эмиссия достигается за счет перехода между энергетическими уровнями в сетки квантов [2].

Созданный научным коллективом ККЛ основан на чипе Alpes Lasers sb12746, основные характеристики чипа указаны приведены ниже:

- резонатор — ячейка Фабри — Перо;
- длина 3,0 мм;
- ширина 22 мкм ;

- сопротивление 141 Ом;
- ширина спектральной линии 1 1 $см^{-1}$;
- диапазон перестройки 850...1040 $см^{-1}$;
- ширина импульса 300 нс;
- частота следования импульсов 100 кГц.

Схема квантово-каскадной усиливающей среды приведена на рис. 1.

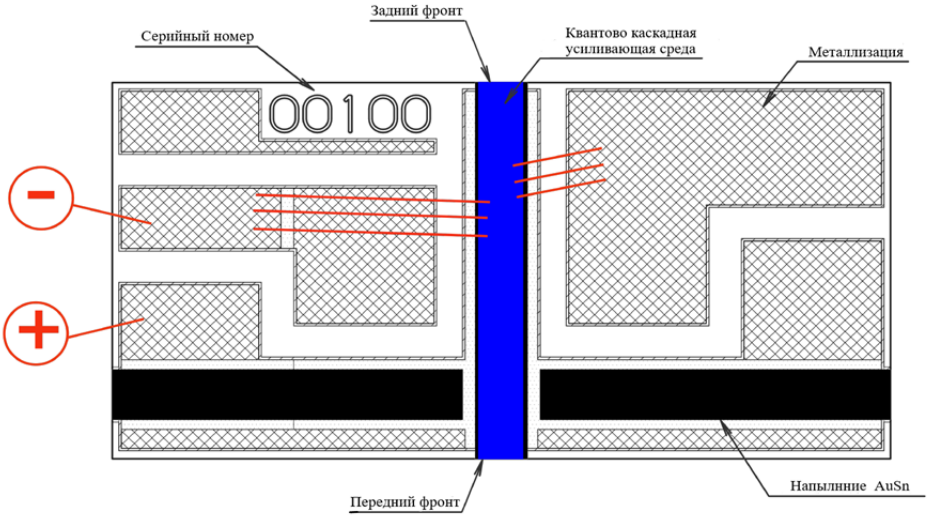
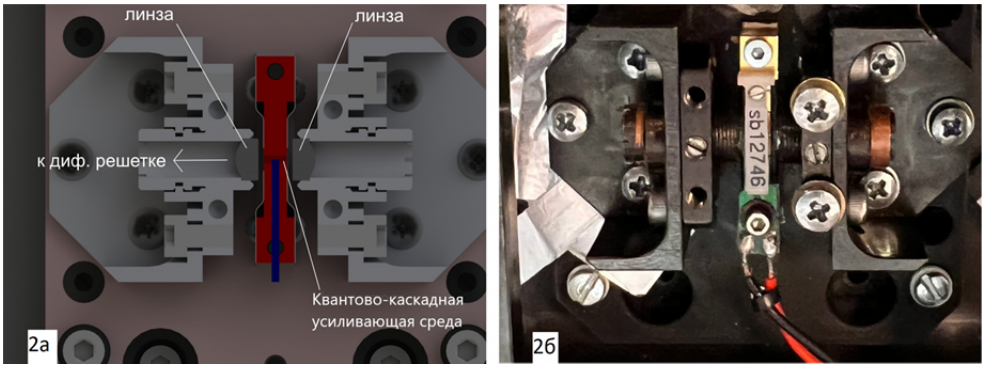


Рис. 1. Схема квантово-каскадной усиливающей среды для чипа Alpes Lasers sb12746

Чип расположен на охлаждаемой платформе с двумя закрепленными на ней инфракрасными асферическими коллимирующими линзами (рис. 2.). Данные линзы предназначены для формирования пучка лазера, и они имеют фокусное расстояние 0,7 мм.



а *б*

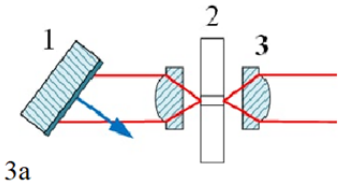
Рис. 2. Расположение чипа Alpes Lasers sb12746 на платформе:

а — 3D-модель платформы с обозначенными основными элементами; *б* — фотография платформы в экспериментальной сборке

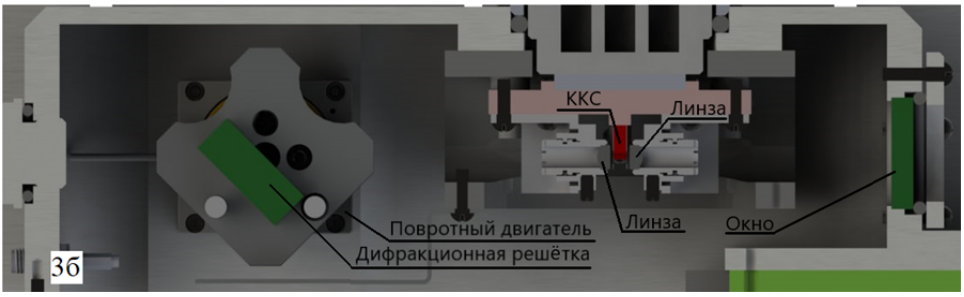
Хотя квантово-каскадная усиливающая среда может использоваться для получения некогерентного света в суперлюминесцентной конфигурации, чаще всего она используется в сочетании с оптическим резонатором для формирования лазера [3].

Для формирования перестройки ККЛ используем схему с внешним резонатором в конфигурации Литтроу (рис. 3) [4]. В ней используется дифракционная решетка, чтобы выделить одельные длины волн в дипазоне (см. основные характеристики чипа Alpes Lasers sb12746). Основные характеристики дифракционной решетки приведены ниже:

- угол клина решетки 35°;
- оптимальный эффективный диапазон 9,0...11,0 мкм;
- количество клиньев 150;
- дисперсия 4,2 нм/мрад;
- допуски по размерам ±0,5 мм.



а



б

Рис. 3. Схема резонатора в конфигурации Литтроу:

а — 3D-модель конфигурации Литроу в сборке прибора, *1* — дифркционная решетка, *2* — квантово-каскадный лазер, *3* — линзы; *а* — схема внешнего резонатора в конфигурации Литтроу;

Для вращения дифракционной решетки использован поворотный двигатель Xeryon XRT-U 30. Основные характеристики поворотного двигателя приведены ниже:

- разрешение энкодера 109 мкрад;
- тип энкодераоптический;
- точность позиционирования двигателя ± 0,017 %;
- минимальный угол поворота двигателя 125 мкрад;
- максимальная скорость двигателя 720 град/с;
- минимальная скорость двигателя 0,008 град/с.

При температуре 25° с помощью ИК-Фурье-спектрометра был получен спектр излучения, перестраиваемого ККЛ (рис. 4).

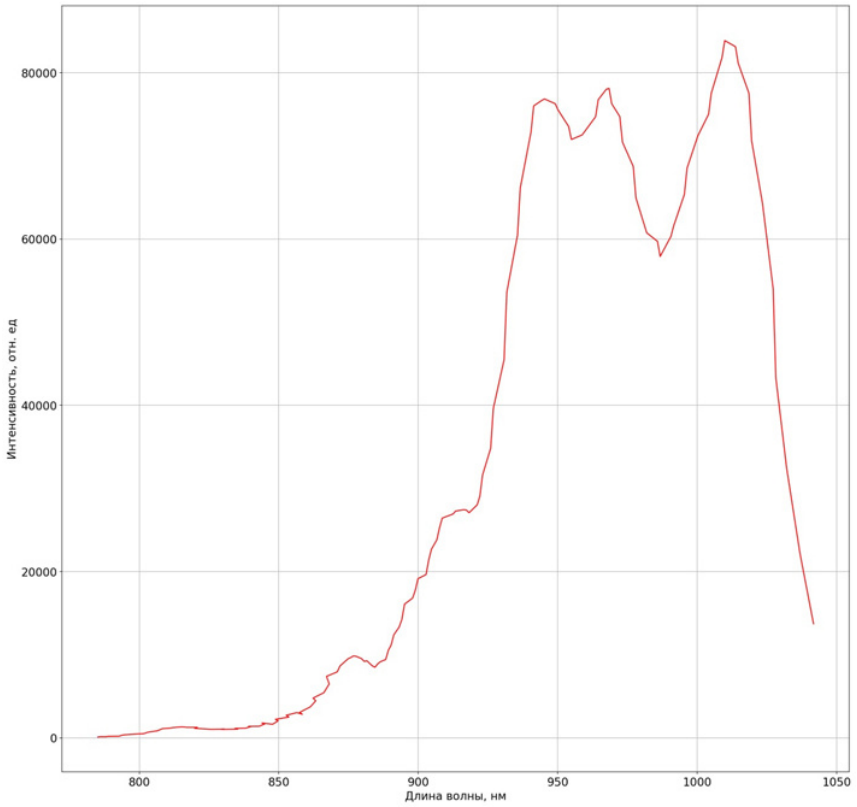


Рис. 4. Спектр перестройки квантово-каскадного лазера

Полученный результат показывает, что разработанный ККЛ можно использовать как источник излучения в диапазоне от 850 до 1040 $см^{-1}$. Наибольшая относительная погрешность интенсивности излучения равна 3,9 %.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г. № 729

Литература

[1] Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. Quantum cascade laser. Science, 1994, vol. 264, iss. 5158, pp. 553–556. DOI: https://doi.org/10.1126/science.264.5158.553

[2] Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А. О возможности усиления электромагнитных волн в полупроводниках со сверхрешеткой. Физика и техника полупроводников, 1971, т. 5, вып. 4, с. 797–800.

[3] Zibik E., Ng W., Revin D., Wilson L., Cockburn J., Groom K., Hopkinson M. Broadband 6 μm < < λ < 8 μm superluminescent quantum cascade light-emitting diodes. Applied Physics Letters, 2006, vol. 88, iss. 12, art. no. 121109. DOI: https://doi.org/10.1063/1.2188371

[4] Maulini R., Beck M., Faist J., Gini E. Broadband tuning of external cavity bound-to-continuum quantum-cascade lasers. Applied Physics Letters, 2004, vol. 84, iss. 10, art. no. 1659. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1667609

УДК 534.1

Устойчивость и волновая динамика высокоскоростных объектов, движущихся по упругим направляющим

Ерофеев Владимир Иванович erof.vi@yandex.ru
ИПФ РАН

Рассмотрены проблемы устойчивости и волновой динамики высокоскоростных объектов, движущихся по упругим направляющим, представляющие как академический интерес (постановка и решение самосогласованных задач математической физики, выявление особенностей проявления фундаментальных волновых эффектов), так и актуальных для развития высокоскоростного наземного транспорта, совершенствования конструкций реактивных катапультирующих установок (ракетных треков), применяемых при наземной отработке авиационной и ракетной техники. Приведен краткий аналитический обзор как классических публикаций по высокоскоростной волновой динамике, так и публикаций последних лет.

Ключевые слова: *высокоскоростной движущийся объект, рельсовая направляющая, ракетный трек, грунт*

В настоящее время скорость поездов приблизилась, а в некоторых случаях и превысила скорость распространения волн в железнодорожном пути и контактной подвеске. Другими словами, скорость источников возмущений стала сравнима со скоростью распространения волн. Как известно, в этой ситуации излучение волн играет существенную (а в некоторых случаях и определяющую) роль в динамическом поведении системы. Приведем некоторые цифры. Скорость поездов, функционирующих в настоящее время во Франции и Японии, колеблется от 200 до 300 км/ч. Рекордная скорость поезда, достигнутая во Франции – 574,8 км/ч. Это о скоростях источников, возбуждающих упругие волны. Теперь о скорости волн. Поверхностные волны (волны Рэлея) в грунте, окружающем железнодорожный путь, распространяются со скоростями 400...800 км/ч в жестком грунте и со скоростями 150-400 км/ч в мягком (торфяном) и водонасыщенном грунтах. Скорость изгибных волн в контактном проводе составляет 200...400 км/ч. Сравнивая вышепреведенные цифры, легко убедиться, что скорость источника упругих волн (поезда) в настоящее время сравнима со скоростью волн. В некоторых частях Европы, где железнодорожные пути проложены по мягким (торфяным) грунтам, излучаемые поездом поверхностные волны видны невооруженным глазом. Измерения, проведенные железнодорожными компаниями в Германии, Швейцарии, Англии и Франции, подтверждают нарастание вибраций железнодорожного пути при скоростях движения поезда, близких к скорости поверхностных волн. Как следствие, на «мягких» участках пути были введены ограничения скорости движения (например, «благодаря» этому эффекту, скоростной поезд Париж-Роттердам вынужден снижать свою крейсерскую скорость 180...200 км/ч на некоторых участках Голландии до 140 км/ч) или грунт был искусственно сделан жестче.

Таким образом, инженеры-железнодорожники тем или иным способом пытаются снизить скорость поезда по сравнению со скоростью поверхностных волн в пути. Однако желание двигаться быстрее остается. В этой ситуации важно изучить все потенциально опасные эффекты, связанные с высокой скоростью поезда.

Исследования в основном сосредоточены на изучении так называемых критических скоростей движения нагрузки. Эти скорости имеют большое практическое значение, так как при движении с такой скоростью объект вызывает усиление динамического отклика распределенной структуры. Физическое явление, являющееся причиной этого усиления – резонанс. Следует заметить, что критические скорости зависят не только от параметров упругой системы, но также и от упруго-инерционных свойств объекта, если они приняты во внимание.

В ряде работ было показано, что вертикальные колебания объекта, движущегося вдоль (горизонтальной) упругой направляющей, могут стать неустойчивыми. Существует два принципиальных различия между резонансом и неустойчивостью. Во-первых, неустойчивость имеет место в некотором диапазоне скоростей, в то время, как резонанс возможен только при определенных, дискретных значениях скорости. Во-вторых, амплитуда неустойчивых колебаний растет во времени экспоненциально, тогда как в случае резонанса этот рост является линейным. Этот факт обеспечивает принципиальную разницу между данными явлениями в случае учета в рассматриваемой системе вязких потерь. Если путем увеличения демпфирования возможно «погасить» резонанс, то, в случае неустойчивости, области, соответствующие этому явлению, лишь смещаются в пространстве параметров рассматриваемой системы. Очевидно, что вышеупомянутые особенности неустойчивости делают это явление гораздо более неблагоприятным для практики, чем резонанс.

Проблема движения объекта с закритическими скоростями являлась до недавнего времени академической. Однако, как было упомянуто выше, развитие скоростного железнодорожного транспорта привело к существенному увеличению скорости движения поездов, которая вплотную приблизилась к скорости поверхностных волн в грунте и изгибных волн в контактной подвеске. Как следствие, увеличились динамические напряжения, как в рельсах, так и в токонесущих проводах. В настоящее время инженеры борются с этим нежелательным эффектом, увеличивая различными методами скорость волн в железнодорожном пути и подвеске. Путь делается жестче за счет помещения бетонных плит под балласт. Подвеска же либо сильнее натягивается, либо материал, из которого она изготовлена, заменяется на более легкий.

Очевидно, однако, что данные меры не представляют собой кардинального решения проблемы, так как дальнейшее увеличение скоростей движения поездов потребует новых мер по увеличению скорости волн и так далее по принципу снежного кома. Кроме того, проложение бетонных плит под железнодорожным путем, например, является очень дорогостоящим мероприятием. Поэтому, в последнее десятилетие стали исследоваться альтернативные методы решения проблемы. В частности, было предложено перейти через «упругий барьер» (аналог звукового барьера, связанный со скоростью распространения упругих волн), а затем использовать интервал закритических скоростей движения, соответствующих малым динамическим напряжениям. Сделать это можно двумя способами. Наиболее очевидный из них – поезд ускоряется и переходит через критическую скорость (так же преодолевает звуковой барьер сверхзвуковой самолет). Как и следовало ожидать (опять же по аналогии с самолетом), исследования показали, что динамические напряжения, возникающие при переходе через «упругий барьер», тем выше, чем меньше ускорение нагрузки. Таким образом, для перехода через критическую скорость поезд должен развить достаточно большое ускорение. Это, однако, может отпугнуть пассажиров, которых вряд ли привлечет перспектива испытать перегрузки. В связи с этим напрашивается идея о переходе через «упругий барьер» за счет изменения параметров пути. Действительно, варьируя

скорость волн в пути (делая, например, грунт вблизи станций жестче), можно преодолеть критическую скорость даже в равномерно движущемся поезде.

Среди большого разнообразия экспериментальных установок, стендов и различных нагружающих устройств, применяемых при наземной отработке авиационной и ракетной техники, наиболее универсальными по своим возможностям являются реактивные катапультирующие установки (РКУ), чаще называемые ракетными треками.

Строительство и эксплуатация ракетных треков, начавшиеся в конце сороковых-начале пятидесятых годов прошлого столетия, были вызваны необходимостью экспериментальной проверки отдельных элементов и систем новых образцов авиационной и ракетной техники до начала летных испытаний, но в условиях, близких к условиям эксплуатации и боевого применения.

Достоинством ракетных треков является практическое отсутствие ограничений по габаритам и массе объектов испытания, сравнительная простота регистрации параметров, характеризующих внешние воздействия на испытываемые объекты и их реакцию на эти воздействия, а также существенно меньшие по сравнению с летными испытаниями длительность подготовки и стоимость экспериментов. Благодаря этому испытания на ракетных треках стали одним из обязательных этапов экспериментальной отработки многих изделий авиационной, ракетной, космической и другой техники.

- аэродинамические испытания снарядов, ракет, самолетов и их уменьшенных моделей;
- проверку функционирования боевых частей ракет и снарядов в полете и при взаимодействии с преградами;
- испытания на стойкость к дождевой и пылевой эрозии;
- испытания на стойкость к воздействию инерционных перегрузок;
- испытания на взрывоуязвимость;
- отработку взрывателей;
- отработку тормозных парашютов;
- отработку систем аварийного покидания самолетов;
- испытания, имитирующие авиационные катастрофы при транспортировке опасных грузов и т. д.
- Взаимодействие объекта испытания (ОИ) с различными средами может осуществляться как в процессе его движения по направляющим ракетного трека, так и после отделения от средств разгона, т. е. в свободном полете.

В некоторых случаях, например, при испытаниях на ударное воздействие, ОИ может подвешиваться в конце ракетного трека, а по его направляющим разгоняться преграда. Такие испытания принято называть обращенными, в отличие от прямых испытаний, при проведении которых разгоняется объект испытаний, а преграда устанавливается в конце ракетного трека.

Ракетный трек представляет собой две цельносварных рельсовых направляющих протяженностью 3000 м, закрепленных на мощном железобетонном основании, которое установлено на железобетонных сваях длиной 6 м. Головки рельсовых направляющих фрезерованные. С помощью регулируемых в плане и по высоте узлов крепления рельсовые направляющие выводятся в проектное положение. При этом их отклонение от прямолинейности не превышает 0,5 мм на длине 25 м.

Благодаря высокой стабильности положения свайного основания отклонения рельсовых направляющих от проектного положения вследствие сезонных изменений температуры и степени влагонасыщенности грунта практически отсутствуют. Тем не менее, службой геодезического контроля периодически (не реже одного раза в год)

производится съемка положения рельсовых направляющих и, при необходимости, выведение их в проектное положение.

Разгон полезной нагрузки (объектов испытания или имитаторов преград) по рельсовым направляющим осуществляется с помощью так называемых ракетных поездов (РП), основу которых составляют ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ).

Полезная нагрузка, как правило, размещается на последней ступени. При большой массе полезная нагрузка может оснащаться собственными башмаками для скольжения по рельсовым направляющим. В случае, если полезная нагрузка в процессе эксперимента должна отделяться от ступени РП, ее крепление осуществляется с помощью разрывных болтов.

В зависимости от вида и задач испытаний, проводимых на ракетном треке, требуется разгонять полезные нагрузки массой от нескольких кг до нескольких тонн в широком диапазоне скоростей. Основная часть испытаний (испытания на ударное воздействие, аэродинамические испытания) проводится без спасения ступени, несущей полезную нагрузку. При этом в большинстве таких испытаний требуется обеспечивать разгон полезной нагрузки до максимально возможных скоростей.

Условиями, ограничивающими достижимы скорости разгона полезной нагрузки заданной формы и массы, являются энергетические и габаритно-массовые характеристики двигателей, а также несущая способность рельсовых направляющих при динамическом нагружении ее движущимся РП.

Практика эксплуатации ракетных треков показывает, что достижение высоких скоростей разгона полезной нагрузки является комплексной задачей, затрагивающей как энергетическую вооруженность ракетного поезда и его аэродинамику, так и вопросы сохранения несущей способности конструкции РП, разгоняемых им объектов и ракетного трека.

При движении по рельсовым направляющим ступени ракетного поезда наряду с основным (поступательным, продольным) движением совершают колебания в поперечном направлении с вращением вокруг центра масс.

К настоящему времени достаточно хорошо разработана теория оптимального проектирования ракетного поезда, связанная с обеспечением его продольного движения. На ракетном треке теоретически может быть достигнута скорость разгона полезной нагрузки ~ 2900 м/с при использовании для этой цели специально разработанных двигателей. При использовании существующих в настоящее время ракетных двигателей полезные нагрузки массой 50 — 300 кг могут быть разогнаны до скорости ~ 1800 м/с. Вместе с тем опыт эксплуатации ракетных треков показал, что в процессе высокоскоростного движения динамическое взаимодействие ступени ракетного поезда с РН может сопровождаться рядом нежелательных явлений.

При проведении испытаний на ракетных треках США (лаборатория «Сандия» в Альбукерке, военная база в Холломене (ХАФБ), испытательная станция морского оружия (НОТС) в Чайна-Лейк) при скоростях разгона, превышающих 1600 м/с, возникали проблемы, связанные с фрикционным нагревом опорных башмаков ступеней РП и износом их рабочих поверхностей, повреждением и разрушением рельсовых направляющих. На ракетном треке при скоростях разгона 1160...1450 м/с взаимодействие ступени ракетного поезда с направляющей в некоторых случаях приводило к появлению волнообразных остаточных деформаций и разрушению рельсовой направляющей, износу рабочих поверхностей и разрушению опорных башмаков ступени РП.

Указанные аномалии являются следствием ряда особенностей динамики взаимодействия ступеней РП с рельсовой направляющей. Наиболее существенные и малоис-

следованные из них: волновые процессы в направляющей и условия на скользящем контакте.

Динамическое воздействие на упругую направляющую движущегося по ней объекта вызывает колебания в виде бегущих волн. В направляющих, имеющих две оси симметрии, возбуждаются чисто изгибные колебания. В общем случае из-за несовпадения центра тяжести и центра изгиба сечения направляющей в последней под действием поперечной нагрузки возникают изгибно-крутильные бегущие волны.

Взаимодействие ступени РП с рельсовой направляющей при высоких скоростях скольжения характеризуется фрикционным нагревом рабочих поверхностей до температур, близких к температуре плавления материала трущихся тел. В результате этого в слоях, прилегающих к границе контакта, происходит изменение механических характеристик материала, интенсивные пластические деформации и унос материала с рабочих поверхностей.

Несмотря на то, что практика эксплуатации ракетных треков насчитывает несколько десятков лет, математической модели, позволяющей в необходимой для прогнозирования и исключения аварийных ситуаций постановке решать задачу об устойчивости движения по рельсовой направляющей движущейся по ней высокоскоростной ступени ракетного поезда, в отечественной и зарубежной литературе опубликовано не было.

В известных работах по трековым испытаниям и проблемам взаимодействия движущихся объектов с упругой направляющей рассмотрены отдельные стороны явления, как правило, исследуются изгибные колебания направляющей (в действительности характер колебаний направляющей изгибно-крутильный), не учитываются условия на скользящем контакте (нагрев и износ рабочих поверхностей опорных башмаков ступеней РП).

К началу 2000-х гг. необходимость разработки модели взаимодействия движущейся с высокой скоростью ступени ракетного поезда и рельсовых направляющих с учетом возникающих при этом реальных эффектов и внедрения ее в практику отечественных трековых испытаний обострилась еще и тем, что в условиях экономических трудностей все больший объем отработки ракетных комплексов переместился с летных на наземные испытания и все большая часть нагрузки по отработке средств испытаний легла на численный эксперимент.

Существует большое количество работ, посвященных проблеме «движущихся нагрузок», в которых рассмотрены различные модели, описывающие взаимодействие движущегося объекта и упругой системы. До середины 1990-х гг. при расчете рельсового пути исследователи использовали главным образом одномерные модели рельсового пути. Одной из первых работ, где был рассмотрен отклик одномерной системы на движущуюся нагрузку, является работа Д. Ахенбаха [1], который рассмотрел динамический отклик одномерной балки Тимошенко, лежащей на упругом основании. В 1970 г. А.П. Филиппов [2], а затем Л. Фриба [3] опубликовали свои монографии, посвященные анализу таких систем. Позднее исследователи начали рассматривать более сложные периодически неоднородные системы, учитывающие шпальную структуру пути. В 1980 г. Л. Жезекюль [4] опубликовал работу, где впервые был рассмотрен отклик балки, лежащей на периодических эквидистантных опорах, на движение нагрузки. После этого было проведено большое количество исследований, посвященных анализу как континуальных, так и периодических одномерных систем. Особо следует выделить в этом ряде работ публикации Р. Богача, Т. Кржизинского и К. Поппа [5, 6], а также работу П.М. Белоцерковского [7].

С середины 90-х годов начались массированные исследования трехмерных моделей железнодорожного полотна, что было обусловлено бурным развитием высокоскоростного железнодорожного транспорта. Как оказалось, поверхностные волны в грунте, возбуждаемые такими поездами, оказывают существенное влияние на динамику состава, и одномерные модели показали себя несостоятельными при описании движения поездов на больших скоростях.

До этого были проведены лишь единичные исследования трехмерных моделей рельсового пути. В 1966 г. Д. Лансинг [8] опубликовал работу, посвященную движению точечной нагрузки по поверхности упругого полупространства, и еще раньше, в 1961 г., А.П. Филиппов [9] рассмотрел отклик балки Бернулли — Эйлера, лежащей на упругом полупространстве, на равномерно движущуюся нагрузку. А.П. Филиппов, в частности, показал, что отклик балки существенно возрастает, если скорость нагрузки приближается к скорости распространения волн Рэлея в грунте. В 1975 г. Дж. Лабра [10] продемонстрировал, что возрастание отклика может иметь место и при более низких скоростях, если учесть осевые напряжения в рельсах, связанные с температурным расширением.

В самом конце прошлого века исследования в этом направлении заметно активизировались, был опубликован целый ряд статей, где рассматривались различные трехмерные модели рельсового пути [11–16]. Особо следует отметить обзор по известным к тому времени моделям железнодорожного полотна К. Кноте [17] и монографию И.И. Иванченко [18].

В настоящий момент модели рельсового пути включают в себя рельсы, описываемые балкой (балками), шпалы и балласт, которые описываются как распределенные под балкой системы, и грунт, который моделируется в общем случае слоистым полупространством.

Однако, только в ограниченном количестве работ рассмотрен отклик трехмерной модели, где бы учитывался дискретный характер шпал, не изучено влияние граничных условий в контакте «путь-грунт», практически не исследован вопрос о влиянии вязкости в грунте. Остается открытым вопрос об энергозатратах поезда на поддержание равномерного движения в случае, когда скорость поезда близка или превышает скорость рэлеевских волн в грунте.

Эффект неустойчивости колебаний движущегося объекта был впервые описан в работах Г.Г. Денисова, В.В. Новикова, Е.К. Кугушевой (1985) [19] и Р. Богача, С. Новаковского, К. Поппа (1986) [20]. Было показано, что вертикальные колебания объекта, движущегося вдоль (горизонтальной) упругой направляющей, могут стать неустойчивыми. В работе А.В. Метрикина [21] (1994) было показано, что неустойчивость возникает из-за излучения аномальных по Доплеру волн, вызывающих появление «отрицательной вязкости» в точке контакта.

Особенности проявления неустойчивости при движении высокоскоростных объектов (ракетных поездов) по рельсовым направляющим ракетного трека изучались как американскими исследователями из лаборатории Лос-Аламоса [22], так и сотрудниками Института проблем машиностроения Российской академии наук (Нижний Новгород) [23–33].

Однако, несмотря на практическую важность эффекта неустойчивости, многие вопросы, связанные с этим эффектом, и сегодня остаются фактически неизученными.

Автор статьи причисляют себя к научной школе профессора А.И. Весницкого, предложившего в начале 1980-х гг. подход (работы обобщены в монографиях [34-35]), позволивший впервые физически и математически корректно ставить задачи о самосогласованном движении распределенной упругой и движущейся по ней сосредоточенной систем.

Новый подход привел к новому взгляду на проблему, выявив два ранее не учитываемых принципиально важных фактора: наличие в движущемся контакте конвективных (инерциальных) сил и сил давления упругих волн. На существование последних указывали еще Д. Рэлей [36] и Е.Л. Николаи [37]. Учет этих факторов не только позволил уточнить ранее существовавшую теорию вынужденных колебаний и резонанса в упругих конструкциях, несущих подвижные нагрузки, но и открыл пути решения ряда других актуальных проблем, таких, например, как сопротивление скольжению и качению вследствие волнообразования; соударение тел с учетом проскальзывания; устойчивость систем, движущихся по упругим направляющим; движение тел под действием давления волн.

Представляется, что для успешного решения проблем развития высокоскоростного наземного транспорта, совершенствования конструкций реактивных катапультирующих установок (ракетных треков), применяемых при наземной отработке авиационной и ракетной техники требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований устойчивости и волновой динамики объектов, движущихся по деформируемым направляющим, применительно к пантографу и контактному проводу в системе токосъема, подвижному составу и рельсовому пути, а также к проблемам совершенствования конструкций ракетных поездов, разгоняющихся по рельсовым направляющим ракетных треков. Необходима разработка трехмерных моделей рельсового пути, включающих в себя деформируемую направляющую (балка конечной ширины, пластина), лежащую на полупространстве (вязкоупругое, слоистое, нелинейно-вязкоупругое, термо-вязкоупругое, градиентно-упругое) и несущую высокоскоростную движущуюся нагрузку (осциллятор, система осцилляторов). При этом деформируемая направляющая взаимодействует с полупространством либо через дискретные опоры (шпалы), либо непосредственно. Необходимо исследовать особенности генерации волн в направляющей и полупространстве, вызванной высокоскоростным движущимся объектом; определить влияние параметров направляющих на критические скорости движения высокоскоростных объектов; произвести расчет дисперсионных и энергетических характеристик волн, распространяющихся в одномерных и двумерных системах, лежащих на деформированном основании: на полупространстве или на дискретной упругой (вязкоупругой) системе с двумя коэффициентами жесткости постели. Важно также исследовать резонансные режимы и устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим (пантограф и контактный провод в системе токосъема; подвижной состав и рельсовый путь; полезная нагрузка, разгоняемая на ракетном треке), проанализировать зависимость силы волнового сопротивления движению высокоскоростного объекта от его параметров и свойств направляющей, изучить вопрос об энергозатратах на поддержание равномерного движения высокоскоростных объектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00613)

Литература

[1] Achenbach J.D., Sun C.T. Moving load on a flexible supported Timoshenko beam. International Journal of Solid and Structures, 1965, vol. 1, pp. 353–370.

[2] Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. Москва, Машиностроение, 1970, 734 с.

[3] Fryba L. Vibration of solids and structures under moving loads. Springer Dordrecht, 1973. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-011-9685-7

[4] Jezequel L. Analysis of critical speeds of a moving load on an infinite periodically supported beam. Journal of Sound and Vibration, 1980, vol. 73, no. 4, pp. 606–610.

[5] Bogacz R., Krzyzinski T., Popp K. Influence of beam models on the solution of the generalized Mathews' problem. ZAMM, 1989, vol. 69, no. 5, pp. T320–T321.

[6] Bogacz R., Krzyzinski T., Popp K. On dynamics of systems modeling continuous and periodic guideways. Archives of Mechanics, 1993, vol. 45, no. 5, pp. 575–593.

[7] Belotserkovskiy P.M. On the oscillations of infinite periodic beams subjected to a moving concentrated force. Journal of Sound and Vibration, 1996, vol. 193, no. 3, pp. 706–712.

[8] Lansing D.L. The displacemints in an elastic half-space due to a moving consentrated normal load. NASA technical report, TR R-238, Washington, 1966, 67 p.

[9] Филиппов А.П. Установившиеся вибрации бесконечной балки на упругом полупространстве под действием движущейся нагрузки. Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1961, № 6, с. 97–105.

[10] Labra J.J. An axially stressed railroad track on an elastic continuum subjected to a moving load. Acta Mechanica, 1975, vol. 22, pp. 113–129.

[11] Dieterman H.A., Metrikine A.V. Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load. European Journal of Mechanics A/Solids, 1997, vol. 16, no. 2, pp. 295–306.

[12] Dieterman H.A., Metrikine A.V. Critical velocities of a harmonic load moving uniformly along an elastic layer. Trans. ASME. J of Applied Mechanics, 1997, vol. 64, pp. 596–600.

[13] Dieterman H.A., Metrikine A.V. The equivalent stiffness of a half-space interacting with a beam. Critical velocities of a moving load along the beam. European Journal of Mechanics A/Solids, 1996, vol. 15, no 1, pp. 67–90.

[14] Grundmann H., Lieb M., Trommer E. The response of layered half-space to traffic loads moving along its surface. Archive of Applied Mechanics, 1999, vol. 69, no. 1, pp. 55–67.

[15] Metrikine A.V., Dieterman H.A. Resonance interaction of vertical-longitudinal and lateral waves in a beam on a half-space. Trans. ASME. J of Applied Mechanics, 1997, vol. 64, pp. 951–956.

[16] Sheng X., Jones C.J.C., Petyt M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track. Journal of Sound and Vibration, 1999, vol. 228, no. 1, pp. 129–156.

[17] Knothe K., Bohm F. History of stability of railway and road vehicles. Vehicle System Dynamics, 1999, vol. 31, pp. 283–323.

[18] Иванченко И.И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. Москва, Наука, 2011, 574 с.

[19] Денисов Г.Г., Новиков В.В., Кугушева Е.К. К задаче об устойчивости одномерных безграничных систем. Прикладная математика и механика, 1985, т. 49, с. 691–696.

[20] Bogacz R., Nowakowski S., Popp K. On the stability of a Timoshenko beam on an elastic foundation under a moving spring-mass system. Acta Mechanica, 1986, vol. 61, pp. 117–127.

[21] Метрикин А.В. Неустойчивость поперечных колебаний объекта, равномерно движущегося вдоль упругой направляющей как следствие аномального эффекта Доплера. Акустический журнал, 1994, т. 40, № 1, с. 99–103.

[22] Lamb J.L. Critical velocities for rocket sled excitation of rail resonance. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000, vol. 21, no. 3, pp. 448–458.

[23] Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И. К проблеме устойчивости движения по направляющей ракетного трека. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 2013, № 3, с. 43–49.

[24] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А. Оценка работоспособности регистрирующей аппаратуры в условиях испытаний на ракетном треке. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 2013, № 2, с. 35–39.

[25] Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2015, № 1, с. 3–8.

[26] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Каныгин И.И. Оценка резонансоопасных гармоник при колебаниях упругой направляющей с движущимся по ней двухопорным объектом. Проблемы прочности и пластичности, 2015, т. 77, № 4, с. 412–424.

[27] Герасимов С.И., Ерофеев В.И. Расчет изгибно-крутильных колебаний рельсовой направляющей ракетного трека. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2016, № 3, с. 25–27.

[28] Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. Возбуждение волн нагрузкой, движущейся по поврежденной гибкой одномерной направляющей, лежащей на упругом основании. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2016, № 6, с.14–18.

[29] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Кикеев В.А., Турусов М.Р., Ганичев А.Н. Оценка прочности элементов блока видеорегистрации в условиях испытаний на ракетном треке. Транспортные системы, 2016, № 1. DOI: https://doi.org/10.46960/62045_2016_1_63

[30] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Malkhanov A.O. Problems of wave dynamics of the systems that support moving loads. MATEC Web of Conferences, 2017, vol. 129, art. no. 06030.

[31] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Герасимова Р.В., Ляхов К.И., Мельник А.В., Одзерихо И.А., Яненко Б.А. Постановка испытаний топливных упаковочных комплектов на ракетном треке. Глобальная ядерная безопасность, 2017, № 3 (24), с. 66–74.

[32] Erofeev V., Lissenkova E., Malkhanov A. Wave resistance to the movement of objects along the rocket track guides. MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 224, art. no. 02016.

[33] Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Одзерихо И.А. Условие на скользящем контакте в анализе устойчивости движения ступени на ракетном треке. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2018, № 3, с. 21–27.

[34] Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. Москва, Физматлит, 2001, 320 с.

[35] Весницкий А.И. Избранные труды по механике. Нижний Новгород, Наш дом, 2010, 248 с.

[36] Lord Rayleigh F.R.S. XXXIV. On the pressure of vibrations. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1902, vol. 3, no. 15, pp. 338–346. DOI: https://doi.org/10.1080/14786440209462769

[37] Николаи Е.Л. К вопросу об устойчивости скрученного стержня. Вестник прикладной математики и механики, 1929, вып. I, с. 41–58.

УДК 621.865.8: 62-503.57

Алгоритм непрямого управления антропоморфным захватом по параметру усилия на выходном звене

Жданова Юлия Ильдаровна musrosjk@gmail.com
РТУ МИРЭА

Мошкин Владимир Валентинович mvv56@inbox.ru
РТУ МИРЭА

Романов Михаил Петрович m_romanov@mirea.ru
РТУ МИРЭА

В антропоморфных захватах с избыточной подвижностью проблема контроля усилия на выходном звене решается за счет перехода к контролю разности текущего моментов на двигателе и приведенного момента рассчитанного по заданному усилию. Разработанный алгоритм предполагает аппаратное оснащение, включающее: датчики контакта на выходных звеньях, энкодеры фиксирующие углы относительного поворота выходных звеньев, система регистрации момента на двигателе. Все перечисленные компоненты в настоящее время устанавливаются практически на всех типах захватов.

Ключевые слова: *антропоморфный захват, адаптивное управление, групповой привод, избыточная подвижность, приведенный момент*

Настоятельная необходимость автоматизации действий, выполняемых человеком в неблагоприятных условиях, определило создание и развитие антропоморфных роботов [1]. Под антропоморфным роботом принято понимать сложный технический объект, обладающий функциональными возможностями присущими человеку: восприятия внешней среды, взаимодействия с внешними объектами, регистрации и контроля собственного состояния, анализа поступающей информации, принятия решений, передачи информации, передвижения. В наибольшей степени взаимодействию с изначально недетерминированными внешними объектами удовлетворяют антропоморфные захваты, имеющие до пяти исполнительных групп звеньев [2]. Каждая исполнительная группа имеет три выходных звена соединенные между собой вращательными парами с параллельными осями вращения.

Основная проблема, возникающая при создании антропоморфных захватов связана со сложностью реализации привода по каждой степени подвижности. При использовании индивидуальных приводов возникают проблемы недостаточной мощности двигателей — при их размещении на выходных звеньях [3], или сложностью конструкции — при вынесении двигателей на звено манипулятора [4].

Решение возникших проблем было найдено за счет использования группового привода с избыточной подвижностью [5]. В таких приводах движение всех выходных звеньев, в пределах одной исполнительной группы, обеспечивается от одного двигателя. Требуемая последовательность движения реализуется за счет введения дополнительных связей функционирования [6].

При этом осуществляется адаптивное управление движением выходных звеньев, в соответствии с которым объект управления меняется в зависимости от внешних усло-

вий. В общем случае при обхвате объектами управления последовательно выступают проксимальное (1), медиальное (2), дистальное (3) выходные звенья (рис. 1). Отсутствие индивидуального привода для каждой степени подвижности определяет сложность в реализации управления по параметру — усилие на выходном звене. При завершении процесса обхвата управляемым объектом является звено, имеющее наибольший номер *J*. При этом из-за недетерминированности положения и формы внешнего объекта управляемым, им может быть любое из выходных звеньев.

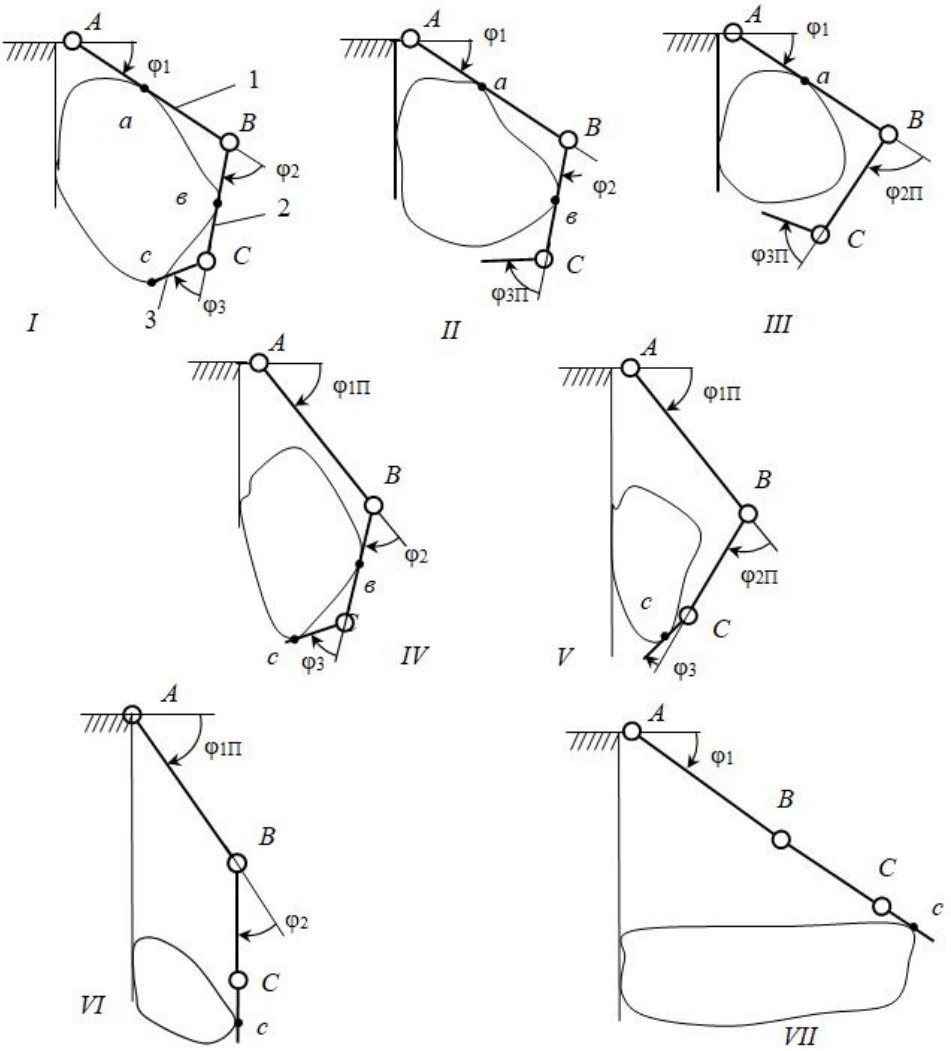


Рис. 1. Варианты взаимодействия выходных звеньев с внешним объектом на этапе его удержания:

I — контакт звеньев 1, 2, 3; *II* — контакт звеньев 1, 2; *III* — контакт звена 1; *IV* — контакт звеньев 2, 3; *V* — контакт звена 3 (при повороте звеньев 1, 2 на предельно допустимые углы); *VI* — контакт звена 3 (псевдо щипковый обхват, без поворота звена 3); *VII* — звено 3 (щипковый обхват, без поворота звеньев 2, 3)

Необходимость контроля усилия на управляемом звене J предполагает оснащение все выходных звеньев датчиками усилия. Однако в силу их значительных габаритов это трудно реализуемо.

В связи с этим для управления усилием следует использовать метод непрямого контроля (рис. 2). В его основе анализ значения приведенного к валу двигателя момента $T_{П1}$ рассчитанного по заданной величине усилия на управляемом звене F_J, и текущего значения момента на двигателе T_D. В этом случае параметром управления являться величина момента на двигателе T_D, а контролируемым параметром является разность моментов δT :

$$\delta T = T_D - T_{Пk} \tag{1}$$

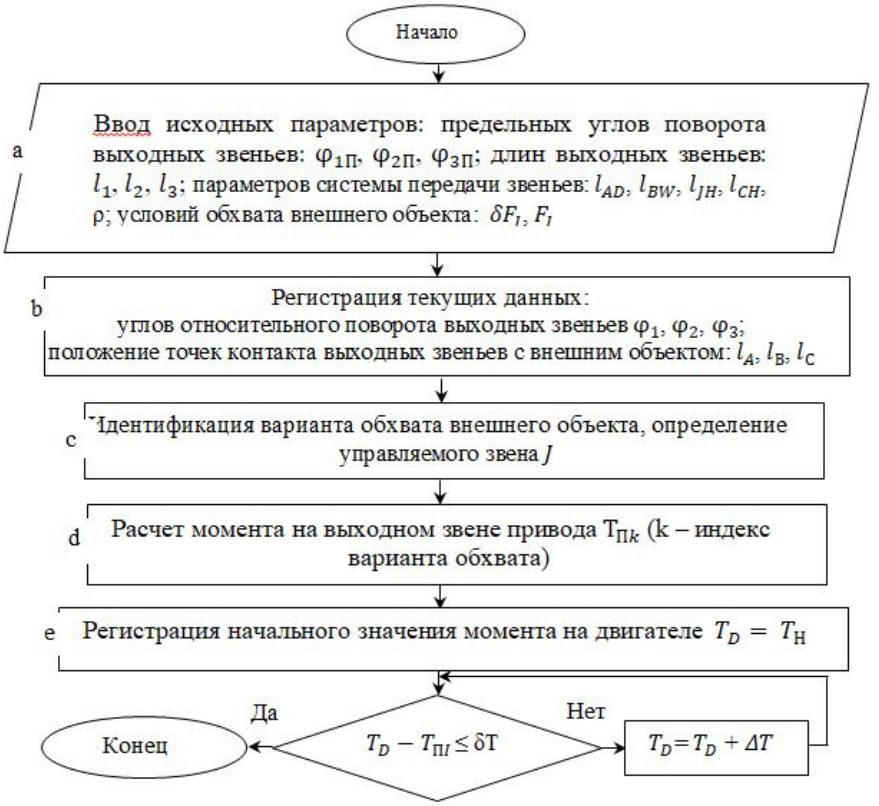


Рис. 2. Блок-схема алгоритма непрямого управления усилием *F_J* на объекте управления — звене *J*

Значение момента определяется взаимным расположением выходных звеньев — , звеном являющегося управляемым (см. рис. 1) и принятой системой передачи движения выходным звеньям.

$$T_{Пk} = f(\varphi_i, F_1, J). \tag{2}$$

При таком подходе для управления усилием на выходном звене F_J достаточно выполнять контроль и управление моментом на двигателе T_D любым известным образом. Отпадает необходимость оснащения выходных звеньев устройствами регистрации силы F_J.

Приведенный момент $T_{Пk}$ зависит от принятой системы передачи движения, способа введения дополнительных связей функционирования, положением точек контакта внешнего объекта со звеном *J*.

Реализации метода предполагает аппаратное оснащение, включающее: датчики контакта на выходных звеньях, энкодеры фиксирующие углы относительного поворота выходных звеньев, система регистрации момента на двигателе. Перечисленные компоненты в настоящее время устанавливаются практически на всех типах захватов.

В дальнейшем аналитические зависимости приведенного момента $T_{Пk}$ формируются применительно к принятой системе передачи движения предпочтительно рычажного типа.

Литература

[1] Badger J. et al. ROS in space: A case study on robonaut 2. Robot Operating System (ROS). Springer, Cham, 2016, pp. 343–373.

[2] Friedl W. et al. FRCEF: the new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand. 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2015, pp. 140–147.

[3] Ruan S. et al. COSA-FBA hand: an underactuated hand with five-gear mechanisms and built-in actuators. Mechanism and Machine Science. Springer, Singapore, 2016, pp. 121–130.

[4] Grebenstein M. et al. The DLR hand arm system. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011, pp. 3175–3182.

[5] Bogdanov A.A., Permyakov A.F and Zhdanova Yu.I. Synthesis of structural scheme of drive of adaptive multiple-link gripper. Zavalishin's Readings, MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 161, art. no. 03009.

[6] Жданова Ю.И., Дудоров Е.А., Богданов А.А. Обоснование структурной схемы исполнительной группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2022, № 2 (214), с. 20–26.

УДК 53.06

Измерение расстояния до беспилотного летательного аппарата с помощью твердотельного лазерного дальномера и определение его размеров с помощью видеокамеры видимого и ближнего ИК-диапазона

Задорожный Евгений Николаевич eugenezador@gmail.com
АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Винтайкин Иван Борисович Vintaikin_IVan@mail.ru
АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Рассмотрены вопросы использования твердотельного дальномера и видеокамеры для определения расстояния до объекта и его геометрических размеров. Сконструирован экспериментальный стенд. Проведен эксперимент по определению размеров беспилотного летательного аппарата. В результате эксперимента получены данные, согласно которым определенные на экспериментальном стенде размеры отличаются от истинных размеров объекта на 20 %.

Ключевые слова: *определение размеров, лазерный дальномер, видеокамера, беспилотный летательный аппарат*

Целью работы является измерение расстояния до подвижных летательных объектов с помощью твердотельного лазерного дальномера.

Для измерения расстояния до подвижных объектов в разработанном экспериментальном стенде (рис. 1) использован твердотельный лазерный дальномер НТЕВ.461321 с длиной волны 1,5 мкм.

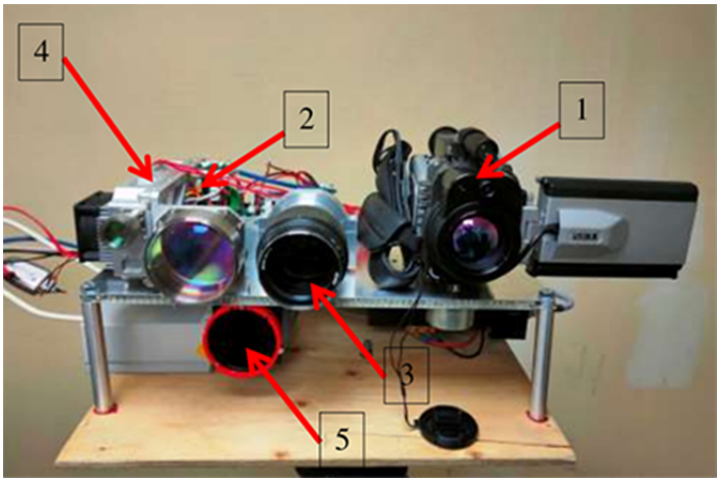


Рис. 1. Основные элементы экспериментального стенда:

1 — тепловизор NEC 2640; *2* — источник питания и управления лазерного дальномера; *3* — объектив лазерного излучателя; *4* — лазерный дальномерный модуль; *5* — видеокамера видимого и ближнего ИК-диапазона DFK 39GX265-Z20

Получаемые с него осциллограммы отраженного от беспилотного летательного аппарата(БПЛА) оптического сигнала используются для определения характерного расстояния до объекта. Частота получения осциллограмм составляет 10 Гц. Характерный вид осциллограмм от БПЛА типа квадрокоптер марки DJI Phantom 2 с характерными размерами 300×300×140мм и массой 1 кг (рис. 2, *а*) [1].

Для каждой осциллограммы определен уровень отраженного от БПЛА сигнала, который нанесен на диаграмму рассеяния (рис. 2, *б*). Видно, что на всех расстояниях до БПЛА от 461 до 1017 м уровень отраженного сигнала достигает верхней границы динамического диапазона измерения амплитуд отраженного сигнала, что указывает на возможность применения ИК лазерного дальномера НТЕВ.461321 для обнаружения как меньших, так и больших по размерам БПЛА на расстояниях значительно больших 1 км [2]. В условиях городской застройки, в черте города открытые трассы более 2...3 км встречаются крайне редко, поэтому лазерный дальномер НТЕВ.461321 гарантированно обеспечивает определение расстояния до малых БПЛА в городских условиях, находящихся на расстоянии более 200 м [3].

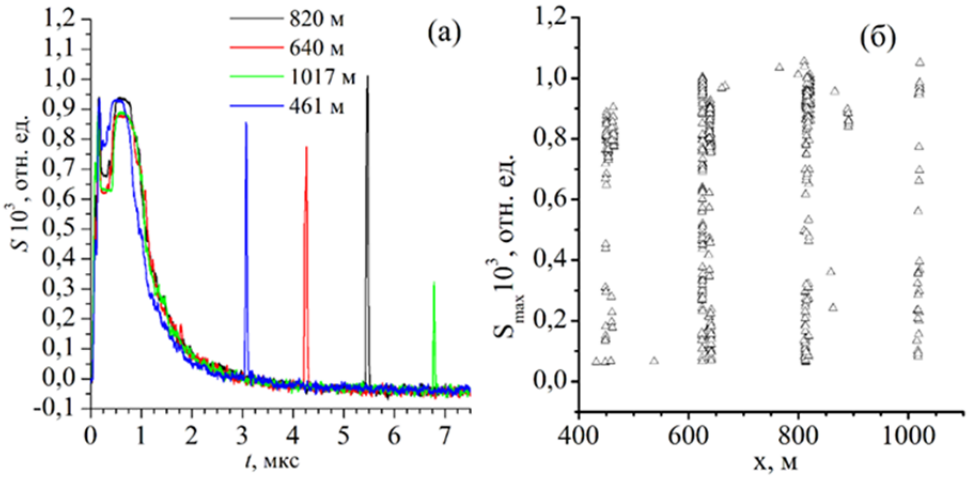


Рис. 2. Результаты работы ИК-лазерного дальномера НТЕВ.461321:

а — осциллограммы зарегистрированного отраженного от БПЛА сигнала; *б* — максимальное значение осциллограмм для разных расстояний до БПЛА

У лазерного дальномера НТЕВ.461321 частота оцифровки осциллограмм 500 МГц, длина излучающего импульса 20 нс. При таких параметрах пространственное разрешение по глубине ИК лазерного дальномера составляет значение порядка 10 м, что не дает локализовать размеры БПЛА по глубине. В разработанном экспериментальном стенде видеопоток регистрируется с помощью промышленной камеры DFK 39GX265-Z20 с фокусным расстоянием от 6,8 до 136 мм и числом элементов 2048×1536 [4].

Результаты определения характерного размера объекта на основе анализа видеокадров и оценки расстояния до БПЛА (рис. 3).

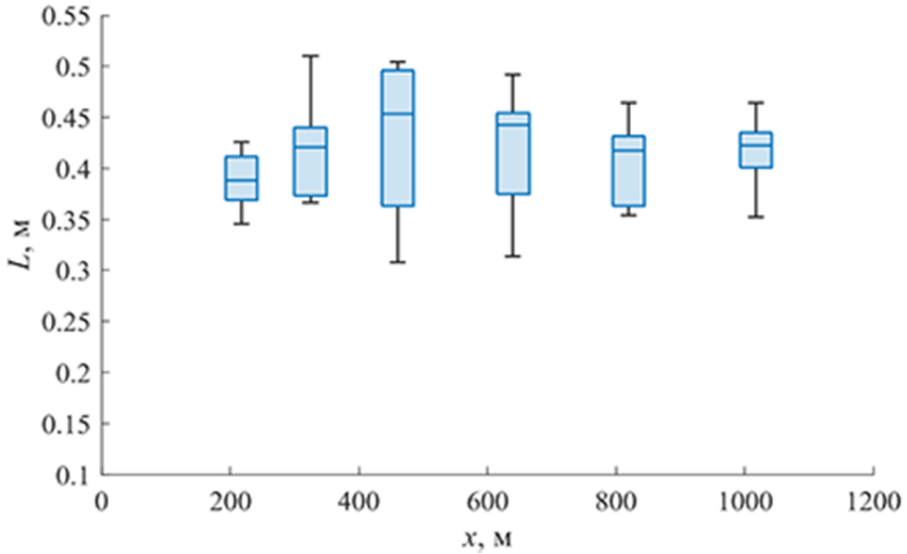


Рис. 3. Оценка размера БПЛА марки DJI Phantom 2 с характерными размерами 300×300×140 мм на различных расстояниях

Таким образом, по результатам эксперимента наблюдаемый размер БПЛА в зависимости от ориентации составляет от 0,29 до 0,41 м. Максимальное значение полуширины доверительного интервала для доверительной вероятности 95 % составляет 0,07 м, что не превышает 20 % истинного размера объекта.

Литература

[1] Адоньев Е.А., Зинкевич А.В. Анализ методов идентификации беспилотных летательных аппаратов в реальном времени и способы их реализации. Информационные технологии XXI века, 2020, с. 197–202.

[2] Kovács L., Benedek C. Visual real-time detection, recognition and tracking of ground and airborne targets. Computational Imaging IX. International Society for Optics and Photonics, 2011, vol. 7873, art. 787311. DOI: https://doi.org/10.1117/12.872314

[3] LeCun Y. et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. Neural computation, 1989, vol. 1, no. 4, pp. 541–551. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541

[4] LeCun Y. et al. LeNet-5, convolutional neural networks. Available at: URL: http://yann.lecun.com/exdb/lenet (accessed September 20, 2022).

УДК 621.7.044.4

Влияние воздуха, растворенного в жидкости, на эффективность измельчения непроводящих материалов электрогидравлическим способом

Инфимовский Юрий Юрьевич inf-yura@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Проведена оценка влияния количества растворенного в жидкости воздуха на амплитуду давления ударной волны в электрогидравлическом эффекте. Определена максимальная концентрация растворенного воздуха, не приводящая к существенному уменьшению амплитуды давления и, как следствие,не снижающая эффективность измельчения материалов электрогидравлическим способом. Показано, что увеличение концентрации растворенного в жидкости воздуха приводит к существенному уменьшению амплитуды давления ударной волны.

Ключевые слова: *электрогидравлический эффект, мелкодисперсные порошки, ратворенный воздух, эффективность*

В настоящее время широко применяются мелкодисперсные и ультрадисперсные порошки металлов, неметаллов, различных оксидов и композитных материалов. Порошки металлов используются в качестве горючих в ракетных топливах, в металлургии. Оксиды металлов и неметаллов входят в состав теплопроводящих паст, применяются в качестве пигментов, катализаторов, сорбентов. Частицы с неоднородной структурой (композиты), содержащие несколько фаз, могут обладать дополнительными свойствами, например устойчивостью к внешней среде, увеличенной адсорбционной способностью и адгезией к другим средам. Мелкодисперсные порошки различного состава и структуры со стабильными свойствами используют при изготовлении химических источников тока, керамики, магнитных материалов, клеев, лекарственных средств, пластмасс и резины [1].

В зависимости от химического состава и требуемой структуры мелкодисперсные порошки можно получать распылением расплава, испарением вещества с его последующим быстрым охлаждением, химическим синтезом, дроблением твердого материала. Электрический взрыв проводника позволяет получать ультрадисперсные порошки как чистых металлов при использовании разряда в инертном газе, так и различных сочетаний металла и его оксидов в случае химически активной среды. При наличии крупнодисперсного материала, обладающего хрупкими свойствами, часто выгодно не подвергать его полному плавлению либо сублимации, а дробить материал. При этом энергия затрачивается лишь на образование трещин, а не на полный перевод материала в жидкое либо газообразное состояния.

Существуют различные устройства для дробления неметаллических материалов (на основе ударного воздействия, сдавливания, перетирания материала с помощью, как правило, металлического рабочего тела), возможно также применение ультразвука. В случае механических дробилок большие сложности возникают при измельчении материалов, обладающих более высокими прочностными свойствами, прежде всего

более высокой по сравнению с материалом рабочего тела твердостью. К таким материалам относятся кварц, корунд и алмазная пыль. При ультразвуковом диспергировании становится возможным фокусировать колебания на материале и повышать развиваемое давление до более высоких значений, чем испытывает излучатель. Однако и в этом случае излучатель быстро изнашивается, а значение получаемого давления ограничено прочностью материала, поэтому не удается измельчать материалы с более высокими прочностными характеристиками.

При использовании импульсного электрического разряда в жидкости, известного как электрогидравлический эффект, рабочим телом является плазма разряда. Плазма не изнашивается подобно твердым материалам, а давление в ней в зависимости от условий может достигать единиц гигапаскалей, благодаря чему становится возможным измельчение сколь угодно твердых материалов. Единственными элементами конструкции, которые подвергаются разрушению, являются электроды. Разрушение электродов может привести к загрязнению измельчаемого материала. Однако при правильной настройке устройства площадь истираемых участков электродов невелика по сравнению с площадью поверхности разрядного канала, что обеспечивает получение достаточно чистого продукта., следовательно, применение электрогидравлического эффекта для получения мелкодисперсных порошков имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами — механическим измельчением, ультразвуковым дроблением и т. п. [2].

В качестве механизма, обеспечивающего разрушение электрическим разрядом находящихся в жидкости частиц, выделяют непосредственное воздействие ударной волны электрического разряда в различных моделях: равномерное сжатие частицы, возникновение сдвиговых напряжений за счет разницы давлений на передней и боковых гранях частицы при обтекании и т. д. Откольное разрушение частиц материала под действием ударной волны, возникающей при импульсном электрическом разряде в жидкости описано в [3]. При этом жидкость рассматривалась как несжимаемая. На практике в жидкости всегда имеется некоторое количество растворенного воздуха, что может существенно повысить сжимаемость жидкости и, как следствие, уменьшить амплитуду давления на фронте ударной волны.

В данной работе проведена оценка влияния количеста растворенного в жидкости воздуха на амплитуду давления на фронте ударной волны, возникающей при высоковольтном разряде в жидкости.

Уравнение баланса энергии для электрического разряда в жидкости имеет вид

$$E_C = E_p + E_l \tag{1}$$

где E_C — энергия запасенная в конденсаторе; E_p — энергия плазменного пузыря; E_l — потенциальная энергия сжатой воды.

Так как

$$E_p = \frac{1}{\gamma - 1} P V_p, \tag{2}$$

где $\gamma = 1{,}22 \ldots 1{,}30$ — показатель адиабаты плазмы; V_p — объем плазменного пузыря,

$$E_l = \frac{Bn}{2\rho_0}\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)^2, \tag{3}$$

где B, n — константы из уравнения состояния воды [4]:

$$P \cong B\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right], \quad (4)$$

то, подставляя (2) и (3) в (1), получаем:

$$E_C = \frac{1}{\gamma-1} P V_p + \frac{B\cdot n}{2\rho_0}\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right)^2 \approx \frac{1}{\gamma-1} B \cdot n \cdot \left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right)\left[\left(V_0 \frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right) + V_a\right] + \frac{B\cdot n\cdot V_a}{2}\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right)^2, \quad (5)$$

где V_0 — начальный объем жидкости в камере; V_a — объем растворенного в жидкости воздуха.

Представив (5) в виде

$$B \cdot n\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right)^2 \frac{\gamma+1}{\gamma-1} + \frac{B\cdot n|}{\gamma-1}\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right) V_a - E_C = 0. \quad (6)$$

Получаем квадратное (относительно) $\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right)$ уравнение.

Решив это уравнение, можем оценить амплитуду давления в ударной волне:

$$P \approx B \cdot n\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}\right). \quad (7)$$

Для $E_C = 1$ кДж, $V_0 = 4 \cdot 10^{-4}$м^3 и констант $B = 3{,}1 \cdot 10^8$Па, $n = 7{,}15$ из [3], получаем при $V_a = 0$ — $P = 34$ МПа, при $V_a = 1$мл — $P = 31{,}7$ МПа; при $V_a = 2$ мл — $P = 29{,}7$ МПа, при $V_a = 10$ мл — $P = 17{,}9$ Мпа.

Следовательно при $V_a = 2{,}5$ мл растворенный воздух практически (менее 7 %) не оказывает влияние на амплитуду давления в ударной волне. При более высоких концентрациях воздуха в жидкости необходим учет уменьшения амплитуды давления, вызванной сжимаемостью жидкости.

Литература

[1] Кузовникова Л.А., Денисова Е.А., Чеканова Л.А. Высокодисперсные композиционные порошки — получение, исследование, использование. Успехи современного естествознания, 2005, № 2, с. 73-74.

[2] Курец В.И., Соловьев М.А., Жучков А.И., Баварская А.В. Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2012, 272 с.

[3] Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов. Новые огнеупоры, 2005, № 3, с. 41-43.

[4] Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. Станюкович К.П., ред. Москва, Наука, 1975, 794 с.

УДК 621.371.334

Влияние размеров щели на характеристики модифицированной симметричной щелевой линии

Клюев Сергей Борисович sebern@mail.ru
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Иовдальский Виктор Анатольевич teh.buro208@gmail.com
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Налогин Алексей Григорьевич work.station208@gmail.com
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Рассмотрены конструкция и характеристики открытой модифицированной симметричной щелевой линии. Представлен анализ открытой щелевой линии передачи в широком диапазоне частот. На основе метода конечных элементов проведен расчет и проанализированы параметры и характеристики такой открытой волноведущей структуры, как модифицированной симметричной щелевой линии. Приведены варианты модифицированной симметричной щелевой линии с разными геометрическими размерами щели. Получены результаты численного расчета характеристик рассматриваемой линии и проведен сравнительный анализ этой волноведущей структуры с базовой симметричной щелевой линией. Сделан вывод о возможности применения модифицированной симметричной щелевой линии в СВЧ- и КВЧ-диапазонах.

Ключевые слова: *модифицированная симметричная щелевая линия, открытая волноведущая структура, метод конечных элементов, матрица рассеяния, волновое сопротивление, вносимые потери, диэлектрическая проницаемость подложки*

Введение

Современное развитие гибридных интегральных схем (ГИС) СВЧ высокой плотности требует применение различных видов линий передач (ЛП). Проектирование и исследование их характеристик являются неизменным процессом последующего совершенствования функционального назначения ГИС СВЧ. Применение в конструкции ГИС СВЧ новых видов ЛП может решить проблему их многозадачности и многофункциональности.

Одной из базовых ЛП является симметричная щелевая линия (СЩЛ), которая представляет собой узкую щель, вырезанную в проводящей плоскости, расположенной на одной из сторон плоскопараллельного магнитодиэлектрического слоя определенной толщины, образующего подложку. Низкие потери, незначительное искажение сигнала, высокая пропускная способность, электромагнитная совместимость, широкий диапазон рабочих частот, высокое электромагнитное сопротивление, наряду с простотой и низкой стоимостью производства, а также высокой интегрируемостью с различными пассивными цепями и активными устройствами и другие характеристики базовой СЩЛ были ранее описаны, например, в [1, 2].

В целях улучшения характеристик базовой СЩЛ в [3] были рассмотрены ее варианты с применением диэлектрической вставки в щели. Полученные результаты свидетельствовали об улучшении характеристик базовой СЩЛ.

Цель работы — методом математического моделирования — методом конечных элементов рассчитать влияние ширины щели модифицированной симметричной щелевой линии (МСЩЛ) на ее характеристики для применения в конструкции ГИС СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

Математическое моделирование модифицированной симметричной щелевой линии

Для проектирования, расчета и создания схем, блоков, устройств и изделий СВЧ были разработаны и успешно применялись различные проекционно-вариационные методы, которые в связи с усложнением функционального назначения радиоэлектронной аппаратуры не обеспечивают необходимой точности решения математических моделей.

С развитием численных методов и электронно-вычислительной техники появилась возможность точного расчета схем, узлов и др., в том числе и ГИС СВЧ- и КВЧ-диапазонах. Одним из современных методов проектирования сложных электродинамических задач при проектировании планарных линий передачи является метод конечных элементов (МКЭ), который основан на дискретизации расчетной области и применении функций непрерывного аргумента — сеточных функций [4]. Исходя их этого, при расчете планарных ЛП, и в том числе МСЩЛ, исследуемый объект может иметь любую геометрическую форму и электромагнитную среду; также можно моделировать любые граничные условия; вычислительный алгоритм удобен для реализации с помощью средств вычислительной техники.

МКЭ использовался, например, при расчете характеристик ЛП в [1–3] и других работах. Математическое моделирование геометрических и электрических характеристик МСЩЛ показало, что заполнение щели диэлектриком с определенным соотношением диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего щель, к диэлектрической проницаемости материала подложки, позволяет существенно расширить рабочий диапазон частот, снижение вносимых потерь мощности проходящего сигнала.

Конструкция модифицированной симметричной щелевой линии

Конструкция МСЩЛ (рис. 1) представляет собой открытую волноведущую структуру, которая содержит щель шириной w, заполненную диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε_1, в тонком проводящем слое толщиной t, расположенном на одной стороне плоскопараллельной диэлектрической подложки с ε, толщиной h. Изготовление рассматриваемой МСЩЛ предусматривает ее реализацию по тонкопленочной технологии.

Заполнение щели полностью диэлектриком позволяет сосредоточить электромагнитное поле внутри щели в диэлектрике и тем самым снизить вносимые потери.

Для расчета МСЩЛ были выбраны приведенные ниже характеристики: щель *3*, заполненная диэлектриком, равным t, с $\varepsilon_1 = 16{,}5$ и $\mathrm{tg}\delta = 2\cdot10^{-3}$ и выполненная в проводящем покрытии *2* толщиной t, имеет ширину w, и расположена на одной стороне плоскопараллельной диэлектрической подложки *1* толщиной h с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6{,}15$ с $\mathrm{tg}\delta = 2\cdot10^{-3}$. Параметры рассматриваемой ЛП соответствуют следующим соотношениям $\frac{w}{h} = 1, \frac{t}{h} = 0{,}02$.

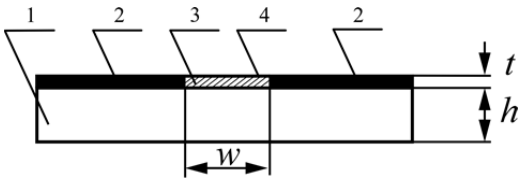


Рис. 1. Модель модифицированной симметричной щелевой линии:

1 — диэлектрическая подложка с диэлектрической проницаемостью ε; *2* — проводящее металлическое покрытие толщиной *t*; *3* — щель; *4* — диэлектрик, заполняющий щель с диэлектрической проницаемостью ε_1 толщиной *t*

Анализ результатов моделирования модифицированной симметричной щелевой линии

Для определения преимуществ МСЩЛ относительно базовой СЩЛ и СЩЛ с диэлектрической вставкой были проведены расчеты МКЭ.

Оценка эффективности предложенного технического решения, относительно базовой СЩЛ и СЩЛ с диэлектрической вставкой была проведена по значению элемента матрицы рассеяния — коэффициента прохождения по напряжению на уровне –0,2 дБ и представлена на рис. 2. (Значение уровня –0,2 дБ выбирается из соображений компромисса между желаемым уровнем потерь и возможно достижимым уровнем потерь.)

Сравнение результатов расчета МСЩЛ (кривая *1* на рис. 2) со СЩЛ с диэлектрической вставкой (кривая *2* на рис. 2) и СЩЛ (кривая *3* на рис. 2) показывает, что вносимые потери рассматриваемой МСЩЛ уменьшились относительно других ЛП и составили от 13 до 42 %, и, как следствие, расширился рабочий диапазон частот от 5 до 29 %.

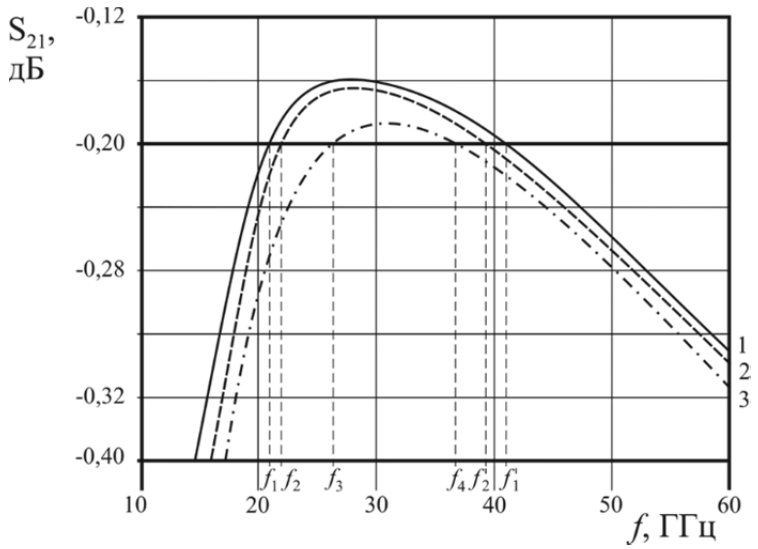


Рис. 2. Зависимости коэффициента матрицы рассеяния S21 МСЩЛ от частоты при ε = 6,15; ε_1 = 16,5; *w*/*h* = 1; *t*/*h* = 0,02; *1* — МСЩЛ; *2* — СЩЛ с диэлектрической вставкой; *3* — СЩЛ

Результаты численных расчетов модели МСЩЛ показали, что применение в щели ЛП диэлектрика полностью, заполняющего щель, позволяет получить новую ЛП со значительно большей полосой рабочих частот и меньшими вносимыми потерями. Улучшение характеристик МСЩЛ стало возможным за счет концентрации электромагнитного поля в щели, заполненной диэлектриком с $\varepsilon_1 > \varepsilon$, что ограничивает возможность возникновения поверхностных волн [5] и образование вытекающих волн и, соответственно, препятствует распространению этих видов волн в данной волноведущей структуре.

Анализ результатов влияния ширины щели на характеристики модифицированной симметричной щелевой линии

Далее в работе рассматривали влияние ширины щели *w* на характеристики МСЩЛ. Математическое моделирование МСЩЛ было проведено с помощью МКЭ. За основу ЛП была принята МСЩЛ, представленная на рис. 1. В расчетах МСЩЛ использовали геометрические размеры и частотный диапазон, при которых проводили моделирование, соответствовали параметрам ЛП, указанным на рис. 2.

Анализ результатов показывает, что при расширении щели, заполненной диэлектрикомε_1, уменьшаются вносимые потери в диапазоне частот от 35 до 80 ГГц для соотношения $\frac{w}{h} > 1$ (кривые *2* и *3* на рис. 3). В частотном диапазоне до 25 ГГц преимуществом обладает ЛП с соотношением $\frac{w}{h} < 1$ (кривая *1* на рис. 3). Следует отметить, что увеличение размеров щели больше $\frac{w}{h} > 2$ для МСЩЛ с характеристиками, указанными на рис. 3, 4, не приводит к улучшению вносимых потерь (см. рис. 3).

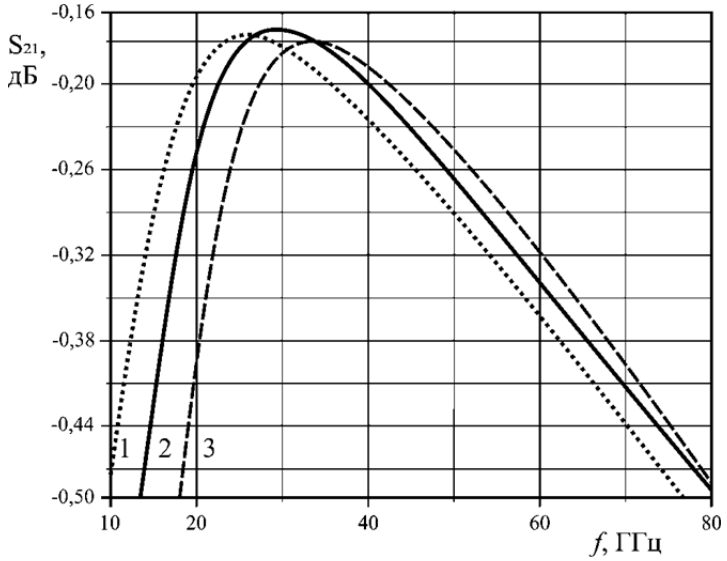


Рис. 3. Зависимость характеристик МСЩЛ от частоты при ε = 6,15; ε_1 = 16,5; *t*/*h* = 0,02; коэффициента матрицы рассеяния S21

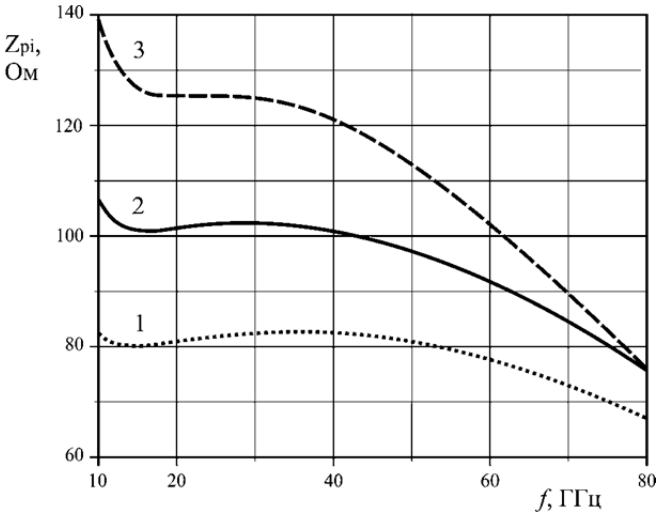


Рис. 4. Зависимость характеристик МСЩЛ от частоты при ε = 6,15; ε_1 = 16,5; *t*/*h* = 0,02 волнового сопротивления:

1 — *w*/*h* = 0,5; *2* — *w*/*h* = 1; *3* — *w*/*h* = 2

Зависимости волновых сопротивлений, представленные на рис. 4 показывают почти плавное изменение в широком диапазоне значений от 140 до 68 Ом, что позволит осуществить совместимость с другими линиями передач, например, с несимметричной полосковой линией.

Заключение

Рассмотренное конструктивное исполнение МСЩЛ представляет огромный потенциал для инженеров, которые проектируют схемы, узлы, блоки и другие устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов. В такой структуре за счет изменения геометрических размеров можно изменять не только диапазон волнового сопротивления, но и рабочий диапазон частот, повторяемость устройства, его технологичность.

Литература

[1] Клюев С.Б., Нефёдов Е.И., Потапов А.А. Симметричная щелевая линия с диэлектрической вставкой в щели. X Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике»: сб. трудов в 3 ч. Ч. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 39–41.

[2] Klyuev S.B., Nefyodov E.I., Potapov A.A. Symmetrical slot line with a dielectric insert in the slot. Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1348, art. no. 012015. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1348/1/012015

[3] Клюев С.Б., Иовдальский В.А., Налогин А.Г., Пашков А.Н. Симметричная щелевая линия передачи сигнала СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Патент на изобретение № 2776955 Российская Федерация, 2021, бюл. № 22, 12 с.

[4] Самарский А.А. Введение в численные методы. 2-е изд. Москва, Наука, 1987, 288 с.

[5] Корякова З.В. Керамические материалы в СВЧ-технике. Компоненты и технологии, 2011, № 5, с. 184–186.

УДК 623.454.862

Автоматизированная система очистки воздуха от радона и дочерних продуктов его распада

Кожевников Дмитрий Андреевич demontoid456110@mail.ru
ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России

Кулагин Иван Юрьевич ivan_kulagin_91@mail.ru
ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России

Ермоленко Анна Валерьевна Molish01@rambler.ru
ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России

Матросова Ирина Александровна mustafinai@bk.ru
ФГБУ «33 ЦНИИИ» Минобороны России

Показана актуальность обеспечения радиационной безопасности от вредного воздействия радона и дочерних продуктов его распада. Рассмотрены способы автоматической очистки воздуха от радона и дочерних продуктов его распада. Предложено техническое решение по созданию автоматизированной системы очистки воздуха от радона и его дочерних продуктов распада на основе устройства электростатической сорбции активированным углем.

Ключевые слова: *радон, радиационная безопасность, дочерние продукты распада радона, электростатическая очистка, электростатическая сорбция*

Радон является радиоактивным продуктом распада изотопов урана-235, урана-238 и тория-232. Среди образующихся радиоактивных изотопов (радон-219, радон-220, радон-222) радон-222 и дочерние продукты его распада (ДПР) вносят значительный вклад в суммарную дозу облучения людей. При этом доза облучения от ингаляции радона и ДПР превосходит дозы, обусловленные другими источниками ионизирующего излучения, в том числе используемыми в здравоохранении и поступившими в окружающую среду в результате деятельности предприятий ядерного топливного цикла. Пролонгированное внутреннее облучение организма ДПР является одним из ключевых факторов развития легочной онкопатологии [1–3].

Радон накапливается в помещениях за счет естественного радиоактивного распада урана и радия, содержащихся в строительных материалах, горных породах и рыхлых отложениях. Радон попадает на поверхность земли путем его объемного переноса через геодинамически активные зоны, характеризующиеся повышенной проницаемостью геологической среды [4].

Таким образом, суммарный объем радона и ДПР, непрерывно накапливаемый в помещении, наносит невосполнимый вред здоровью людей. В связи с этим одной из важнейших задач является обеспечение безопасности от вредного воздействия радона и его ДПР.

Для определения объемной активности в помещении может устанавливаться радиометр радона, работа которого основана на электростатическом осаждении ДПР на полупроводниковый детектор.

Наибольший интерес для электростатического осаждения представляют дочерние продукты, характеризующиеся бета-распадом, а именно Pb-214 и Bi-214. Принцип работы радиометра заключается в притяжении к отрицательно заряженному электроду ДПР радона, поскольку они приобретают положительный заряд за счет бета-активности. Через некоторое время между осаждением новых ДПР радона и распадом уже осевших устанавливается динамическое равновесие, при котором активность осажденных ДПР пропорциональна концентрации радона.

При превышении порогового уровня объемной активности радона в воздушном пространстве помещения радиометр подает управляющий сигнал на систему очистки воздуха, которая может быть выполнена в нескольких вариантах исполнения.

Первый вариант — приточно-вытяжная вентиляция с входным окном, через которое поступает чистый воздух по трубопроводу с помощью вентилятора. После этого чистый воздух нагревается до комнатной температуры нагревательным элементом и поступает в основное помещение, где смешивается с воздухом, содержащим радон. Удаление воздушной массы происходит с помощью вытяжной системы, представляющей собой трубопровод, соединенный с системой основной вентиляции. Чистый воздух поступает в помещение до тех пор, пока объемная активность радона на приборе не станет ниже порогового уровня. Первый вариант технически наиболее простой, однако его основным недостатком является поступление наружного воздуха в помещение, который может быть загрязнен другими вредными примесями.

Для вентиляции воздуха с высоким содержанием радона и очистки зараженного внешнего воздуха может быть использован второй способ, заключающийся в применении фильтровентиляционных установок. Принцип работы фильтровентиляционной установки заключается в последовательном поступлении наружного воздуха в сооружение через предфильтр и фильтр-поглотитель, в которых происходит очистка от грубодисперсных частиц пыли, отравляющих веществ и паров, бактериальных аэрозолей и радиоактивной пыли.

В сооружениях, в которых отсутствует фильтровентиляционные установки, может быть реализован третий способ, заключающийся в фильтрации воздуха только внутри помещения через фильтр с сорбентом радона без поступления наружного воздуха и внесения изменений в строительные конструкции сооружения. В настоящее время в качестве сорбента радона используют активированный уголь.

Четвертый способ основан на работе электрофильтра также из активированного угля, на который подается потенциал, находящийся в определенных пределах — около 1000...5000 В. Более низкое напряжение неэффективно, более высокое приводит к перезарядке пылевых частиц и их отталкиванию от электрода. Принцип работы электрофильтра подобен принципу работы радиометра радона, установленному в помещении, и заключается в электростатическом осаждении ДПР радона на активированный уголь. Основная суть третьего и четвертого способов заключается в очистке воздуха от радона и ДПР путем их сорбции активированным углем. Отличие состоит в том, что в третьем варианте радон сорбируется в динамических условиях при пропускании потока воздуха через фильтр, а в четвертом варианте — в статических.

В результате рассмотрения третьего и четвертого способов очистки воздуха от радона установлено, что наиболее оптимальным является четвертый, так как активированный уголь будет иметь высокую сорбционную способность вследствие работы в статических условиях. Схема предлагаемой установки для очистки воздуха от радона и ДПР показана на рисунке.

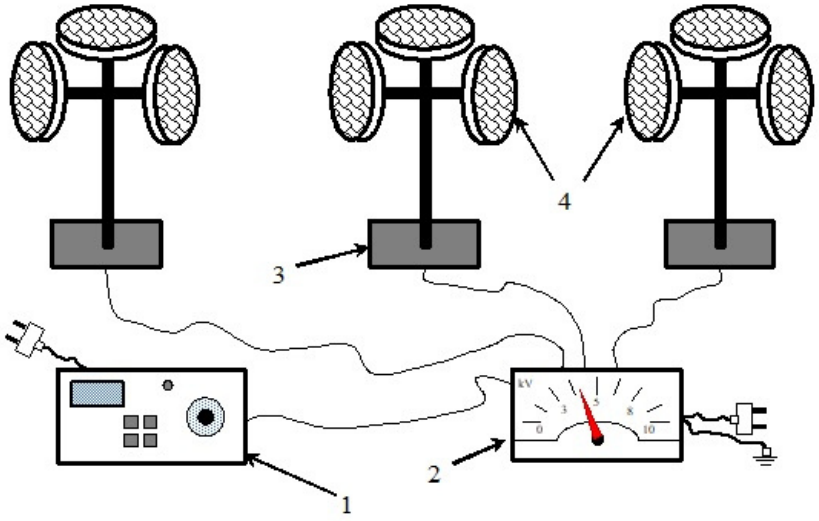


Рис. Схема установки для электростатической очистки воздуха от радона и дочерних продуктов распада

1 — радиометр радона; *2* — высоковольтный генератор; *3* — электрофильтр радона; *4* — активированный уголь

Таким образом, для обеспечения радиационной безопасности предложена разработка системы автоматической очистки воздуха от радона и ДПР, в качестве которой целесообразно использовать установку электростатической очистки воздуха внутри помещения от радона и ДПР, основанную на работе сорбента в статических условиях.

Литература

[1] Карабанов А., Жук И., Ярошевич О. и др. Радон: здоровье, опасность, защитные мероприятия. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, № 4 (122), с. 63–67.

[2] Киселев С.М., Жуковский М.В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования. Радиационная гигиена, 2014, т. 7, № 4, с. 48–52.

[3] Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 336 с.

[4] Gruber V., Bossew P., de Cort M., Tollefsen T. The European map of the geogenic radon potential. J Radiol Prot, 2013, no. 33, pp. 51–60. DOI: https:doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51

УДК 621.32:535.376

Использование вращающегося электрического поля для возбуждения предпробойного свечения порошкового ZnS, Cu люминофора

Кокин Сергей Михайлович kokin2@mail.ru
РУТ (МИИТ)

Рассмотрена возможность использования суперпозиции переменных электрических полей, возбуждающих свечение порошковых цинксульфидных электролюминофоров, в целях вовлечения в процесс ударного умножения зарядов как можно большего числа барьерных областей зерен люминофора. Эксперимент подтверждает, что данный способ возбуждения позволяет при той же средней яркости увеличить срок службы источников света — электролюминесцентных конденсаторов, изготавливаемых на основе таких кристаллофосфоров.

Ключевые слова: *электролюминофор, электролюминесцентный конденсатор, моделирование режима возбуждения, срок службы*

Описание процессов, являющихся результатом сложения серий колебаний, происходящих как в одном, так и во взаимно перпендикулярных направлениях (как в двух, так и в трех), задача, с которой приходится сталкиваться во многих сферах практической деятельности. С данной проблемой можно встретиться при конструировании транспортной техники (описывая колебания транспортных средств и их частей, перевозимых грузов), в химической и пищевой промышленности (рассматривая перемешивание и фильтрацию веществ), в медицине (изучая воздействия вибраций на человека) и так далее. Проблема важна еще и потому, что в ряде случаев сложение колебаний не только влияет на интенсивность протекания соответствующих процессов, но и способно привести к выявлению новых свойств, которыми обладает система.

В рамках настоящей работы рассмотрена возможность использования сложения переменных электрических полей, возбуждающих предпробойную электролюминесценцию порошковых ZnS — электролюминофоров, для увеличения срока службы (времени полуспада яркости) изготавливаемых на их основе источников света — электролюминесцентных конденсаторов (ЭЛК).

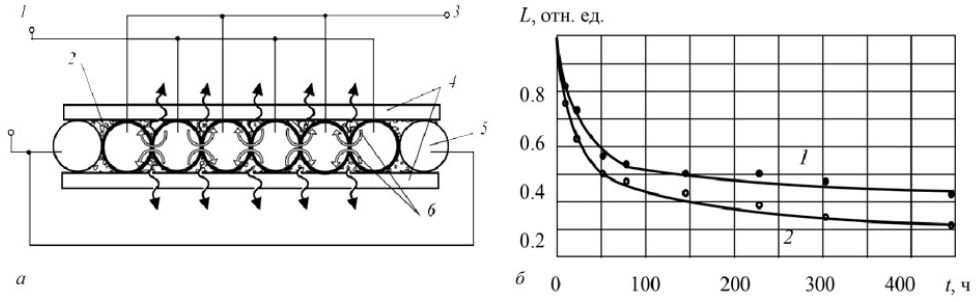
В обычных электролюминесцентных конденсаторах (с плоскими электродами и протяженными электродами-проволоками [1, 2]) свечение возбуждается полем, меняющимся в межэлектродном пространстве лишь вдоль одного направления. В этом пространстве находится светоизлучающая смесь, представляющая собой зерна люминофора (размером порядка 10 мкм), диспергированные в связующем диэлектрике. Под действием сильного (выше 10^5 В/см) электрического поля в зернах люминофора возникает предпробойная электролюминесценция, при этом умножение носителей заряда происходит не во всем объеме зерен, а лишь в области энергетических барьеров (в серийных люминофорах — это гетеропереходы $ZnS, Cu - Cu_xS$) возникающих на стадии их синтеза. Недостатком таких люминофоров является то, что сильное

электрическое поле, которое требуется для развития предпробойных процессов, вызывает электродиффузию ионов междоузельной меди, являющейся донором в ZnS. Это приводит к «расплыванию» гетеропереходов, снижению напряженности электрического поля в них и, как следствие, к снижению вероятности ударной ионизации решетки, а, значит, и яркости свечения образцов. Происходит «старение» (деградация) порошковых ЭЛК: процесс, который существенно ограничивает сферу их применения [3].

Гетеропереходы формируются в местах включений фазы Cu_xS (где $x \approx 2$) в основу сульфид цинка, легированный медью. Зерно может содержать несколько таких гетеропереходов, но сами зерна имеют неправильную форму и к тому же в люминофорно-диэлектрический смеси ориентированы хаотически, поэтому при заданном направлении силовых линий в процесс генерации электролюминесценции (и, соответственно старения) оказывается вовлеченной лишь часть зерен. И действительно, эксперимент показывает, что если для создания люминофорно-диэлектрической смеси использовать не твердый, а жидкий диэлектрик, а ЭЛК сделать разборным, то состарившийся образец можно восстановить, разобрав конденсатор, перемешав смесь и вновь собрав ЭЛК. Яркость свечения такого образца окажется практически равной первоначальной, поскольку после перемешивания в работу включатся другие гетеропереходы, прежде не задействованные из-за того, что были ориентированы не оптимально для возникновения в них предпробойных явлений. Процедуру разборки–перемешивания–сборки можно повторять неоднократно, при этом общее время свечения такого ЭЛК с достаточно высокой яркостью существенно увеличится.

Понятно, что в случае серийных ЭЛК с люминофорно-диэлектрическими слоями из диэлектриков на основе затвердевших полимеров, стеклоэмалей, о перемешивании говорить не приходится. Однако можно пойти другим путем, воспользоваться известным приемом «сделать наоборот»: не поворачивать зерна люминофора, а заставить вращаться само электрическое поле, что также позволит задействовать существенно большее число гетеропереходов и (при той же средней яркости) увеличить срок службы источника света.

Заставить вращаться поле можно, например, использовав не двух-, а трехэлектродную конструкцию, подавая на каждый электрод синусоидальный сигнал, смещенный по фазе на $2\pi/3$ по отношению к соседнему [4]. Схема соответствующего источника света представлена на рис. 1, *а* — это две системы (*1* и *2*) параллельных медных тонких проводов в эмалевой оболочке, на которые подается напряжение $U = U_0\sin(\omega t - 2\pi/3)$ и $U = U_0\sin(\omega t - 4\pi/3)$, соответственно и прозрачный электрод *4*, на который подается напряжение $U = U_0\sin(\omega t)$ с помощью контактных проводников *5*. В межэлектродных зазорах находится люминофорно-диэлектрическая смесь *3* в области которой реализуется вращение электрического поля (показано стрелками *6*). Справедливость предположения о возможности увеличения срока службы (времени полуспада яркости) источника ЭЛК (при одинаковой начальной яркости) подтверждается рис. 1, *б*), на котором приведены кривые спада яркости L со временем t для описанного образца (1) и обычного излучателя (2), в котором синусоидальное напряжение такой же частоты подается только на проволочные электроды *1* и *3*.

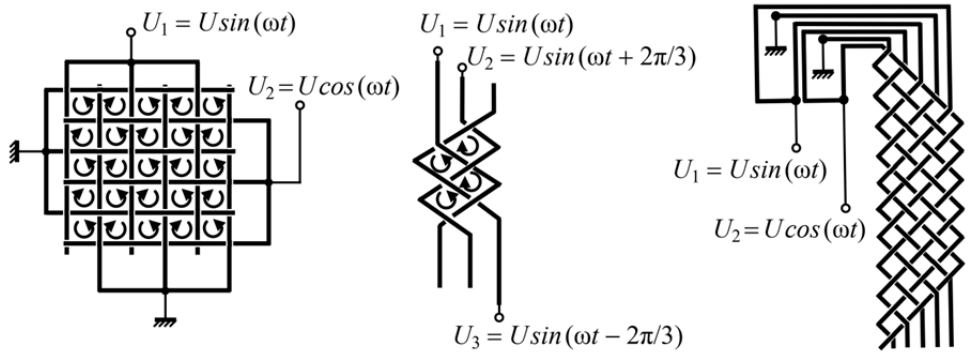


а *б*

Рис. 1. ЭЛК с одинаковыми начальными значениями яркости образцов:

а — пример конструкции трехэлектродного ЭЛК; *б* — спад со временем яркости двухэлектродного (нижняя кривая) и трехэлектродного ЭЛК

Другие возможные варианты конструкции двух- и трехэлектродных люминесцентных излучателей, возбуждаемых вращающимся электрическим полем, представлены на рис. 2. Это гибкие излучатели, созданные на основе переплетнnных тонких медных проводников, покрытых тонкой диэлектрической плннкой-оболочкой, не растрескивающейся в процессе плетения.



а *б* *в*

Рис. 2. Варианты конструкции двух- и трехэлектродных люминесцентных излучателей:

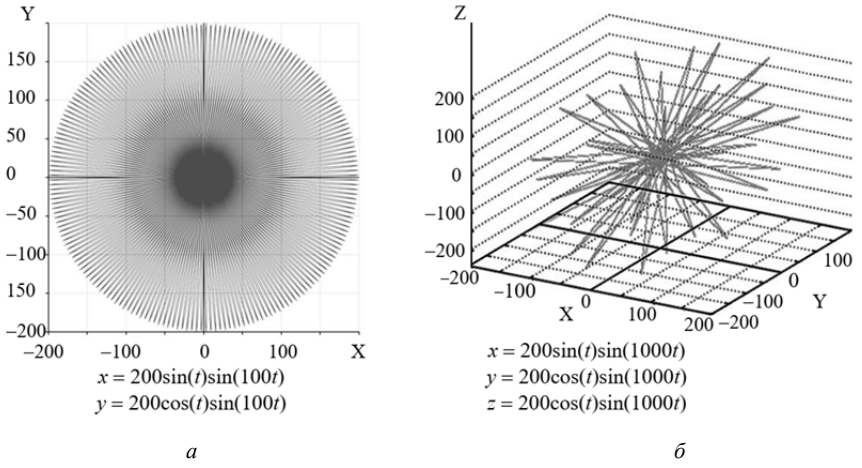
а, *б*, *в* — варианты переплетения проволочных электродов в гибких ЭЛК

Более эффективным, чем обычное вращение, является режим возбуждения, когда траектория кончика вектора напряженности электрического поля является не окружность, а многолучевая розетка типа «снежинки». Связано это с тем, что при подаче напряжения на $ZnS, Cu - Cu_xS$гетеропереход и последующем возникновении лавины носителей заряда происходит быстрая поляризация зерна люминофора, в результате которой напряженность поля в зерне (и в барьере) резко снижается и умножение зарядов прекращается. Возникшие неравновесные носители рекомбинируют по пути к противоположной части зерна, что и сопровождается вспышкой света. В обычном режиме вспышка длится по времени примерно на порядок меньше, чем полупериод возбуждающего напряжения. После перемены полярности и возникновения предпро-

бойных процессов в гетеропереходах, оказавшихся при этом включенными в обратном направлении, поток неравновесных носителей устремляется назад: возникает новая вспышка. Далее процесс повторяется раз за разом: носители движутся «туда — сюда» (двухстадийная модель электролюминесценции). Таким образом, для эффективной рекомбинации нужна периодическая переполяризация зерна, чему в большей степени соответствует ситуация, когда траекторией кончика вектора напряженности является не окружность, а многолучевая розетка — «снежинка».

Для ее создания достаточно сложить два колебания, происходящие во взаимно перпендикулярных направлениях с одинаковыми частотами (в случае реальных ЭЛК это обычно от 0,4 до 3 кГц), но с модулированными амплитудами (одна — по синусу, а другая — по косинусу). Тогда в системе электродов, подобной той, которая изображена на рис. 2, *а*, кончик вектора напряженности начинает описывать траекторию, вид которой представлен на рис. 3, *а*. Переполяризация зерна при этом облегчается, т. е. средняя яркость свечения излучателя повышается. Теперь ее можно даже уменьшить, понизив напряжение на электродах, и тогда это приведет к увеличению времени полуспада яркости образца.

Еще большего эффекта можно достичь, возбуждая колебания в зерне люминофора не в двух, а в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Принципиальный возможный вариант конструкции такого образца – это система взаимно перпендикулярных электродов типа той, которая изображена на рис. 2, *а*, расположенная между двумя плоскими прозрачными электродами такого же вида, как на рис. 1, *а*. Так, при подаче на одну систему (пусть ее электроды перпендикулярны условной оси X) напряжения вида $x = A\sin(\omega t)\sin(1000\omega t)$, на вторую (ее электроды перпендикулярны условной оси Y) – напряжения вида $y = A\sin(\omega t)\cos(1000\omega t)$, а на третью (электроды перпендикулярны условной оси Z в прямоугольной декартовой системе координат XYZ) – напряжения вида $z = A\cos(\omega t)\sin(1000\omega t)$ траекторией кончика вектора напряженности оказывается игольчатая структура с шипами-иглами, направленными во все стороны (рис. 3, *б*).



а *б*

Рис. 3. Траектории движения конца вектора напряженности электрического поля в трехэлектродном ЭЛК:

а — поворот вектора происходит в одной плоскости; *б* — трехмерное вращение

Рассмотренные способы возбуждения позволяют вовлечь в «работу» практически все энергетические барьеры люминофорных зерен, что позволяет повысить яркость свечения порошковых излучателей и (или) увеличить время полуспада их яркости.

Создание источников питания, способных обеспечить требуемые режимы возбуждения проблемы не представляет. Затруднения возникают при отработке технологического процесса создания многоэлектродных структур, качество которых зависит, в частности, от их конструкции. Здесь существенным оказывается вопрос выбора такой геометрии расположения электродов, которая способна обеспечить минимум потерь генерируемого люминофором потока света при его выводе из многоэлектродной системы.

Расчеты показывают, что степень изотропности распределения «игл» итоговой траектории, описываемой кончиком вектора, соответствующего суперпозиции складываемых колебаний, зависит как от геометрических параметров системы, так и от вида зависимостей, которыми они описываются, от значений амплитуд и частот. Это следует принимать во внимание в случае использования подобного метода моделирования для повышения эффективности процессов в колебательных системах другой, нежели порошковые ЭЛК, физической природы.

Литература

[1] Кокин С.М., Полян Р.А. Гибкие электролюминесцентные ленты и нити — перспективный тип источников света. Светотехника, 2001, № 5, с. 29–31.

[2] Полян Р.А. Электролюминесцентный источник света и способ его изготовления. Патент 2096932 Российская Федерация, 1997, бюл. № 28, 22 с.

[3] Верещагин И.К. и др. Электролюминесцентные источники света. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 168 с.

[4] Кокин С.М. Электролюминесцентное устройство. Патент 2156554 Российская Федерация, 2000, бюл. № 26, 8 с.

УДК 536.75

Исследование необратимых процессов деградации полупроводниковых приборов при воздействии электростатического разряда

Кузнецов Вадим Вадимович vadim.kuznetsov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Андреев Владимир Викторович vladimir_andreev@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследованы необратимые физические процессы, протекающие при воздействии электростатического разряда в КМОП-интегральных микросхемах. Предложена методика определения разрушающего напряжения разрядного импульса по модели тела человека (HBM) на основе измерения разрушающего тока методом импульсного разряда от длинной линии (TLP). Показано, что можно оценить стойкость интегральной микросхемы или защитного элемента к воздействию электростатического разряда по модели HBM, имея в распоряжении только данные TLP-испытаний.

Ключевые слова: *МДП-структуры, электростатика, микроэлектроника, интегральные микросхемы, пробой*

Введение

Возникновение явлений неконтролируемого электростатического разряда (ЭСР) является одной из основных причин повреждений, возникающих в незащищенных электронных компонентах во время их изготовления и при последующей эксплуатации [1]. Электростатический разряд может приводить к возникновению необратимых физических процессов, приводящих к повреждению полупроводниковых приборов. К таким деградационным процессам относятся: пробой подзатворного диэлектрика, разрушение p-n переходов, расплавление металлизации и др. Деградационные процессы, возникающие при воздействии ЭСР в основном связаны с выделением значительной электрической энергии за относительно короткий интервал времени, что приводит к возникновению электрического пробоя, часто переходящего в тепловой в диэлектрических пленках и элементах полупроводниковых приборов. Необратимые физические процессы, протекающие при воздействии ЭСР во многом идентичны процессам, наблюдающимся при воздействии сильных электрических полей [2–4]. Однако физические процессы, протекающие при ЭСР во многом определяются свойствами диэлектрических пленок и других материалов приборов, их неоднородностью, дефектностью и т. д. Следовательно, исследование физических явлений, протекающих при ЭСР, позволяет прогнозировать надежность приборов и разрабатывать пути повышения их стойкости к ЭСР.

Результаты эксперимента и обсуждение

Для характеризации стойкости полупроводниковых приборов к воздействию ЭСР и изучению возникающих при этом необратимых физических процессов на современных предприятия часто применяется метод импульсного разряда от длинной линии

(transmission line pulse — TLP) [2, 5]. Установка для испытаний по данному методу (рис. 1) состоит из кабельной линии, которая заряжается до определенного напряжения, а затем разряжается в испытуемый компонент (device under test — DUT). Форма тока разрядного импульса получается близкой к прямоугольной. Длительность импульса зависит от длины кабеля L, и обычно выбирается равной 100 нс. Измерив напряжение и ток через компонент на плато импульса можно получить вольт-амперные характеристики (ВАХ) защитного компонента и тем самым охарактеризовать физические процессы в защитном элементе, соответствующие области больших токов. Испытания по методике TLP можно совместить с исследованиями вольт-фарадных характеристик и обнаружить зарядовые дефекты, индуцированные разрядным импульсом.

Но в отличие от модели тела человека (human body model — HBM) или модели заряженного компонента (charged device model — CDM) [6] испытания по методике TLP не имитируют какой-либо реальный источник ЭСР. Поэтому возникает вопрос о соответствии предельного разрядного тока через полупроводниковый прибор, найденного согласно методике TLP, и разрушающего напряжения разряда по модели HBM. Импульс тока разряда HBM имеет экспоненциальную форму, а импульс тока TLP — прямоугольную, и необходима методика пересчета аналогично методике [7] для ЭСР по модели HBM, MM и CDM.

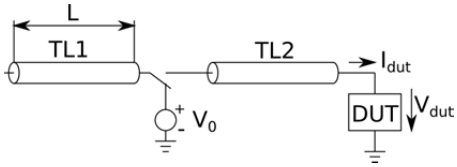


Рис. 1. Схема установки для испытаний полупроводниковых приборов (DUT) на стойкость к воздействию ЭСР по методике TLP

Для защиты современных ИМС от ЭСР часто используется полевые транзисторы с заземленным затвором [8, 9], имеющий ВАХ тиристорного типа (рис. 2). Защитное действие данного компонента связано с защелкиванием в паразитном биполярном транзисторе, образованном областями канала, стока и истока.

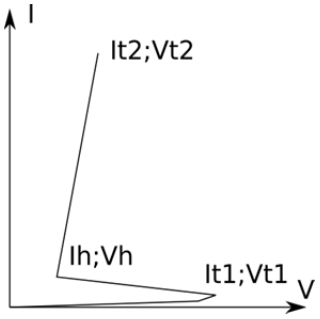


Рис. 2. Типичная ВАХ защитного элемента тиристорного типа

При достижении порогового напряжения V_{t1} активируется тиристорный эффект, и напряжение на транзисторе скачком уменьшается до V_h. Если ток через защитный элемент превышает величину I_{t2}, то происходит необратимый тепловой пробой.

Найдем, какой разрушающий ток TLP соответствует напряжению разряда по модели HBM. Энергия импульса равна

$$E = \int_0^\infty V(t)I(t)dt.$$

Напряжение на компоненте с ВАХ тиристорного типа с напряжением удержания *Vh* и дифференциальным сопротивлением в открытом состоянии R_{on} равно

$$V(t) = R_{on}I(t) + V_h.$$

Для экспоненциального импульса тока разряда по модели HBM при параметрах разрядной цепи согласно стандарту [10] (C_{hbm} = 100 пФ; R_{hbm} = 1,5 кОм).

$$E_{hbm} = \int_0^\infty \left(I_0^2 R_{on} e^{-2t/T} + I_0 V_h e^{-t/T}\right).\ I_0 = \frac{V_{hbm}}{R_{hbm} + R_{on}}\ T = C_{hbm}(R_{hbm} + R_{on})$$

Предполагая

$$E_{hbm} = \frac{C_{hbm}V_{hbm}^2 R_{on}}{2R_{hbm}} + C_{hbm}V_{hbm}V_h, \qquad (1)$$

получаем для прямоугольного TLP импульса длительностью *t* и амплитудой тока I_{tlp}

$$E_{tlp} = \int_0^\infty \left(R_{on} + I_{tlp}^2 + V_h I_{tlp}\right) dt = R_{on}\mathrm{I}_{\mathrm{tlp}}^2\tau + \mathrm{V_h I_{tlp}}\tau. \qquad (2)$$

Испытания по методике TLP и HBM эквивалентны, если энергии импульсов равны. Систему уравнений (1), (2) можно решить численно для типичных значений V_h = 0...50 В и R_{on} = 1...20 Ом и найти отношение V_{hbm}/I_{tlp}. Данная зависимость показана на рис. 3.

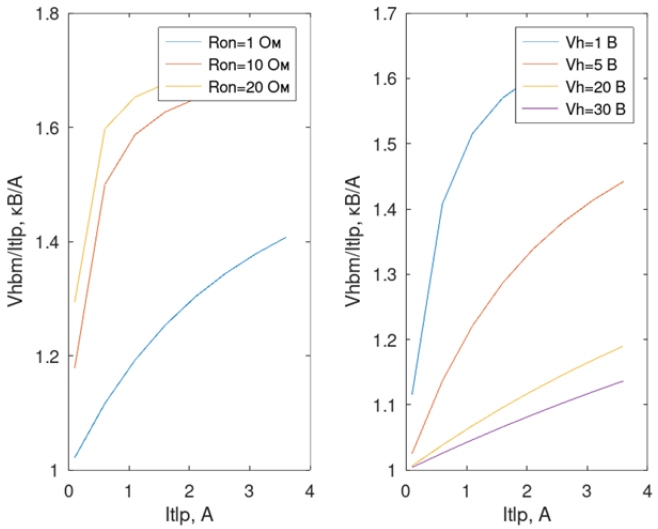


Рис. 3. Зависимость отношения разрушающего напряжения разряда по модели HBM от тока TLP импульса для различных параметров защитного элемента

Выводы

Таким образом, численное решение системы уравнений (1) и (2) дает отношение V_{hbm}/I_{tlp} = 1,0...1,73. Зная данное соотношение можно пересчитать разрушающий ток TLP-импульса, найденный в результате испытаний, в разрушающее напряжение разрядного импульса по модели HBM, которое может быть использовано в инженерных расчетах. Тем самым можно оценить стойкость защитного элемента к воздействию электростатического разряда по модели HBM, имея в распоряжении только данные TLP-испытаний.

Литература

[1] Barth J.E., Verhaege K., Henry L.G., Richner J. TLP calibration, correlation, standards, and new techniques. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2001, vol. 24, no. 2, pp. 99–108. DOI: https://doi.org/10.1109/6104.930960

[2] Voldman S.H. A review of electrostatic discharge (ESD) in advanced semiconductor technology. Microelectron Reliab, 2004, vol. 44, no. 483, pp. 33–46. DOI: https://doi.org/10.1016/ j.microrel.2003.10.004

[3] Андреев Д.В., Столяров А.А., Андреев В.В., Царьков А.В. Исследование необратимых процессов деградации подзатворного диэлектрика структур металл–диэлектрик–полупроводник. Необратимые процессы в природе и технике: X Всерос. конф.: тр.: в 3 ч. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019, ч. I, с. 114–117.

[4] Andreev D.V., Maslovsky V.M., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modified ramped current stress technique for monitoring thin dielectrics reliability and charge degradation. Phys Status Solidi A, 2022, vol. 219, iss. 9, pp. 2100400(1-5). DOI: https://doi.org/10.1002/pssa.202100400

[5] Fukuda Y., Yamada T., Sawada M. ESD parameter extraction by TLP measurement. 2009 31st EOS/ESD Symposium, 2009, pp. 1–6.

[6] ANSI/ESD S5.3.1 Electrostatic Discharge Sensitivity Testing–Charged Device Model (CDM)–Component Level, ESD association, 2009.

[7] Kuznetsov V. HBM, MM, and CBM ESD Ratings Correlation Hypothesis. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 107–114. DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2700492

[8] Ramaswamy S., Raha P., Rosenbaum E., Kang S.-M. EOS/ESD protection circuit design for deep submicron SOI technology. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1995, pp. 212–217. DOI: https://doi/org/10.1109/EOSESD.1995.478287

[9] Максимов И.В., Кузнецов В.В., Андреев В.В. Исследование модернизированной схемы защиты от электростатического разряда КМОП ИМС серии 1564. Технологии электромагнитной совместимости, 2017, № 4 (63), с. 35–41.

[10] MIL-STD-883E, Department of defense test methods standard: microcircuits, test standards (31 Dec 1996). Available at: http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf (accessed September 21, 2022).

УДК 514.86

Решение задачи рационального проектирования фермы космического аппарата с учетом необратимого поведения при нагружении

Куракин Владислав Владимирович curackin.vlad@yandex.ru
Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова

Рассмотрена задача рационального проектирования ферменной конструкции с точки зрения ее массы. Представлены методики проектного и поверочного расчета на прочность и устойчивость. Получены график зависимости массы конструкции от принятого проектного параметра, диаграммы эквивалентных напряжений в конструкции в случае линейной и нелинейной постановки задачи. Сделаны выводы о необходимости рассмотрения необратимого поведения конструкции при нагружении для проведения корректного поверочного расчета.

Ключевые слова: *прочностной расчет, ферменная конструкция, нелинейные деформации, массовый анализ*

Введение

В рамках курсового проекта, выполняемого на кафедре СМ1 МГТУ им. Н.Э. Баумана, возникла задача рационального проектирования переходной фермы космического аппарата для пилотируемой лунной экспедиции [1, 2]. Под рациональным проектированием понимается проектирование фермы наименьшей массы среди изделий относительно простой конструкции, удовлетворяющих требованиям прочности и устойсивости. Решение данной задачи было выполнено в два этапа:

1. Проектный расчет на основе упрощенной математической модели, допускающей аналитический подход к определению геометрических параметров фермы.
2. Поверочный расчет численными методами, дающий заключение об удовлетворении фермой условий прочности и устойчивости.

Проектный расчет

Ферма будет представлять собой набор стержней, ограниченный конической поверхностью с диаметрами оснований $D_1 = 3{,}10$ м и $D_2 = 4{,}00$ м, высотой $H = 2{,}50$ мм (рис. 1). Сечение фермы выбрано кольцевым, проектных параметров три: радиусы, характеризующие сечение R_1, R_2 и количество стержней $2I$.

Методика проектирования основана на аналитическом расчете, приведенном в [3]. Специальные гипотезы, упрощающие математическую модель (фундаментальные гипотезы строительной механики остаются неизменными):

- стержни одинаковой длины и сечения;
- в узлах стержней установлены шарниры (как следствие, стержни не работают на изгиб);
- треугольник отдельной фермы может воспринимать силы только в своей плоскости.

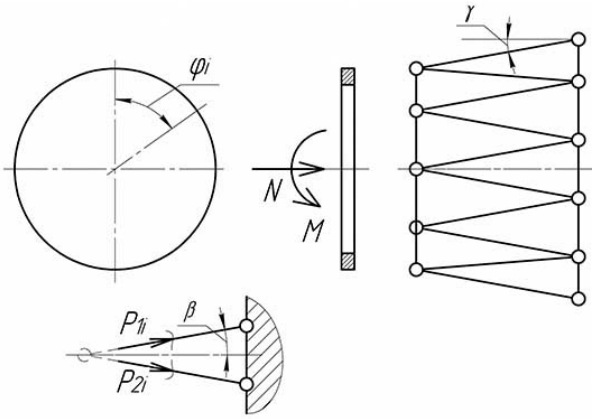


Рис. 1. Эскиз силовой схемы

В данной постановке ферма нагружена лишь сжимающей силой $N = 780$ кН и изгибающим моментов $M = 125$ кН. Тогда можно выразить сжимающие силы в каждой паре стержней:

$$P_{1i}(I) = \frac{1}{2cos\big(\beta(I)\big)cos(\gamma)}\left(\frac{N}{I} - \frac{Mcos\big(\varphi_i(I)\big)}{\frac{D_1}{2}\sum_{j=1}^{I} cos^2\left(\varphi_j(I)\right)}\right) -$$

$$- \frac{Mtg(\gamma)}{D_1 sin\big(\beta(I)\big)} \frac{sin\big(\varphi_i(I)\big)}{\sum_{j=1}^{I} sin^2\left(\varphi_j(I)\right)};$$

$$P_{2i}(I) = \frac{1}{2cos\big(\beta(I)\big)cos(\gamma)}\left(\frac{N}{I} - \frac{Mcos\big(\varphi_i(I)\big)}{\frac{D_1}{2}\sum_{j=1}^{I} cos^2\left(\varphi_j(I)\right)}\right) +$$

$$+ \frac{Mtg(\gamma)}{D_1 sin\big(\beta(I)\big)} \frac{sin\big(\varphi_i(I)\big)}{\sum_{j=1}^{I} sin^2\left(\varphi_j(I)\right)}.$$

Силу в самом нагруженном стержне обозначим следующим образом:

$$P_{max}(I) = max\left(P_{1,2_i}(I)\right).$$

Будем считать, что при такой нагрузке происходит потеря устойчивости стержня. Тогда, выражая ее через критическую силу для шарнирно опертого стержня (E — модуль упругости материала):

$$P_{max}(I) = \frac{\pi^3 E(R_2^4 - R_1^4)}{16\left(\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 - 2\frac{D_1}{2}\frac{D_2}{2}cos\left(\frac{\pi}{I}\right) + H^2\right)}.$$

Используем условие равнопрочности: будем говорить, что потеря устойчивости начинается одновременно с текучестью:

$$P_{max}(I) = \pi(R_2^2 - R_1^2)\sigma_{02}.$$

Из предложенных уравнений можно выразить радиусы R_1 иR_2, тогда независимый проектный параметр остается только один. Массу фермы можно записать следующим образом (рис. 2):

$$M(I) = \rho I \left(\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 - 2\frac{D_1}{2}\frac{D_2}{2} cos\left(\frac{\pi}{I}\right) + H^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P_{max}(I)}{\sigma_{02}}.$$

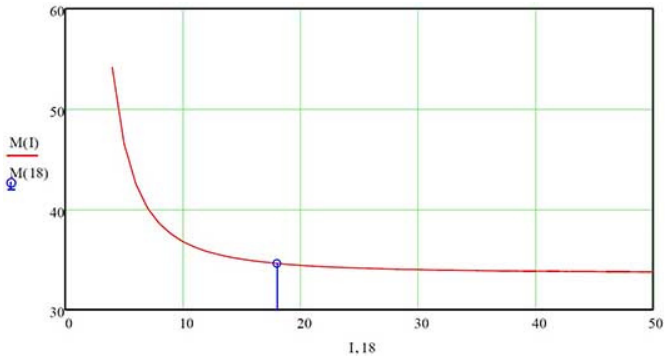


Рис. 2. График зависимости массы фермы (в кг) от числа шарниров I

Из графика можно сделать вывод, что при увеличении числа шарниров на более чем до 16–20 масса фермы уменьшается незначительно (рис. 3). Дальнейшее увеличение числа шарниров приведет больше к усложнению технологии изготовления фермы, чем к уменьшению массы.

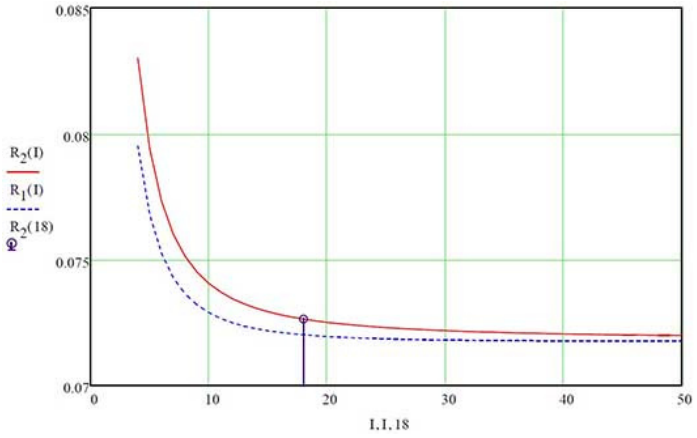


Рис. 3. Графики зависимостей радиусов кольца в сечении от числа шарниров I

Таким образом, с помощью проектного расчета можно аналитически задать число стержней фермы и определить значения радиусов кольца сечения.

Поверочный расчет

Проводя проектный расчет, следует понимать, что определенные в ходе него геометрические параметры могут завышать прочностные характеристики конструкции. Так, в отличие от расчетной модели в предыдущем пункте, поверочный расчет должен учесть следующие факторы:

3. Стержни воспринимают изгибные нагрузки.
4. Существуют концентраторы напряжений в местах резкого уменьшения радиуса кривизны поверхности, которые определяют прочностные показатели конструкции.

Был проведен поверочный расчет методом конечных элементов в линейной постановке (напряжения имеют размерность кгс/мм^2). Его результаты представлены на рис. 4.

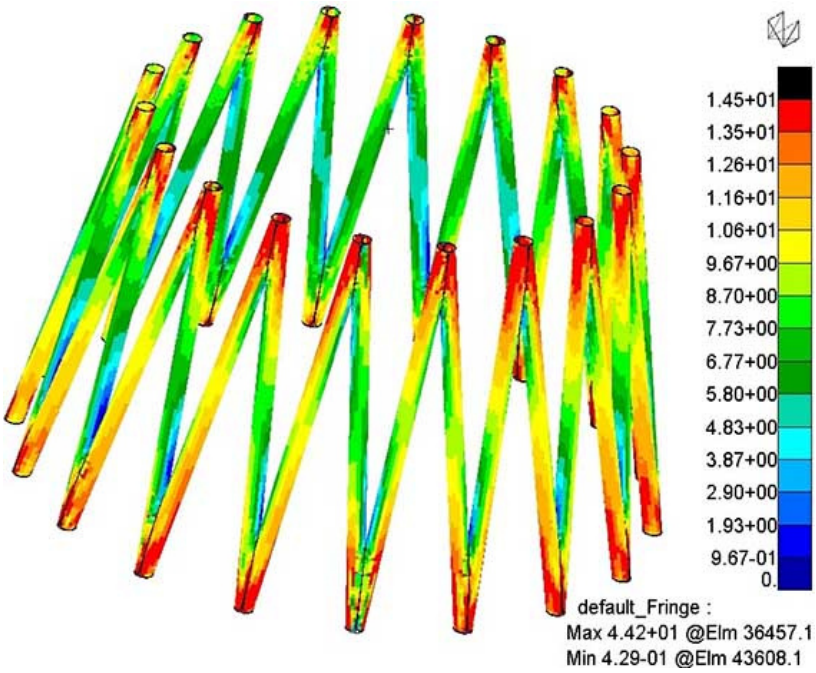


Рис. 4. Поле напряжений в линейной постановке

Зоны, в которых напряжения превышают предел текучести материала 14,5 кгс/мм^2, занимают значительную часть всей конструкции. При этом максимальное напряжение 44,2 кгс/мм^2 больше предела прочности 31,5 кгс/мм^2.

Повторим расчет, учитывая нелинейные свойства материала. Зададим билинейный закон упрочнения: деформации 0 соответствует напряжение 0, деформации 0,002 — напряжение 14,5 кгс/мм^2, деформации 0, 150 — напряжение 31,5 кгс/мм^2 [4].

Поле напряжений той же конструкции с учетом геометрической и физической нелинейности выглядит так, как показано на рис. 5.

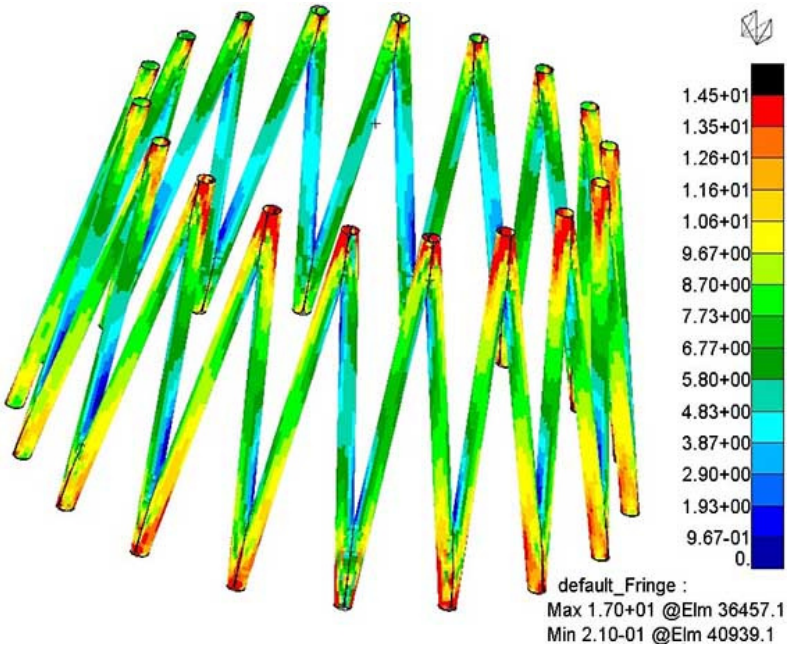


Рис. 5. Поле напряжений в нелинейной постановке

Можно увидеть, что область превышения предела текучести меньше, чем в линейной постановке, а максимальные напряжения 17,0 кгс/мм^2 значительно меньше предела прочности. Заключение об устойчивости проводим по малым максимальным перемещениям в конструкции (7 мм).

Выводы

Таким образом, в ходе решения задачи проектирования переходной фермы космического аппарата для пилотируемой лунной экспедиции были проведены:

5. Проектный расчет на прочность и устойчивость, в результате которого были назначены три геометрических параметра: радиусы колец в сечении стержня R_1, R_2 и количество стержней 2*I*.
6. Поверочный расчет на прочность и устойчивость, в результате которого был сделан вывод о необходимости рассмотрения нелинейных свойств материала, из которого изготовлена ферма. При напряжениях, больших предела текучести, в конструкции возникают необратимые остаточные деформации. То есть при разгрузке конструкции, она не вернется в первоначальное состояние или, другими словами, нагружение фермы в данном расчете является необратимым процессом.

Поверочный расчет показывает, что наибольшие напряжения в реальной конструкции превышают напряжения, которые были заданы в проектном расчете менее, чем на 15 %. Учитывая относительную доступность аналитической методики, можно считать ее достаточно эффективной в рамках решения поставленной задачи.

Литература

[1] Белик В.В., Маслова А.В., Меденков А.А. Прогнозирование потребностей обеспечения лунных экспедиций. Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники: матер. 51-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Москва, Эйдос, 2016, с. 270–271.

[2] Майорова В.И., Игрицкий В.А., Павлюченко В.А., Каменев Н.Д., Баочжо Лю, Горбунова К.В., Григорян В.И., Юе Чжан, Чжэньюй Ван, Мясищева Г.Р. Разработка транспортного пилотируемого корабля для регулярной доставки экспедиций на лунную базу. XLV Академич. чтения по космонавтике, посв. памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства: сб. тез.: в 4 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, т. 3, с. 292–294.

[3] Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. Строительная механика ракет. Москва, Высшая школа, 1984, 391 с.

[4] ГОСТ 18482–79. Трубы прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Москва, Стандартинформ, 2005, 17 с.

УДК 621.865.8

Выбор структурной схемы привода манипулятора

Кутлубаев Ильдар Мухаметович ptmr74@mail.ru
МГТУ им. Г.И. Носова

Дудоров Евгений Александрович dudorov@npo-at.com
АО «НПО «Андроидная техника»

Богданов Алексей Анатольевич rusandroid@mail.ru
АО «НПО «Андроидная техника»

Обеспечение момента, реализующего движение в наиболее нагруженной степени подвижности манипулятора антропоморфного робота выполняется через сдвоенный рычажный механизм. В качестве движителя используется гидравлический привод. Предложенная структурная схема обеспечивает компактность и реализацию кинематики достаточной для взаимодействия с габаритными внешними объектами. Схема использована при создании технологического макета в рамках выполнения проекта «Каньон» по заказу ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО».

Ключевые слова: *антропоморфный манипулятор, структурная схема, степень подвижности, рычажный механизм, гидравлический привод*

Антропоморфные роботы (АР), в перспективе, будут иметь достаточно широкую область применения. Основное назначение — выполнение действий свойственных и присущих человеку в повседневной деятельности и при реализации сложных технологических операций [1, 2]. При этом АР функционируют в техногенной инфраструктуре, изначально ориентированной на габариты и возможности человека. Скелетно-мышечная система человека обеспечивает высокое соотношение развиваемых усилий к массе, достижение аналогичных характеристик в АР при существующем уровне техники не представляется возможным [3]. Это определяет необходимость разработки структурных схем приводов, позволяющих повысить силомоментные характеристики АР.

Взаимодействие с внешними объектами реализуется через манипуляторы, обладающие семью степенями подвижности, три из которых сосредоточены в аналоге плечевого сустава [4, 5]. Наиболее нагруженной, при выполнении рабочих движений, является подвижность, обеспечивающая движения в плоскости перпендикулярной корпусу (аналогично: сгибание — разгибание). Требуемая величина момента на выходном валу определяется с учетом собственной массы манипулятора в пределах 250...300 Н·м. Вместе с тем установить классический привод, создающий значительный момент, не представляется возможным из-за их значительных габаритов.

У человека по аналогичной степени подвижности реализуется угол поворота от –40° до 170°. Анализ большинства действий, выполняемых с внешними объектами показал, что достаточным является изменение угла от 30° до 100°. В связи с этим в качестве кинематических требований следует считать изменения угла в пределах 70°. Скорость в данных операциях не является лимитирующим фактором и может быть ограничена 1.

Наличие трех степеней подвижности, локализованных в одной зоне корпуса, определяет необходимость: разнесения силовых частей приводов и использование приводов с большой удельной мощностью.

Исходя из изложенного, наиболее целесообразным является использование гидравлического привода с гидроцилиндром, располагаемым вдоль корпуса робота. На рисунке представлена структурная схема варианта построения привода и конструктивная реализация.

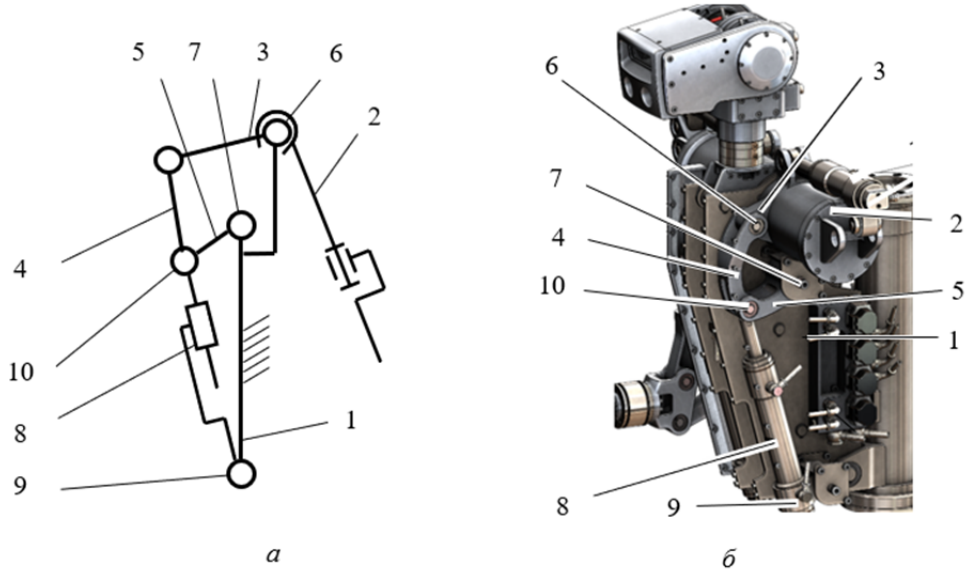


Рис. Корпус антропоморфного робота:
а — структурная схема привода; *б* — конструктивная реализация АР

Робот включает корпус *1* и два манипулятора. Каждый манипулятор, содержит плечевой модуль *2*, с тремя степенями свободы. Модуль жестко соединен с коромыслом *3* двухкоромыслового механизма. В состав механизма входит: шатун *4*, коромысло *5*. Оба коромысла соединены с корпусом через вращательные пары, соответственно коромысло *3* через пару *6*, а коромысло *5* через пару *7*.

Коромысло *5* является частью кулисного механизма, кулиса которого 8 выполнена в виде гидроцилиндра и соединена через вращательные пары 9 с корпусом *1* и через пару *10* с коромыслом *5*.

При необходимости выполнить движение в плечевом модуле, по степени подвижности сгибание — разгибание обеспечивается движение штока гидроцилиндра в направление к вращательной паре *10*.

Реализуется плоскопараллельное движение шатуна *4*, и далее поворот коромысла *3*. За счет того, что коромысло *4* жестко соединено с плечевым модулем обеспечивается поворот последнего.

Передаточная функция сдвоенных рычажных механизмов обеспечивает создание крутящего момента во вращательной паре *6* значительной величины. Преимущественная компоновка привода вдоль корпуса робота обеспечивает компактность всего

плечевого модуля. При реализации угла поворота коромысла *3* (плечевого модуля *2*) на угол 70° из исходного положения, сохраняется положение всех звеньев привода в пределах корпуса АР.

Увеличение момента создаваемого по степени подвижности сгибание — разгибание позволяет функционировать роботу с объектами значительной массы, что расширяет его функциональные возможности без увеличения габаритов самого робота.

Предложенная структурная схема реализована, в технологическом макете, созданного в рамках выполнения проекта «Каньон» по заказу ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО».

Литература

[1] Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения. Космическая техника и технологии, 2022, № 3 (38), с. 66–81.

[2] Дудоров Е.А., Сохин И.Г. Предназначение и задачи робототехнических систем в российской лунной программе. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2020, № 12 (729), с. 3–15.

[3] Пермяков А.Ф., Сохин И.Г., Шпонько А.А., Дудоров Е.А. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «Федор». Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2020, № 3 (207), с. 64–72.

[4] Жданова Ю.И., Дудоров Е.А., Богданов А.А. Обоснование структурной схемы исполнительной группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2022, № 2 (214), с. 20–26.

УДК 53.043

Исследования теплопроводности и электронной эмиссии образцов деталей при высокочастотных механических колебаниях

Лепешкин Александр Роальдович lepeshkin.ar@gmail.com
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Разработаны методики для исследований теплопроводности, эмиссии электронов и нестационарного теплового состояния образцов деталей при высокочастотных механических колебаниях. С использованием разработанных методик представлены исследования нестационарного теплового состояния образцов (стержней) с применением термографа. Исследование эмиссии электронов проведено на устройстве со стержнем и пластинами, между которыми изменялся зазор, с использованием чувствительного анализатора спектра. По результатам исследований определены характеристики изменения теплопроводности образцов и электронной эмиссии (в зависимости от зазора). Полученные результаты имеют актуальное значение для учета влияния изменения теплопроводности и эмиссии электронов на тепловое состояние вращающихся лопаток турбин двигателей и других турбомашин при воздействии механических колебаний в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: *механические колебания, теплопроводность, электронная эмиссия, турбомашины*

Введение

В данной работе предложены методики исследований теплопроводности, электронной эмиссии образцов деталей и нестационарного теплового состояния деталей при воздействия высокочастотных (ВЧ) ультразвуковых механических колебаний. В работе [1] был обнаружен электрический сигнал (переменная ЭДС) в полупроводниковом материале (германии) при воздействии ультразвуковых (УЗ) колебаний (волн). Это одно из проявлений акустоэлектронного взаимодействия. Появление тока или ЭДС связано с передачей импульса (и соответственно энергии) от УЗ-волн (от фононов) к электронам проводимости. Это приводит к направленному движению носителей (увеличению скорости дрейфа электронов) — электрическому току в направлении распространения звука. В данной работе зарегистрированы электрические сигналы (переменные ЭДС, возникающие при действии УЗ-колебаний (волн) на перемещение свободных электронов) в металлических образцах и деталях из разных сплавов при воздействии ВЧ-механических колебаний. Указанные факторы влияют на теплопроводность и эмиссию электронов. Ранее проводилось исследование влияния низкочастотных механических колебаний на теплопроводность проводников из никелевого сплава [2]. Известно несколько эмиссионных физических явлений, заключающихся в испускании электронов телами под воздействием различных внутренних и внешних факторов: термоэмиссионная, фотоэлектронная, вторичная электронная, автоэлектронная, взрывная электронная эмиссии [3, 4]. В данной работе обнаружен и иссле-

дован новый вид электронной эмиссии деталей при воздействии механических колебаний.

Результаты исследований

В работе предложен метод нестационарного определения температуропроводности материалов в поле действия ультразвуковых ВЧ-механических колебаний. С его помощью проведены исследования. Разработано устройство для определения указанных характеристик, которое представляет собой конструкцию с ультразвуковым преобразователем и образцом (моделью лопатки турбины) в виде стержня (волновода) с электронагревателем. Внутри средней части корпуса устройства расположен магнитострикционный преобразователь, работающий на частоте 20 кГц с интенсивностью 50 Вт и на конце конструкции — стержень.

Методика исследований предусматривала закрепление на середине стержня переменного сечения (в виде конуса) электронагревателя с теплоизоляцией, состоящего из нескольких витков хромелевого провода. Кончик стержня выполнен в виде плоской расширяющейся части. В точке кончика стержня исследовалась температура и передача тепла от электронагревателя. Для исследования теплового состояния конусного стержня и бесконтактных измерений температур его поверхности использовался термограф Flir. Контроль за температурным состоянием стержня с электронагревателем, производился компьютерной системой, связанной с термографом с чувствительностью 0,05 °С в широком диапазоне температур. Спектральный диапазон камеры 3...5 мкм. Обработка результатов осуществлялась по разработанной программе. Для питания электронагревателя использовался стабилизированный источник питания.

Проводились исследования кривых температуры кончика конусного стержня в зависимости от времени при передаче тепла от электронагревателя в экспериментах с включенным ультразвуковым преобразователем и без него до температуры 130 °С. Эти кривые приведены на рис. 1 и 2.

Анализ скоростей нагрева и времени передачи тепла проводился по кривым температуры кончика конического стержня (см. рис. 1) в начале нагрева. По результатам указанных исследований было получено, что температуропроводность металлического стержня из углеродистой стали с учетом влияния ультразвуковых колебаний, увеличивается в 2 раза.

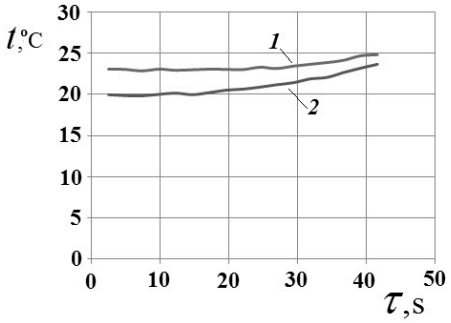


Рис. 1. Кривые температуры кончика конического стержня в зависимости от времени (до 40 с):
1 — без влияния ВЧ-механических колебаний; *2* — с влиянием ВЧ-механических колебаний

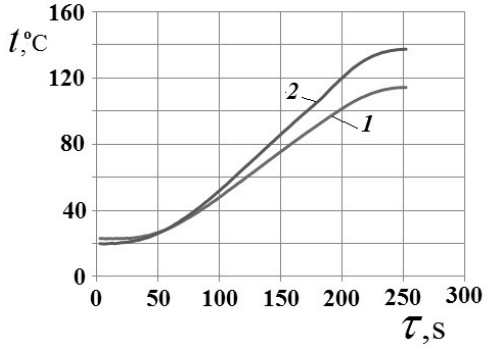


Рис. 2. Кривые нагрева кончика конического стержня в зависимости от времени (до 250 °C): *1* — без влияния ВЧ-механических колебаний; *2* — с влиянием ВЧ-механических колебаний

На этом же устройстве, работающем на частоте 20 кГц, проведены исследования эмиссии электронов, которая возникала также под воздействием высокочастотных механических колебаний. Для этого на конце кончика стержня была установлена первая медная пластина (эмиттер) и параллельно ей вторая медная пластина (коллектор). Воздушный зазор между пластинами изменялся при исследованиях. Для измерения ЭДС и тока электронной эмиссии вторая пластина через соединительный кабель подключалась к чувствительному анализатору сигналов и спектра MIC-200. Получены значения тока электронной эмиссии (рассчитанные по измеренным значениям ЭДС) при увеличении зазора между пластинами от 0,1 до 1,0 мм при воздействии механических ультразвуковых колебаний, которые показаны на рис. 3. В целом получены результаты по исследованиям изменения теплопроводности и возникающей эмиссии электронов под воздействием механических колебаний на частоте 20 кГц. При этом теплопроводность и эмиссия электронов металлических образцов увеличивается.

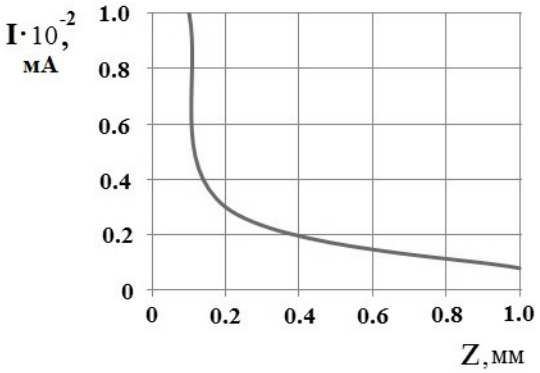


Рис. 3. Кривая тока электронной эмиссии в зависимости от зазора между медными пластинами

При воздействии эмиссии электронов температура кончика стержня снижалась на 20...30 °C в связи с тем, что испускаемые свободные электроны уносили часть теплоты. Кроме того, зарегистрированы электрические сигналы (переменные ЭДС, возникающие при действии УЗ-механических колебаний (волн) на перемещение свободных

электронов) с использованием анализатора спектра в указанных стержнях и других образцах из разных сплавов при воздействии высокочастотных механических колебаний, что свидетельствует об увеличении скорости дрейфа электронов в металле.

Заключение

Разработаны методы и устройства для исследования теплопроводности, эмиссии электронов и нестационарного теплового состояния образцов деталей (лопаток турбин) — стержней переменного сечения, в средней части которых установлен электронагреватель, при ВЧ-механических колебаниях. С использованием разработанных методов проводились исследования нестационарного теплового состояния стержней с применением термографа. Эмиссия электронов исследовалась на устройстве со стержнем и пластинами (между которыми изменялся зазор) с использованием чувствительного анализатора спектра. При воздействии эмиссии электронов температура кончика стержня несколько снижалась. По результатам исследований были определены характеристики теплопроводности и электронной эмиссии в зависимости от зазора. Полученные результаты имеют актуальное значение для учета эмиссии свободных электронов (переносящих порции теплоты) с вращающихся рабочих лопаток турбин двигателей и других турбомашин при воздействии механических колебаний для более точного расчета теплового состояния лопаток турбин в условиях эксплуатации.

Литература

[1] Weinreich G., White H.G. Observation of the Acoustoelectric Effect. Phys Rev, 1957, no. 106, pp. 1104–1106.

[2] Лепешкин А.Р. Исследования температуропроводности разных металлических материалов при воздействии виброускорений. Необратимые процессы в природе и технике: X Всерос. конф.: тр.: в 3 ч. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, ч. II, с. 337–340.

[3] Спроул Р. Современная физика. Москва, Наука, 1974, 592 с.

[4] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. Москва, Советское радио, 1974, 256 с.

УДК 621.382

Фоторезистивные структуры на основе восстановленного оксида графена и углеродных наночастиц

Митюшев Никита Дмитриевич nikita.mit55@gmail.com
МГУ имени М.В. Ломоносова

Двумерные (2D) материалы, такие как восстановленный оксид графена (GO), позволяют получить фоторезистивные структуры в планарном исполнении. 2D-материалы, модифицированные с помощью углеродных наночастиц (УНЧ), позволяют контролировать резистивные состояния таких структур с помощью света в видимом диапазоне. Целью работы было определение возможных путей восстановления и модифицирования оксида графена с помощью УНЧ для создания планарной фоторезистивной структуры, чувствительной к свету в видимом диапазоне, с кратковременной и долгосрочной резистивной памятью.

Ключевые слова: *оксид графена, углеродные наночастицы, резистивные материалы, вольт-амперная характеристика, энергонезависимая память, светочувствительность*

Введение

Двумерные (2D) материалы, такие как восстановленный оксид графена (GO) позволяют получить фоторезистивные структуры в планарном исполнении. 2D-материалы, модифицированные с помощью углеродных наночастиц (УНЧ), позволяют контролировать резистивные состояния таких структур с помощью света в видимом диапазоне.

Целью работы было определение возможных путей восстановления и модифицирования оксида графена с помощью УНЧ для создания планарной фоторезистивной структуры, чувствительной к свету в видимом диапазоне, с кратковременной и долгосрочной резистивной памятью.

Экспериментальная часть

Подготовка такого рода наноструктур включала несколько этапов:

1. Накапывание на вращающуюся подложку коллоидных растворов GO.
2. Восстановление GO на подложке в автоклаве в присутствии плавиковой кислоты и аскорбиновой кислоты/гидразина при 90 °C в течение 3 ч.
3. Перенос тонких пленок восстановленного GOF на измерительные резистивные микроструктуры с золотыми контактами, изготовленные методом фотолитографии.
4. Синтез УНЧ из лимонной кислоты и спермина в гидротермальных условиях, диализ и их последующее нанесение на оксид графена.

Обсуждение результатов

Проведенный EDX-анализ полученных пленок GOF показал наличие фтора в атомарном содержании от 2,5 до 19 %. Инфракрасное излучение указало на наличие связи C-F, рамановская спектроскопия демонстрирует возрастание пика D по сравнению с исходным GO, а также сужение ширины пиков, что свидетельствует об увеличении

степени кристаличности образца. Помимо этого рамановская спектроскопия подтверждает равномерность полученных пленок. Согласно данным профилометрии, толщина полученных пленок составляет около 40...80 нм. Спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) показывают существенное снижение количества кислорода, а также наличие фтора и азота в восстановленных образцах GOF. Важно отметить, что с помощью РФЭС установлено наличие азота, который допировался напрямую в углеродную сетку восстановленного оксида графена.

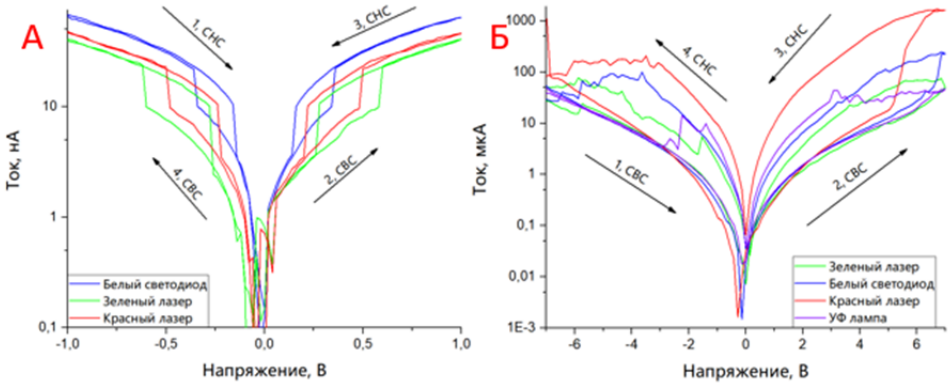


Рис. 1. ВАХ структуры с нанесенным GO, восстановленным аскорбиновой кислотой, в виде пленки, с УНЧ (А), ВАХ структуры с нанесенным GO, восстановленный гидразином, в виде пленки, с УНЧ (Б)

На рис. 1 (А) приведена ВАХ полученной структуры, где оксид графена восстанавливали аскорбиновой кислотой, при прямой и обратной развертке напряжения в диапазоне от –1 до +1 В. Данная структура резистивно переключается при облучении светом, то есть напряжение переключения зависит от длины волны возбуждаемого света, а именно в диапазоне от –0,15 до –0,7 В и от 0,15 до 0,6 В при прямой и обратной развертке, соответственно. Это позволяет использовать ее как универсальную ячейку памяти, переключаясь между различными состояниями проводимости с помощью света, при этом память структуры краткосрочная, поскольку состояния высокой и низкой резистивности (СВС и СНС на рисунке), а именно химические превращения между атомарными слоями ОГ, сбрасываются после прохождения 0 напряжения.

На рис. 1 (Б) показана ВАХ структуры, изготовленной тем же методом, но с другим восстановителем — гидразином. За счет этого происходит расширение диапазона токов (на 2–3 порядка за счет использование более сильного восстановителя и образования большего числа двойных связей C=C), а также то, что после прохождения нуля состояние резистивности сохраняется, соответственно, химические превращения тоже, благодаря чему структуру можно считать энергонезависимой (это объясняется допированием азота в структуру оксида графена). Структура также чувствительна к свету, и диапазоны изменения токов напрямую зависят от длины волны. Так, при облучении красным светом изменение токов 10^2, при облучении белым — 25, при облучении зеленым — 5, при облучении ультрафиолетом — 3.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект №19-29-03050.

Литература

[1] Jeong H.K., Jin M.H., So K.P. Tailoring the characteristics of graphite oxides by different oxidation times. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, vol. 42, no. 6, art. 065418. DOI: https://doi.org/ 10.1088/0022-3727/42/6/065418

[2] Zhuge F., Li R.-W., He C., Liu Zh., Zhou X. Non-Volatile Resistive Switching in Graphene Oxide Thin Films, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering. Physics and Applications of Graphene, Experiments, April 2011. DOI: https://doi.org/10.5772/15201

[3] Romero F.J., Toral A., Medina-Rull A., Moraila-Martinez C.L., Morales D.P., Ohata A., Godoy A., Ruiz F.G., Rodriguez N. Resistive Switching in Graphene Oxide. Front Mater, 31 January 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00017

[4] Lim S.Y., Shen W., Gao Zh. Carbon quantum dots and their applications. Chem Soc Rev, 2015, vol. 44 art. 362. DOI: https://doi.org/10.1039/C4CS00269E

[5] van Dam B., Marino E. Excitation-dependent photoluminescence from single-carbon dots. Small, 2017, vol. 13 (48), art. 1770251. DOI: https://doi.org/10.1002/smll.201770251

[6] Mondal S., Chatti M., Mallick A., Purkayastha P. pH triggered reversible photoinduced electron transfer to and from carbon nanoparticles. Chem Commun (Camb), 2014, vol. 50 (52), pp. 6890–6893. DOI: https://doi.org/10.1039/c4cc01669f

[7] He X., Li H., Liu Y., Huang H., Kang Z., Lee S.-T. Water soluble carbon nanoparticles: hydrothermal synthesis and excellent photoluminescence properties. Colloids Surf, B, 2011, vol. 87 (2), pp. 326–332. DOI: https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2011.05.036

[8] Li D., Han D., Qu S.-N., Liu L., Jing P.-T., Supra-(carbon nanodots) with a strong visible to near-infrared absorption band and efficient photothermal conversion. Light: Science & Applications, 2016, vol. 5, art. 16120. DOI: https://doi.org/10.1038/lsa.2016.120

УДК 621

Контроль и диагностика валопроводов турбоагрегатов по крутильным колебаниям

Назолин Андрей Леонидович nazolin72@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана; ИМАШ РАН

Рассмотрены проблемы создания систем контроля и диагностики валопроводов турбоагрегатов по крутильным колебания и показаны пути их эффективного решения. Описаны причины возбуждения крутильных колебаний и способы их идентификации с использованием режимных параметров работы турбоагрегата. Сформулированы цели и способы реализации измерительного контроля валопроводов турбоагрегатов по крутильным колебаниям. Предложен способ повышения точности измерений спектральных параметров крутильных колебаний с учетом влияния режимных параметров работы турбоагрегата, обеспечивающий раннее диагностирование дефектов целостности валопровода типа трещина вала, ослабление жесткости муфтовых соединений в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *валопровод, турбоагрегат, метод временных интервалов, крутильные колебания, угловая вибрация, дефект, диагностика, трещина*

Развиваемые сегодня системы контроля, мониторинга и предиктивной (предсказательной) диагностики технического состояния валопроводов турбоагрегатов АЭС и ТЭС ориентированы на использование поперечных (изгибных) колебаний. В то же время новые возможности контроля и диагностирования валопроводов открывают измерения крутильных колебаний (КК) или угловых вибраций вала. КК не входят в перечень контролируемых штатных параметров АСУТП энергоблоков и поэтому для их оценки требуется установка специализированных средств контроля и диагностики основного динамического тепломеханического оборудования электростанций.

Разрабатываемые у нас в стране и за рубежом системы контроля КК валопроводов турбоагрегатов используют бесконтактные датчики КК (угловых вибраций) вала, включающие в себя установленные на вал информационные и опорные маркеры угловых положений вала и датчики угловых маркеров вала, установленные неподвижно вне вала и регистрирующие моменты прохождения маркеров угловых положений вала [1]. Перед разработчиками таких систем стоят следующие актуальные проблемы:

- повышение точности измерения КК (угловой вибрации) бесконтактным методом во всем диапазоне частот возбуждения, особенно на частотах вынужденных КК, целочисленно кратных частоте вращения;
- определение причин возбуждения КК и признаков их проявления;
- оперативная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) валопровода в динамике;
- диагностирование дефектов целостности валопровода в динамике.

Проблема повышения точности измерения КК заключается в необходимости устранения методических и инструментальных ошибок восстановления из дискретного сигнала временных интервалов прохождения угловых маркеров вала сигнала угловой вибрации в виде зависимости угла поворота вала и угла закрутки вала от времени во всем спектральном диапазоне частот возбуждения.

Решение этой проблемы опубликовано в [2] и защищено патентом на изобретение РФ [3], в котором предложено устройство и способ мониторинга КК роторных агрегатов, обеспечивающее наилучшую точность измерения КК (угловой вибрации) во всем диапазоне частот возбуждения. Здесь впервые теоретически обоснованы формулы оценка КК в сечении вала и угла закрутки вала между сечениями методом временных интервалов, учитывающие влияние поперечных перемещений вала и/или датчиков КК, инструментальную погрешность расположения маркеров угловых положения вала.

Достоинствами устройства и способа мониторинга КК по патенту [3] являются:

- возможность непрерывной оценки временных и спектральных параметров КК во всех режимах работы турбоагрегата, включая переходные, например выбег ротора;
- легкость встраивания в существующие штатные системы виброконтроля турбоагрегатов путем установки в местах штатного расположения датчиков относительной вибрации вала и абсолютной вибрации подшипниковых опор по одному датчику КК;
- возможность объединения систем виброконтроля изгибных и крутильных колебаний валопровода для оперативной оценки в режиме мониторинга НДС валопровода и его остаточного ресурса путем подсчета числа циклов, превышающих предел выносливости роторной стали;
- возможность оперативного, в реальном масштабе времени контроля всплесков амплитуд гармоник собственных и вынужденных частот КК с максимальной задержкой времени выдачи сигнала срабатывания защиты энергоблока по пороговому уровню, не превышающей одного периода вращения вала.

Контроль развитых (больших по размаху) КК не требует прецизионной точности измерения временных интервалов между маркерами углового положения вала, обеспечиваемой оптическими датчиками частоты вращения [4]. Для этих целей в условиях электростанции в качестве датчиков КК достаточно использовать менее точные вихретоковые датчики частоты вращения вала и/или датчики частоты вращения вала на эффекте Холла [1]. Эти датчики имеют расширенный температурный диапазон и устойчивы к агрессивной внешней среде, что позволяет устанавливать их в местах расположения опор подшипников скольжения валопровода, где обычно устанавливают датчики относительной вибрации вала (проксиметры), что удобно так как сигналы штатных проксиметров входят в алгоритм оценки КК вала [2, 3].

Согласно ГОСТ [5] типичными причинами возбуждения КК валопроводов турбоагрегатов являются повреждения в электрической сети, включая срабатывание прерывателя, внутренние повреждения генераторов, приводящие к короткому замыканию токов статора, рассинхронизация генератора с сетью, плановая коммутация линии связи, изменение нагрузки, несимметрия фазовых напряжение в сети, подсинхронный резонанс, пульсирующие моменты при работе паровой турбины и др. Все они приводят к возбуждению гармоник собственных и/или вынужденных частот КК, в том числе гармоники вынужденных КК на удвоенной частоты сети.

Демпфирование КК в турбоагрегатах очень мало по сравнению с демпфированием изгибных колебаний ротора, поэтому возбуждение КК вследствие переходных процессов в электросети приводит к многомодовым долго незатухающим колебаниям валопровода. Подтверждением тому результаты мониторинга собственных частот КК валопровода турбоагрегата 300 МВт, опубликованные в [1].

К другим возможным причинам возбуждения КК следует отнести дефекты задевания опорных шеек о вкладыш подшипника скольжения, вибрацию лопаток турбины, а также аэродинамические возмущения в последних ступенях цилиндра низкого давления. Идентификация дефекта задевания возможна по спектру вынужденных частот КК. Вибрация лопаток турбины выявляется по резонансным частотам изгибных колебаний лопаток турбины в спектре КК вала.

Вынужденные КК на удвоенной частоте сети могут возбуждать моды КК относительно высокого порядка. Такие режимы работы требуют применения сложных моделей для расчета связанных изгибных колебаний лопаток турбины низкого давления и КК валопровода с целью отстройки конструкции валопровода от резонанса.

Для выявления причин возбуждения КК необходимо и достаточно вести измерительной контроль и совместную обработку результатов измерений КК валопровода, электрических параметров работы генератора и технологических параметров работы турбины. При достаточном количестве датчиков КК контроль КК должен заключаться в оперативной оценке НДС валопровода и сравнении максимальных напряжений с пороговыми уровнями значимости для выдачи сигнала аварийной сигнализации оперативному персоналу и/или сигнала аварийного останова турбоагрегата, если это будет предусмотрено заводской инструкцией. При недостаточном для оценки НДС валопровода датчиков КК контроль КК должен заключаться в сравнительной оценке амплитуд собственных и вынужденных частот КК с пороговыми уровнями значимости для выдачи сигнала аварийной сигнализации оперативному персоналу.

Прецизионный контроль спектральных параметров КК с учетом режимных параметров работы турбоагрегата по патентам РФ [6, 7] открывает новые возможности в диагностировании дефектов целостности валопровода в процессе эксплуатации, а именно: трещины (поперечная, продольная, кольцевая) вала, ослабления посадки полумуфт, разрушения болтов полумуфт. Это наиболее опасные дефекты, способные вызвать разрушение работающего в сети турбоагрегата в целом [8].

В [1] показано, что измерения КК с использованием наиболее точного оптического датчика КК без учета влияния режимных параметров турбоагрегата позволяют обнаруживать трещины вала, начиная с 35 % площади сечения вала. Учет влияния режимных параметров по патентам [5, 6] обеспечивает обнаружение трещин усталости, начиная с 2…5 % площади сечения вала.

Диагностическими признаками дефектов целостности валопровода являются уменьшение значений собственных частот КК, особенно по тем формам, к узлам которых ближе расположено место дефекта, увеличение амплитуды и демпфирования гармоник собственных частот КК, статического угла закрутки вала. Процесс диагностирования должен заключаться в построении трендовых характеристик диагностических параметров (собственная частота, амплитуда, демпфирование, угол закрути вала) и сравнение их с пороговыми уровнями значимости для выдачи сигнала аварийной сигнализации оперативному персоналу на ранней стадии развития дефекта.

Использование патентов РФ [3, 6, 7] обеспечивает эффективное решение актуальных проблем создания систем контроля и диагностики валопроводов турбоагрегатов по КК.

Литература

[1] Назолин А.Л. Поляков В.И., Гнездилов С.Г. Диагностика целостности валопроводов по крутильным колебаниям. Теплоэнергетика, 2020, № 1, с. 32–43.

[2] Назолин А.Л., Куменко А.И., Поляков В.И. Теоретические основы создания штатной системы диагностического мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов. XX Международная научно-практическая конференция «Энергоресурсосбережение. Диагностика — 2022»: сб. материалов. Ульяновск, 2022, т. 2, с. 278–290.

[3] Куменко А.И., Назолин А.Л., Поляков В.И. Устройство и способ мониторинга крутильных колебаний вращающегося вала (варианты). Патент № 2782741 Российская Федерация, 2022, бюл. 31, 15 с.

[4] Морозов А.Н., Назолин А.Л., Поляков В.И. Прецизионная оптико-электронная система мониторинга крутильных колебаний валопровода турбоагрегата. ДАН, 2017, т. 472, № 2, с.145–149.

[5] ГОСТ Р ИСО 13373-1 2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. Москва, Стандартинформ, 2010, 43 с.

[6] Морозов А.Н., Назолин А.Л., Поляков В.И. Способ обнаружения усталостного повреждения вала турбоагрегата. Патент № 2579639 Российская Федерация, 2016, бюл. 10, 7 с.

[7] Назолин А.Л., Поляков В.И. Способ обнаружения повреждения вала роторного агрегата (варианты). Патент № 2702923 Российская Федерация, 2019, бюл. 29, 10 с.

[8] Загретдинов И.Ш., Костюк А.Г., Трухний А.Д., Должанский П.Р. Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы. Теплоэнергетика, 2004, № 5, с. 5–15.

УДК 621.785.5

Исследование упрочняющего эффекта при химико-термической обработке дуплексных сталей, легированных редкоземельными металлами и кобальтом

Низиенко Марина Олеговна nmo18t289@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Смирнов Андрей Евгеньевич smirnoff@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Севальнёв Герман Сергеевич Herman92@mail.ru
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Выполнен анализ способности к упрочнению новой дуплексной стали после различных комбинаций химико-термической обработки. Толщина диффузионного слоя возрастает с 0,1 мкм (440–450 HV0,1) после вакуумной цементации до 80 мкм (900 HV0,1) после предварительного вакуумного азотирования с последующей вакуумной цементацией. Выдвинуто предположение о том, что в матричной фазе — дельта-феррите — очень большое содержание легирующих элементов, из-за которых полностью блокирован массоперенос.

Ключевые слова: *химико-термическая обработка, дуплексные стали, вакуумная цементация, вакуумное азотирование*

Дуплексные стали — стали, основу микроструктуры которых составляют две фазы, например, дельта-феррит и аустенит, определяющие низкое тепловое расширение и, как следствие, высокую размерную стабильность. Также исследуемая сталь — дисперсионно-твердеющая, что проявляется в упрочнении при выделении ряда интерметаллидов при старении [1]. Дополнительное легирование бериллием и кобальтом увеличивает эффективность дисперсионного твердения [2, 3]. Известно, что у данной группы сталей сильно замедлен массоперенос из-за большой насыщенности матричной фазы легирующими элементами [4]. В данной работе исследовали особенности массопереноса и упрочняющий эффект при различных видов ХТО.

Цель работы — получить данные о структуре и распределении микротвердости в новой дуплексной стали после ХТО, и тем самым оценить упрочняющий эффект.

Исследования проводили на образцах дуплексной ферритно-аустенитной стали системы легирования Cr-Ni-Co-Be, микролегированной редкоземельными металлами (РЗМ).

Объектами исследования служили шлифы, приготовляемые по традиционной методике. Для травления использовали реактив Марбле.

Химико-термическую обработку (ХТО) проводили в универсальной вакуумной установке. Вакуумное азотирование (ВА) проводили в атмосфере аммиака при температуре 540 °С в течение 16 часов при давлении 10 кПа. Вакуумную цементацию (ВЦ) выполняли при температуре 920 °С и давлении 800 Па в течение 2 ч.

Исследования структуры проводили на световом микроскопе OLYMPUS GX51 при увеличении х200. Распределение микротвердости в поперечном сечении измеряли на твердомере Durascan 70 при нагрузке 0,1 кг по методу Виккерса. Измерения вы-

полняли не только в поперечном сечении, но и на поверхности образцов. За результат принимали среднее значение не менее пяти измерений.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре «ДРОН-4М» в монохроматизированном кобальтовом K–α-излучении в диапазоне значений углов 20… 120°.

По данным микроструктуры образца после насыщения углеродом (рис. 1, *а*) видно, что максимальная толщина слоя оставляет 0,1 мкм. Результаты распределения микротвердости по сечению образца (рис. 2) показывают, что прирост микротвердости отсутствует, значение микротвердости в слое близко к значению микротвердости сердцевины (440–450 $HV_{0,1}$). Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА) (табл. 1) после вакуумной цементации обнаружено малое содержание карбидов. Анализ полученных результатов дает возможность сделать предположение о том, что в матричной фазе — d-феррите, очень большое содержание легирующих элементов, из-за которых полностью блокирован массоперенос.

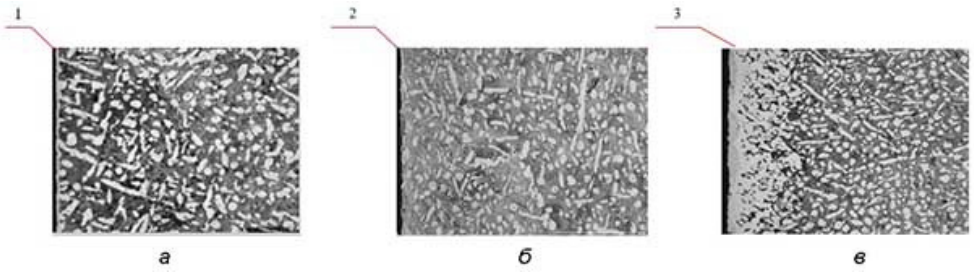


Рис. 1. Микроструктура диффузионного слоя образца с Co и со средним содержанием РЗМ: *а* — после вакуумной цементации; *б* — после вакуумного азотирования; *в* — после вакуумного азотирования с последующей вакуумной цементацией: диффузионный слой после ВЦ (1), ВА (2) и ВЦ+ВА (3); ×200

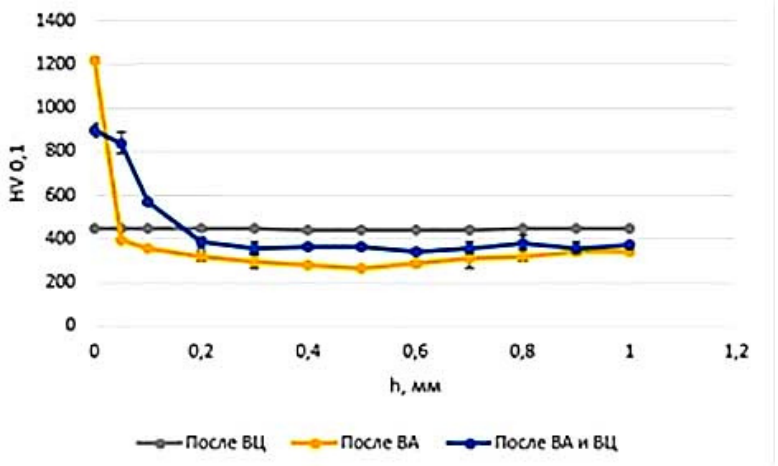


Рис. 2. Распределение микротвердости HV 0,1 по толщине *h* диффузионного слоя образца с Co и средним содержанием РЗМ после вакуумной цементации, вакуумного азотирования, вакуумного азотирования с последующей вакуумной цементацией

Таблица

Результаты рентгенофазового исследования после различных видов ХТО

Вид ХТО	Твердые растворы	Карбиды	Нитриды
ВЦ	α-Fe, γ-Fe	Мало: Fe_3C, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$	—
ВА	α -Fe, γ-Fe	—	Fe_2N, CrN, Mo_2N, MoN

После ВА (рис. 1, *б*) наблюдается нитридный слой в тонком поверхностном слое толщиной до 0,1 мкм. Азот насыщает дельта-феррит и образуются нитриды, что подтверждает значение микротвердости на поверхности (рис. 2) 1220±40 HV0,01 и результаты РФА (см. таблицу). При этом сильно уменьшается насыщенность d-феррита. Если после ВА провести последующую вакуумную цементацию, то можно получить диффузионный слой толщиной до 80 мкм (рис. 1, *в*). с максимальной микротвердостью в слое до 900 HV0,1.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы об упрочняющем эффекте в новой дуплексной стали после различных видов ХТО.

7. Анализ результатов насыщения образцов углеродом при ВЦ показывает, что из-за большой насыщенности матричной фазы — d-феррита — диффузионный массоперенос практически отсутствует, как следствие, нет прироста микротвердости. Максимальная толщина слоя составляет 0,1 мм. При этом твердость этого слоя сопоставима с твердостью сердцевины.
8. Данные, полученные после ВА, свидетельствуют об образовании нитридной фазы в поверхностном слое, что подтверждает значение твердости поверхности, равное 1160–1250 HV0,01 и результаты РФА, как следствие, уменьшается насыщенность матричной фазы.
9. При проведении последующей вакуумной цементации диффузионный слой увеличивается до 80 мкм, микротвердость в слое достигает значения 900 $HV_{0,1}$.

Литература

[1] Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира. Черная металлургия, 2020, № 63, с. 405–418.

[2] Филянд М.А., Семенова Е.И. Свойства редких элементов. Москва, Металлургия, 1964, 899 с.

[3] Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С., Семенов М.Ю., Громов В.И., Курпякова Н.А., Севальнёв Г.С. Применение комплексной химико-термической обработки для упрочнения высокопрочной дисперсионно-твердеющей теплостойкой стали, микролегированной РЗМ. Металловедение и термическая обработка металлов, 2018, № 7, с. 38–42.

[4] Низиенко М.О., Смирнов А.Е., Севальнёв Г.С. Исследование химико-термической обработки дуплексных сталей, легированных редкоземельными металлами и кобальтом. «Будущее машиностроения России»: сб. тр. XV Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, т. 1, с. 54–60.

УДК 629.7.05

Применение дипольной анизотропии реликтового излучения в задачах навигации и ориентации

Николаев Павел Петрович ppn@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гордин Михаил Валерьевич gordinmv@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гладышев Владимир Олегович gladyshev@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кауц Владимир Леонидович kauts@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Литвинов Дмитрий Александрович litvirq@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана; ФИАН

Шарандин Евгений Анатольевич shar@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Разработан и изготовлен для проведения экспериментальных исследований экспериментальный макет радиометра реликтового излучения с флуктуационной температурной чувствительностью менее 1 мК, которая достаточна для уверенного определения дипольной анизотропии реликтового излучения. Продемонстрирована потенциальная возможность использования такого радиометра в системах навигации и ориентации. Для адекватной экспериментальной апробации необходимо размещение радиометра на высотных площадках для нивелирования влияния атмосферных и техногенных тепловых шумов.

Ключевые слова: *навигационная система, реликтовое излучение, дипольная составляющая, радиометры*

Одним из перспективных направлений в области создания новых систем навигации и ориентации является использование в качестве навигационного поля одного из наиболее стабильных геофизических полей – микроволнового фонового излучения Вселенной (реликтового излучения) [1]. Спектр реликтового излучения соответствует спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 2,725 К. Его максимум приходится на частоту 160,4 ГГц, что соответствует длине волны 1,9 мм. Реликтовое излучение имеет выраженную анизотропию (рис. 1, слева) со среднеквадратичным отклонением температуры ~18 μК (за вычетом дипольной составляющей). В реликтовом излучении заметно выделена дипольная составляющая (рис. 1, справа) со среднеквадратичным отклонением температуры ~3,4 мК, которая появляется в следствие эффекта Доплера, возникающего при движении Солнечной системы относительно реликтового излучения со скоростью ~370 км/с в направлении созвездия Льва (галактические координаты $l = 276°$, $b = 30°$) [2].

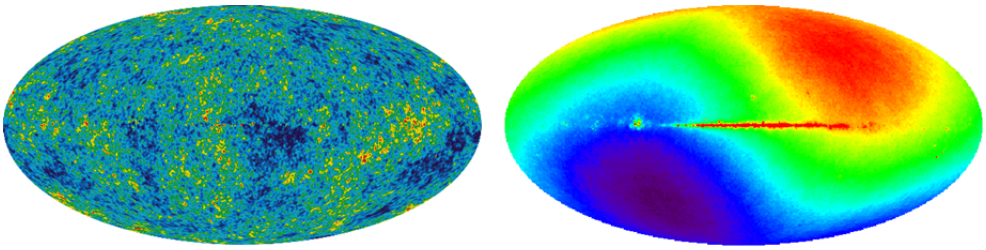


Рис. 1. Карта анизотропии реликтового излучения без дипольной составляющей и радиоисточников (слева) и карта дипольной анизотропии реликтового излучения (справа) (по данным спутника WMAP [3, 4])

Стабильность, непрерывность и неповторимость распределения реликтового излучения по небесной сфере позволяет построить перспективные системы навигации и ориентации с привязкой к любой удобной области небесной сферы, так как не требуется сканирование небесной сферы в широком диапазоне углов, нет ограничений, накладываемыми мощными астрономическими источниками электромагнитного излучения (Солнце, Луна) и характером движения летательного аппарата и возмущениями окружающей среды (аэродинамический нагрев, турбулентность и пр.).

Системы навигации и ориентации можно строить на базе карт, как дипольной, так и мультипольной анизотропии реликтового излучения. Достижимая точность определения угловых координат и скорости движения будут определяться флуктуационной чувствительностью средства измерения радиационной температуры реликтового излучения. Так, при флуктуационной чувствительности порядка 1 μK, точность определения угловых координат будет составлять менее 1 угл. мин (рис. 2, слева), а точность определения скорости движения не менее 100 м/с (рис. 2, справа).

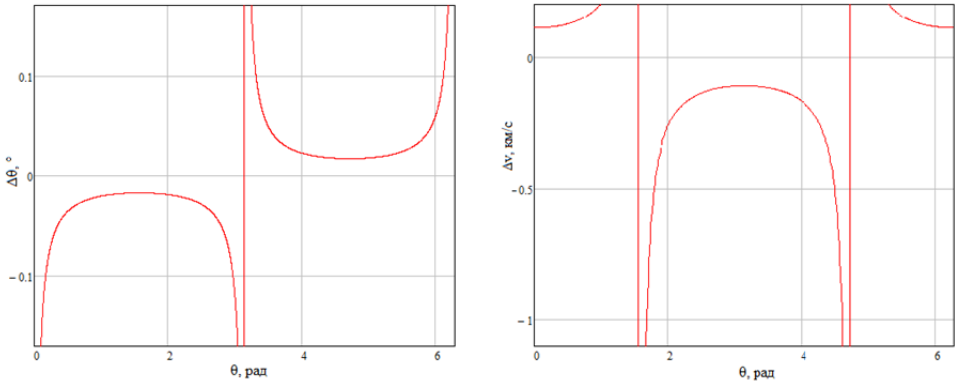


Рис. 2. Оценка точности определения угловых координат и скорости по дипольной составляющей радиационной температуры реликтового излучения при отклонении на угол θ от направления диполя

Для проведения экспериментальных исследований был разработан и изготовлен экспериментальный макет радиометра реликтового излучения (рис. 3).

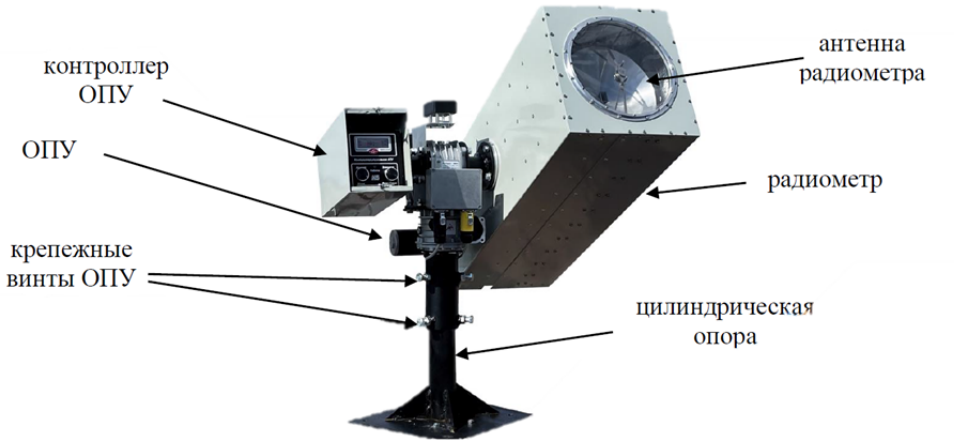


Рис. 3. Экспериментальный макет радиометра реликтового излучения

Радиометр имеет рабочую полосу частот 75…110 ГГц, флуктуационную температурную чувствительность < 1 мК при времени накопления 60 с, ширину диаграммы направленности < 1,2°. Радиометр позволяет производить измерения во всем диапазоне изменения азимутальных углов и углов места.

Флуктуационная температурная чувствительность радиометра достаточна для уверенного определения дипольной анизотропии реликтового излучения. На рис. 4 изображены траектория сканирования температуры реликтового излучения в Галактической системе координат и ожидаемое отклонение температуры реликтового излучения от ее среднего значения при сканировании по указанной траектории.

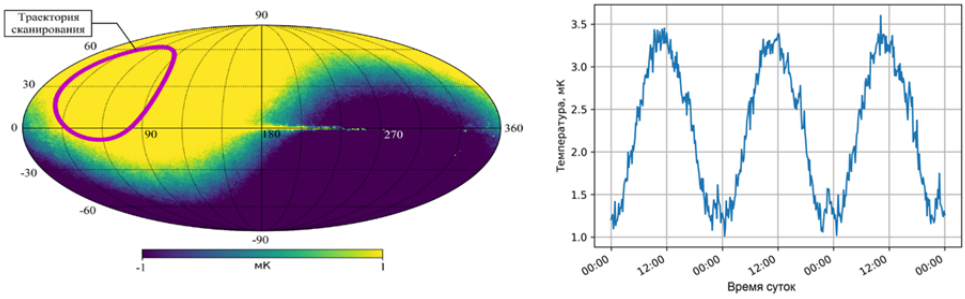


Рис. 4. Траектория сканирования за счет движения Земли при неподвижном радиометре в галактической системе координат (слева) и ожидаемое отклонение температуры реликтового излучения от ее среднего значения (справа)

Приведенные расчетные результаты показывают потенциальную возможность применение такого радиометра в системах навигации и ориентации. Однако проведенные экспериментальные измерения с поверхности Земли показали, что измеренное значение радиационной температуры на несколько порядков превышает ожидаемые флуктуации температуры реликтового излучения, которые потенциально может изме-

рить радиометр. При измерении с поверхности Земли очень большой вклад в измеренную радиационную температуру вносят атмосферные и техногенные тепловые шумы. В связи с этим для проведения адекватных экспериментальных измерений необходимо размещение радиометра на высокогорных площадках или на высотных летательных аппаратах.

Литература

[1] Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д. Реликтовое излучение Вселенной. Москва, Наука, 2003, 390 с.

[2] Challinor A. Anisotropies in the cosmic microwave background. arXiv, 2004, arXiv:astro-ph/0403344. 2004. DOI: https://doi.org/10.48550/ARXIV.ASTRO-PH/0403344

[3] Bennett C.L. et al. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: final maps and results. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2013, vol. 208, no. 2. DOI: https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20

[4] Hinshaw G.F. et al. Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2013, vol. 208, no. 2. DOI: https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/19

УДК 629.78.064.52

К вопросу о предельной удельной электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода для системы преобразования тока энергодвигательной установки

Онуфриева Евгения Валерьевна evgeni.bmstu@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Онуфриев Валерий Валентинович Onufryev@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Основной проблемой разработки высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода (ВПТД) является определение его рабочего напряжения (или напряжения обратного дугового пробоя в запертом состоянии), которое в совокупности с плотностью тока в проводящем состоянии характеризует удельную электрическую мощность и является его важным проектным параметром. На основе численного и аналитического исследования определены предельные величины удельной электрической мощности ВПТД.

Ключевые слова: *высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод, напряжение обратного дугового пробоя, давление рабочего тела, плотность тока, работа выхода, удельная электрическая мощность*

В системах преобразования тока космических энергодвигательных установок с термоэмиссионным реактором-преобразователем (ТРП) в качестве перспективных рассматриваются термоэмиссионные вентили плазменной электроэнергетики — сеточные ключевые элементы (СКЭ) и ВПТД, работающие на цезиевом, бариевом наполнении или их смеси [1, 2]. Актуальным является изучение удельной электрической мощности ВПТД с целью минимизации его массы при рабочих температурах.

В основе новой энергетической модели был рассмотрен режим токопереноса ионами с учетом энергообмена с атомами в катодной части плотного (аномального) тлеющего разряда – ионном слое, на основании чего было получено уравнение энергии для тяжелой компоненты (атомов) в катодном слое, выраженное через напряженность электрического поля $E(x)$, температуру атомов $T_a(x)$:

$$\frac{e}{n_a}\left(\frac{n_i}{Q_{ia}}+\frac{n_e}{Q_{ea}}\right)\frac{dE(x)}{dx}+kn_a\frac{dT_a(x)}{dx}\cong-\varepsilon_0E(x)\frac{dE(x)}{dx}, \qquad (1)$$

где m_a — масса атома цезия; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; ε_0— диэлектрическая постоянная; n_a, n_i, n_e — концентрация атомов, ионов и электронов соответственно в ионном слое у отрицательного электрода; Q_{ia} — сечение перезарядки; Q_{ea} — сечение столкновений электрон — атом.

В отличие от существующих представлений о формировании области возбужденных атомов в катодном слое тлеющих разрядов разработанная модель токо- и энергопереноса указывает на иной механизм возбуждения атомов пара, а именно — за счет перезарядки ионов на атомах в сильных полях и упругого рассеяния «быстрых» ато-

мов. Нагрев атомов обусловлен перезарядкой и упругим рассеянием «быстрых» атомов в области сильных полей [3]:

$$\frac{dT_a(x)}{dx} \cong \frac{2}{5} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\chi_a} \cdot \left(\frac{2^{1/2} \cdot e}{m_a \cdot n_a \cdot \Omega_{ia}}\right)^{1/2} \cdot \left[E^{5/2}(x) - E^{5/2}(0)\right], \quad (2)$$

χ_a — теплопроводность атомов пара; m_a — масса атома цезия.

Решение системы уравнений (1) и (2) получено в программном комплексе MATLAB Simulink [3] с применением операционного метода: это точное решение задачи, которое отражает физические процессы в катодном слое в режиме обратного тока ВПТД.

В [4] авторами на основе предложенной новой модели энергообмена и токопереноса в ионном слое тлеющего разряда (режим обратного тока ВПТД) была получена новая аналитическая зависимость для расчета напряжения зажигания обратного самостоятельного дугового разряда — обратного дугового пробоя, показывающего предельную вентильную способность диода:

$$U_{\text{п}} = \left(\left(T_{a\ кр} - T_{a0}\right)\frac{m_a \chi_{ar}^2}{ek\varepsilon_0 n_a}\right)^{1/3}, \quad (3)$$

где χ_{ar} — «реактивная» теплопроводность; $T_{a\ \text{кр}}$ — критическая температура пара в области возбужденных атомов в момент обратного дугового пробоя, T_{a0} — температура пара цезия в зазоре ВПТД. В выражении (3) неизвестными величинами являются «реактивная» теплопроводность и критическая температура атомов пара в момент пробоя. Расчет величины критической температуры атомов выполнен из условия теплового баланса области возбужденных атомов ионного слоя. Исходя из результатов экспериментальных исследований режима обратного тока в ВПТД [5], установлено, что величина теплового потока в предпробойном состоянии, связанная с джоулевыми потерями разряда и выносимого из слоя возбужденными атомами, составляет q = 1…2 Вт/см^2. Величина реактивной теплопроводности рассчитана по [6].

В результате получено выражение для расчета напряжения обратного дугового пробоя в виде:

$$U_{\text{п}} = \left(\left\{A\frac{q^{2/3}}{n_a^{2/3}} - T_{a0}\right\}\frac{B}{n_a}\left[C\sqrt{A\frac{q^{2/3}}{n_a^{2/3}}}\frac{1}{\left(a\ln\left(A\frac{q^{2/3}}{n_a^{2/3}}\right)+b\right)\cdot c}\right]^2\right)^{1/3}, \quad (4)$$

где A, B, C, a, b, c — константы.

Так как напряжение обратного дугового пробоя является функцией давления пара, для обеспечения максимальной (оптимальной) удельной электрической мощности диода необходимо реализовать максимальную величину плотности термоэмиссионного тока с катода (для рабочего давления пара цезия) в проводящем состоянии Это реализуется оптимизацией температуры катода («перемещением» температуры катода T_K в точку максимальной плотности термоэмиссионного тока на кривой постоянного давления пара в МЭЗ — *S*-образной кривой). По зависимости Ричардсона — Дешмана определяется плотность термоэмиссионного тока с катода диода в проводя-

щем состоянии — j_p. Определяется удельная электрическая мощность диода (на единицу поверхности электрода):

$$P_{эл.уд} = j_p U_{проб}(p_{Cs}). \quad (5)$$

Отметим, что технически пригодной можно считать плотность тока в проводящем состоянии не менее 1 А/см^2, (это обеспечивается при температурах катода 2500 К и более). Как показало исследование: недостатком ВПТД с цезиевым наполнением является невысокая плотность вследствие малых значений давления пара цезия (10^{-3}...10^{-2} Торр), поэтому удельная электрическая мощность не превышает 1...3 кВт/см^2.

Для увеличения $P_{эл.уд}$ целесообразно использовать бинарное наполнение (цезий и барий), что позволяет разделить оптимизацию на две независимые части: давление цезия p_{Cs} и температура анода T_A определяют пробойное (а следовательно, рабочее) напряжение, а давление бария p_{Ba} и температура катода T_K определяют плотность тока в проводящем состоянии. Отметим, что плотность термоэмиссионного тока в парах бария на один-два порядка превышает аналогичную в парах цезия. Величина работы выхода в парах бария может быть получена на уровне 2,5...3,2 эВ, при этом плотность термоэмиссионного тока с катода составит 10...30 А/см^2, что существенно превышает аналогичный показатель диода с цезиевым наполнением. Значение T_A может составлять 900...1000 К при давлении бария 10^{-4}...10^{-3} Торр (0,01...0,10 Па). Экспериментальные исследования [7] показали, что удельная электрическая мощность диода с бариевым наполнением может достигать 30...80 кВт/см^2 при рабочей температуре анода до 940 К (напряжение обратного дугового пробоя 2200...2500 В).

Литература

[1] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / под ред. Б.Я. Мойжеса и Г.Е. Пикуса. Москва, Наука, 1973, 480 с.

[2] Онуфриева Е.В., Алиев И.Н., Онуфриев В.В., Синявский В.В. Энергетические характеристики высокотемпературных плазменных вентилей систем преобразования тока космических энергодвигательных установок. Известия Российской академии наук. Энергетика, 2016, № 3, с. 127–140.

[3] Дьяконов В.П. «MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6» в математике и моделировании. Москва, СОЛОН-Пресс, 2005, 576 с.

[4] Онуфриева Е.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б., Онуфриев В.В. О расчете напряжения зажигания обратного дугового разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде. Известия Российской академии наук. Энергетика, 2018, № 4, с. 108–115.

[5] Onufriev V.V., Grishin S.D. Experimental investigation of electric strength to inverse arc breakdown of a thermionic diode with cesium filling // High Temperature. 1996. V. 34. N 3. PP. 477-480.

[6] Davies R.H., Mason E.A., Munn R.J. High-Temperature Transport Properties of Alkali Metal Vapors. The Physics of Fluids, 1965, vol. 5, no. 3, pp. 444–452.

[7] Онуфриев В.В., Лошкарев А.И. Зажигание обратного дугового разряда в бариевом термоэмиссионном диоде. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки, 2005, № 1, с. 72.

УДК 004

Фрактальные информационные технологии: современное состояние и перспективы развития

Потапов Александр Алексеевич potapov@cplire.ru
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Рассмотрены основные направления внедрения понятий текстур, фракталов, дробных операторов, динамического хаоса и методов нелинейной динамики для создания новых информационных технологий. Кратко обозначим их как фрактальные информационные технологии. Исследования проводятся в фундаментальном научном направлении «Фрактальная радиофизика и фрактальная радиоэлектроника: проектирование фрактальных радиосистем», инициированного и разрабатываемого автором в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН с 1979 г. по настоящее время. Актуальность проведения данных исследований связана с необходимостью более точного описания всех реальных процессов, происходящих в радиофизических и радиотехнических системах: учет эредитарности (памяти), негауссовости и скейлинга физических сигналов и полей. Основной упор в докладе сделан на демонстрации новых результатов, полученных в период 2020–2022 гг.

Ключевые слова: *фрактал, скейлинг, текстура, негауссовы процессы, обнаружение и распознавание объектов, метаповерхности, фрактальный инжиниринг*

В настоящее время в радиофизике, радиоэлектронике и обработке сигналов преимущественно, привычно и повсеместно используются целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссова статистика, марковские процессы и т. п. Введение в научный обиход радиоэлектроники вышеупомянутых понятий текстур, фракталов, дробных операторов, динамического хаоса и методов нелинейной динамики позволило автору впервые в мире предложить, а затем и применить новые размерностные и топологические (а не энергетические!) признаки или инварианты, которые объединены под обобщенным понятием «топология выборки» ~ «фрактальная сигнатура». Поэтому применение идей масштабной инвариантности – «скейлинга» совместно с теорией множеств, теорией дробной размерности, дробным исчислением, общей топологией, геометрической теорией меры и теорией динамических систем открывают большие потенциальные возможности и новые перспективы в обработке многомерных сигналов и в родственных научных и технических областях. Например, актуальная задача обнаружения малоконтрастных объектов на фоне интенсивных помех неизбежно требует, чтобы предложить, а затем и вычислить некоторую принципиально новую характеристику, которая отличается от функционалов, связанных с энергией помех и сигнала, а определяется исключительно топологией и размерностью принятой смеси сигнала с помехами и шумами. При этом физики включили в свой арсенал новый математический аппарат, а математики обогатились новыми эвристическими соображениями и совместными постановками задач [1–10].

Фрактальная геометрия — громадная и гениальная заслуга Б. Мандельброта (1924–2010 гг.). Но ее радиофизическое / радиотехническое и практическое воплоще-

ние, это исключительная заслуга известной в мире Российской научной школы фрактальных методов под руководством проф. А.А. Потапова (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН). Большое значение среди мирового сообщества ученых, занимающихся динамическим хаосом и фракталами, имел тот факт, что разработанная автором классификация фракталов (рис. 1) была в декабре 2005 г. лично одобрена Б. Мандельбротом.

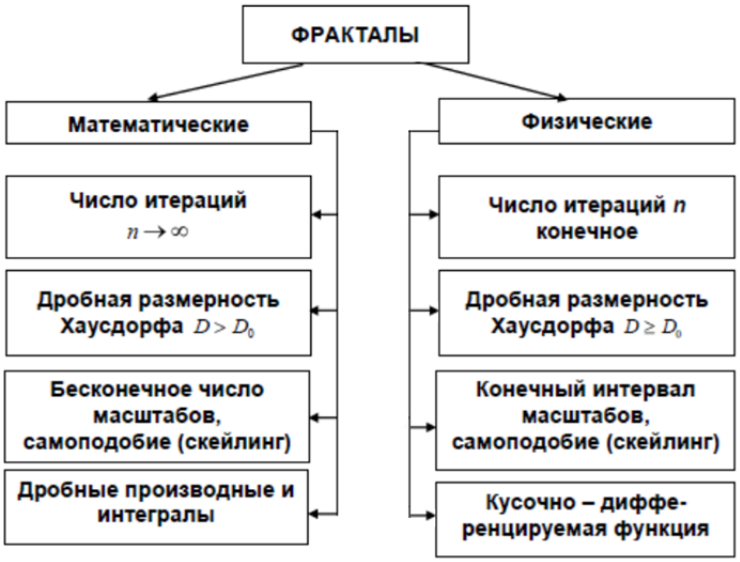


Рис. 1. Авторская классификация фрактальных множеств и сигнатур, одобренная и принятая Б. Мандельбротом в 2005 г.

На рис. 2 приведена полная структура авторских исследований в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН топологических текстурных и фрактальных методов обработки малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов (ТТФО) в интенсивных негауссовых помехах. Там специально выделена область исследований (1980–1985), связанная с переходом в экспериментах и теории от гауссовых статистик к устойчивым негауссовым степенным законам (с тяжелыми хвостами) и моделированием реальных сигналов, шумов и помех фрактальным или обобщенным броуновским движением, определяемым фрактальной размерностью D (фрактальной сигнатурой $D(t, f, r)$) и показателем Херста H.

Несколько утрируя, можно сказать, что фракталы составляли тонкую амальгаму на мощном остове науки конца XX века. В современной ситуации интеллектуальное фиаско потерпели попытки принизить их значение и опираться только на классические знания.

Фрактально-скейлинговые методы обработки сигналов, волновых полей и изображений в широком смысле основаны на той части информации, которая при классических методах обработки безвозвратно терялась. Иначе говоря, классические методы обработки сигналов выделяют только ту составляющую информации, которая связана с целочисленной мерой.

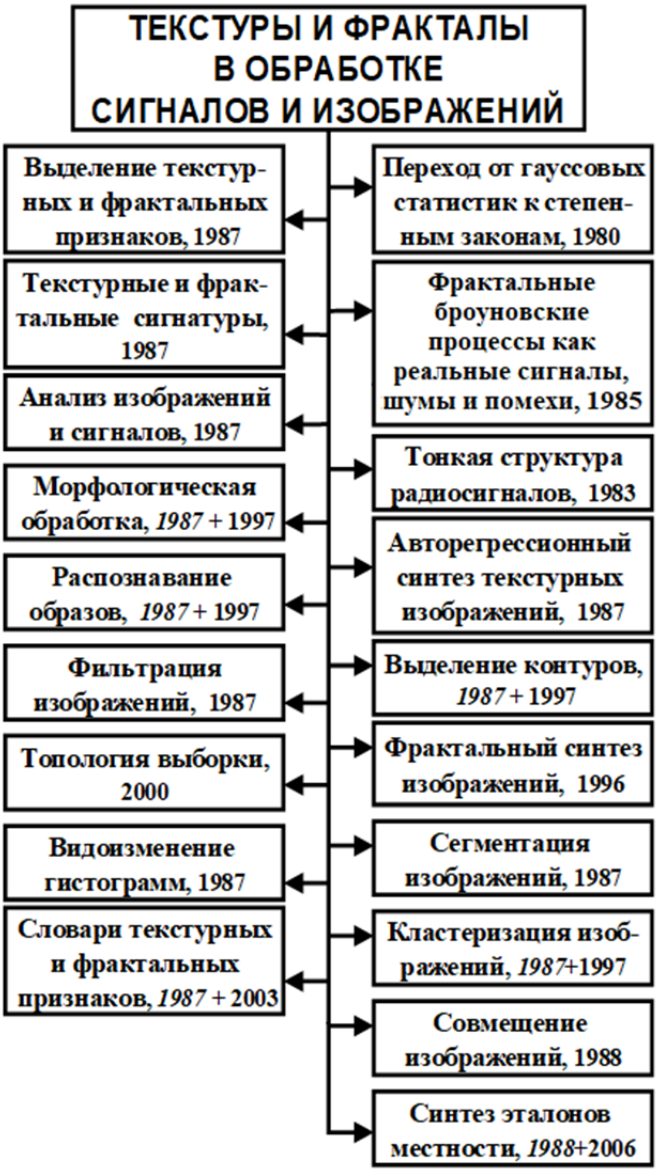


Рис. 2. Текстурные и фрактальные меры для малоконтрастных изображений и сверхслабых сигналов в интенсивных негауссовых шумах и помехах

За более чем 40 лет научных исследований созданный автором [1, 2, 8, 9] глобальный фрактально-скейлинговый метод полностью оправдал себя, найдя многочисленные приложения — рис. 3 и 4. Это своего рода вызов времени. Здесь говорят только факты! Все это обозначено автором как фрактальная парадигма. Более развернутые сведения — в библиографии работ автора [1].

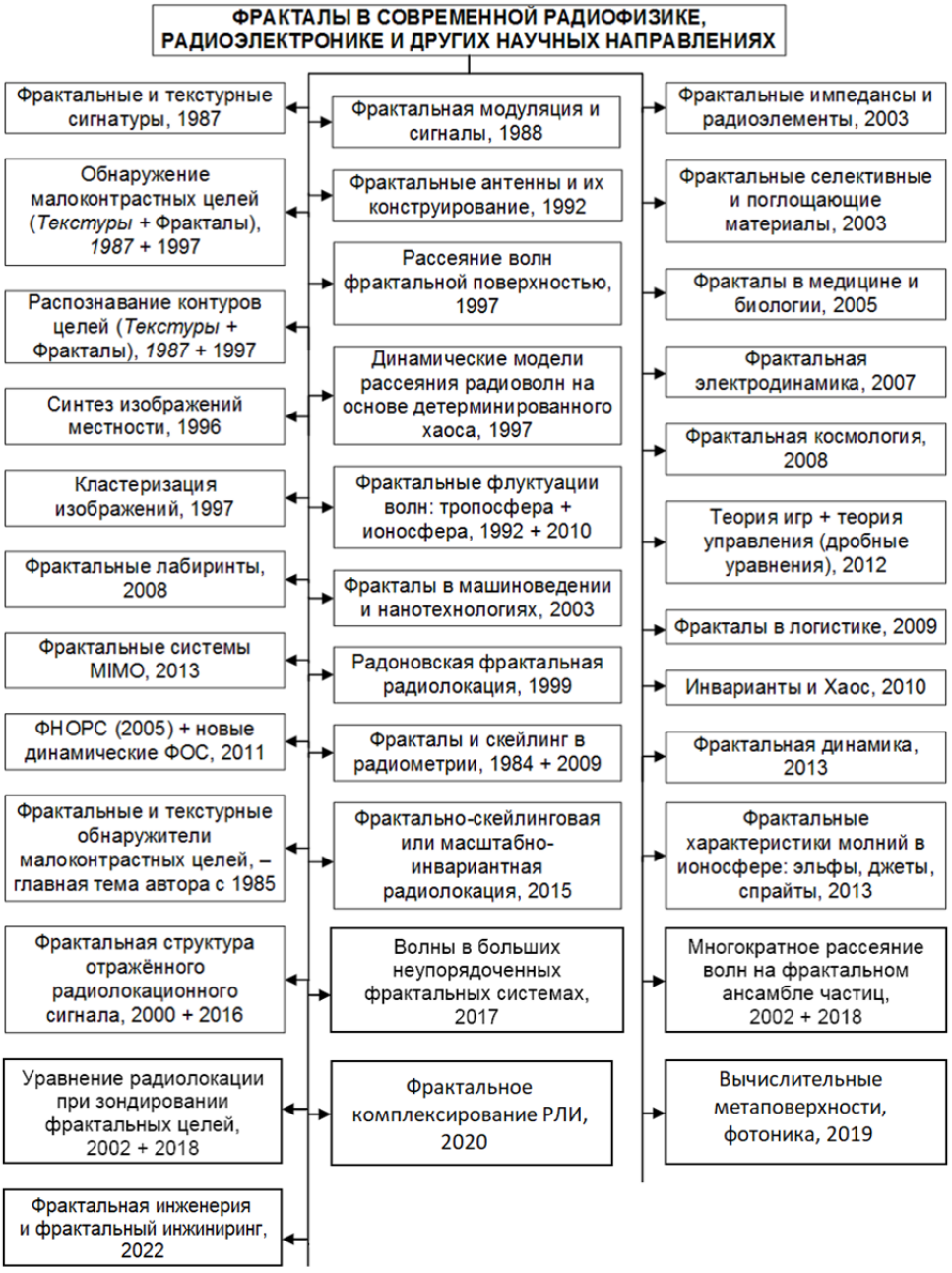


Рис. 3. Эскиз развития автором прорывных технологий на основе фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов для нелинейной физики и радиоэлектроники:

ФНОРС — фрактальный непараметрический обнаружитель радиолокационных сигналов; ФОС — фрактальный обнаружитель сигналов



Рис. 4. Авторская концепция фрактальных радиосистем, датчиков, устройств и радиоэлементов

Коренное отличие предложенных автором методов ТТФО от классических связано с принципиально иным подходом к основным составляющим сигнала и поля. Это позволило перейти на новый уровень информационной структуры реальных немарковских сигналов и полей. Таким образом, это принципиально новая радиотехника и с другим инжинирингом [9].

Для дальнейшей конкретизации проблем обнаружения многомерных сигналов, считаем, что первичная информация поступает от различных современных радиосистем в виде одномерного сигнала и/или радиолокационного изображения (РЛИ) — рис. 5.



Рис. 5. Радиосистемы исходной первичной информации (включены фрактальный радиолокатор и фрактальный MIMO-радар):

РСА — радиолокатор с синтезированной апертурой; БПЛА — беспилотный летательный аппарат

Все существующие на данный момент методы и признаки обнаружения малозаметных объектов на фоне интенсивных отражений от моря, земли и метеорологических образований компактно представлены далее на рис. 6 [1, 2, 8, 9].

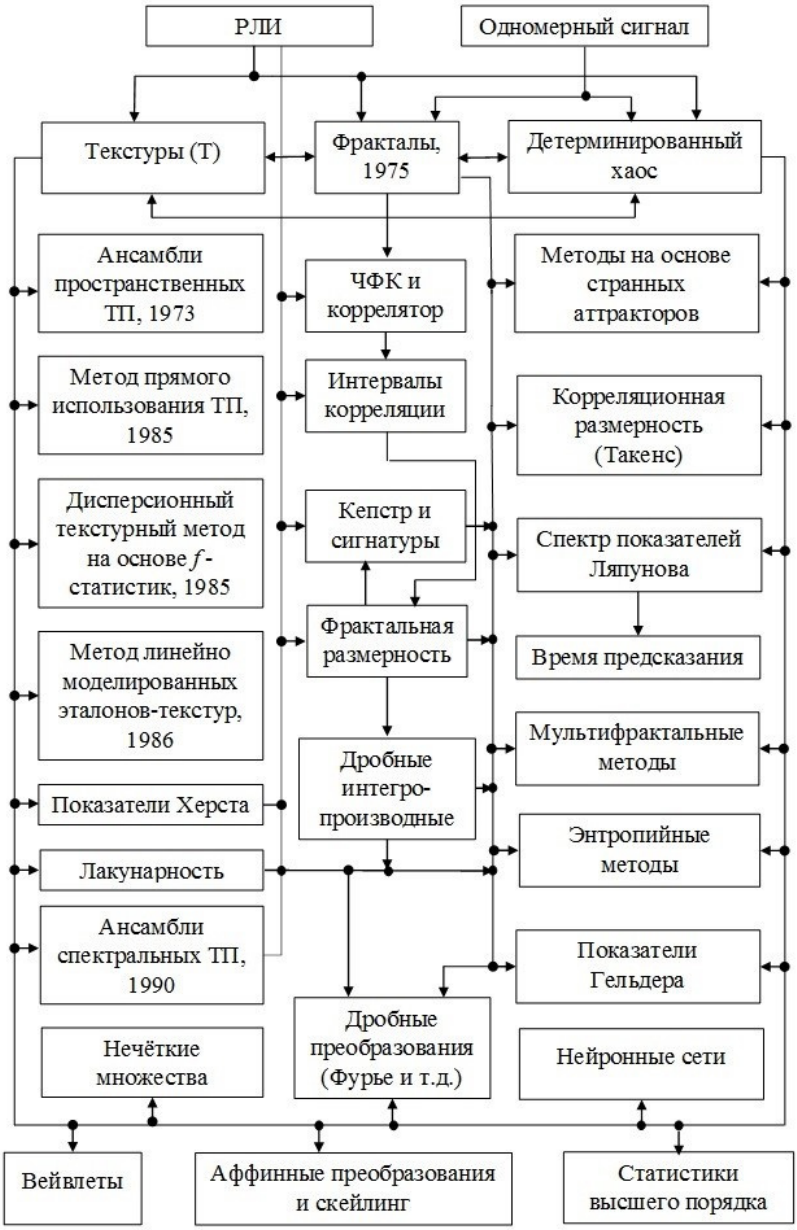


Рис. 6. Новые топологические признаки и методы обнаружения малоконтрастных (малозаметных) объектов на фоне интенсивных шумов и помех:

ТП — текстурные признаки; ЧФК — частотная функция когерентности

Далее кратко представим избранные результаты (рис. 7 и 8) в области фотоники и вычислительных метаповерхностей (МП), которые были получены автором с китайскими учеными в совместной лаборатории информационных технологий и фрактальной обработки сигналов в Китае за период 2019–2021 гг. (см., например, [8–10]). В [10] предложена МП Лапласа, которая может выполнять почти идеально операцию Лапласа для разных конфигураций падающего светового поля. Предлагаемая МП Лапласа основана на возбуждении связанного состояния в континууме и демонстрирует экзотические оптические свойства — рис. 8.

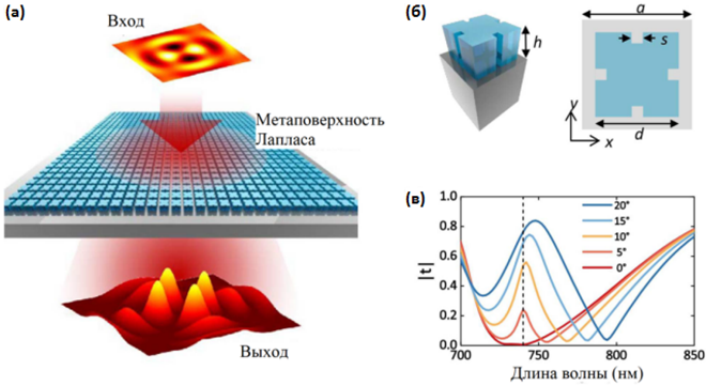


Рис. 7. Диэлектрическая МП, преобразующая входную двумерную пространственную функцию в другую функцию как оператор Лапласа (*а*); элементарная ячейка диэлектрической МП (*б*); слева — трехмерный вид элементарной ячейки; спектры коэффициента пропускания МП Лапласа при различных углах падения вдоль направления x для p-волны (*в*)

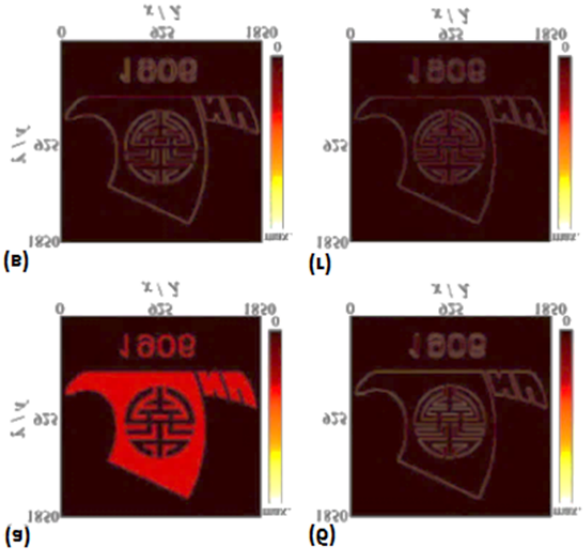


Рис. 8. Изображение логотипа университета Цзинань (*а*); выходное изображение x поляризации (*б*); выходное изображение для случая y поляризации (*в*); выходное изображение для случая неполяризованного света (*г*)

Одно из применений операции Лапласа — обнаружение краев проблемных целей на изображении. Мы рассмотрим его с помощью входных изображений, которые показаны на рис. 9.

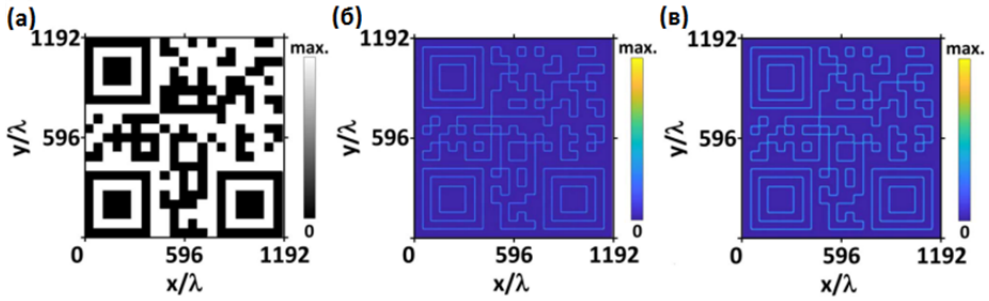


Рис. 9. Входное изображение, состоящее из QR-кода (а); выходное изображение идеальной операции Лапласа (б); выход из МП Лапласа (в). Все изображения представляют собой профиль силы света; размеры пикселей установлены как 2,88λ

Глобальный фрактальный метод создан автором и многосторонне продемонстрирован в [1–9] и непосредственно здесь. В результате в научном мире образовано новое смысловое пространство с его необычными для классической радиофизики, радиотехники и радиолокации свойствами и задачами. Полученные научные результаты являются исходным материалом для дальнейшего развития и практического применения фрактальных методов в современных областях радиофизики, радиотехники, радиолокации, электроники и информационно-управляющих систем. Работами автора за более чем 40 лет, практически с «нуля», преодолевая трудности идущих первыми, заложены фундаментальные основы того, что будет применено в будущем. Не результаты, не конкретные решения представляют самую большую ценность, а именно метод решения, подход к нему. Топологическое обнаружение открывает двери в совершенно новую область теории статистических решений и позволяет скорректировать бытующие в этой области представления и создать новые, что имеет важное теоретическое и практическое значение. Внедрение фракталов, эффектов скейлинга и дробных операторов дает «импульс» и всей современной радиоэлектронике, так как вся предыдущая и настоящая радиоэлектроника базируется исключительно (и только!) на основе теории целочисленных функций. Таким образом, это принципиально новая радиотехника.

В заключение следует отметить, что проблема «топологии выборки» [1–9] — одна из важнейших во всей радиоэлектронике, и при этом автор убежден, что без учета фрактальности и скейлинга вся классическая теория обнаружения и распознавания многомерных сигналов в будущем потеряет свое каузальное значение для фундаментальных понятий сигнала и шума.

По монографиям автора поставлены курсы лекций по фракталам в различных университетах России и стран ближнего зарубежья, а также, в Китае. На 2022 год результаты фундаментальных исследований автора отражены в более чем 1200 работах и 45 книгах и главах на русском, английском и китайском языках [1], сделаны доклады в 23 странах.

Литература

[1] Потапов А.А. Фракталы в действии: биобиблиографический указатель / Гуляева Е.В. (ред.). Москва, ЦПУ «Радуга», 2019, 256 с.

[2] Potapov A.A., Wu Hao, Xiong Shan. Fractality of Wave Fields and Processes in Radar and Control. Guangzhou, South China University of Technology Press, 2020, 280 p.

[3] Потапов А.А., Кузнецов В.А., Потоцкий А.Н. Новый класс топологических текстурно-мультифрактальных признаков и их применение для обработки радиолокационных и оптических малоконтрастных изображений. Радиотехника и электроника. 2021, т. 66, № 5, с. 457–467. DOI: https://oi.org/10.31857/S0033849421050107

[4] Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Мультифрактальное комплексирование многодиапазонных радиолокационных изображений. Тез. докл. Междунар. конф. «XXII Харитоновские тематические научные чтения. Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект» (Саров, 24–27 мая 2021 г.). Саров, Изд-во ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2021, с. 108–109.

[5] Кузнецов В.А., Потапов А.А., Аликулов Е.А. Способ фрактального комплексирования многочастотных радиолокационных изображений. Патент RU 2746038 C1 G06T 5/50 (2020.09). опубл. 2021.04.06, бюл. № 10.

[6] Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Анализ способов комплексирования изображений, формируемых многодиапазонными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой. Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2021, т. 24, № 3, с. 6–21. DOI: https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-6-21

[7] Потапов А.А., Кузнецов В.А., Аликулов Е.А. Структурно-параметрический синтез систем оптимальной текстурно-фрактальной обработки многомерных радиолокацион-ных изображений. Радиотехника и электроника, 2022, т. 67, № 1, с. 51–67. DOI: https://doi.org/10.31857/S0033849422010077

[8] Потапов А.А. Фрактальные приложения в радиоэлектронике как фрактальная инженерия. РЭНСИТ, 2022, т. 14, № 3, с. 215–232.

[9] Потапов А.А. Топологическая текстурно-фрактальная обработка сигналов и полей в радиофизике, радиотехнике и радиолокации: созданные методы и технологии (1979–2022 гг.) — фрактальная инженерия. GraphiCon 2022: Труды 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Рязань, 19–22 сентября 2022 г., РГРТУ им. В.Ф. Уткина). Москва, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2022, с. 745–759.

[10] Lei W., Danping P., Shuaifeng Y., Wei Zh., Potapov A.A., Xia W., Weiping L., Tianhua F., Zhaohui L. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces. Optics Letters, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 2070–2073. DOI: https://doi.org/10.1364/OL.386986

УДК 621.642

Расчет на прочность баллона высокого давления с металлическим лейнером

Рахимов Даниэль Рустамович danrus1996@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зимин Владимир Николаевич zimin@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кувыркин Георгий Николаевич kuvyrkin@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Работа содержит результаты расчета на прочность металлокомпозитного баллона высокого давления. Расчет выполнен в программном комплексе MSC PATRAN/NASTRAN в нелинейной решателе SOL400 с учетом физической нелинейности изотропного материала. По результатам расчета предложены рекомендации по улучшению конструкции баллона давления. Проведена оценка влияния нелинейного поведения силовой оболочки из углепластика на общее напряженно-деформированное состояние баллона.

Ключевые слова: *металлокомпозитный баллон высокого давления, металлический лейнер, композитные материалы, прочность, нелинейное деформирование, пластичность, напряженно-деформированное состояние*

Введение

В настоящее время в мире широко применяют современные металлокомпозитные баллоны высокого давления (МКБВД), обладающие уникальными характеристиками по сравнению с металлическими баллонами давления [1, 2]. Экспериментальные исследования таких баллонов свидетельствуют о нелинейном деформировании конструкции [3], которое необходимо учитывать в рамках этапа проектирования для обеспечения надежности и безопасности в эксплуатации баллонов.

В данной работе представлены результаты расчета на прочность спроектированного МКБВД, состоящего из 18-зонной углепластиковой силовой оболочки, намотанной на лейнер из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Расчет был выполнен в программном комплексе MSC PATRAN/NASTRAN с учетом физической нелинейности изотропного материала.

Описание конечно-элементной модели

МКБВД имеет две плоскости симметрии, поэтому рассмотрим ¼ части баллона. Общий вид конечно-элементной (КЭ) модели представлен на рис. 1. Для моделирования КЭ-модели используем следующие допущения.

10. Силовую оболочку баллона моделируем оболочечными конечными элементами, передний и задний фланец объемными элементами. Резиновую прокладку не учитываем.
11. Свойства 2D-элементов задаем как композитный пакет с шагом 0,5 мм вдоль радиуса баллона. Для формирования структуры пакета в направлении внешней

нормали от профиля меридиана баллона вводим OFFSET, равный половине толщины пакета.

12. Металлический лейнер задаем как первый слой композитного пакета, в качестве нелинейной модели материала используем NonLinear Elastic.

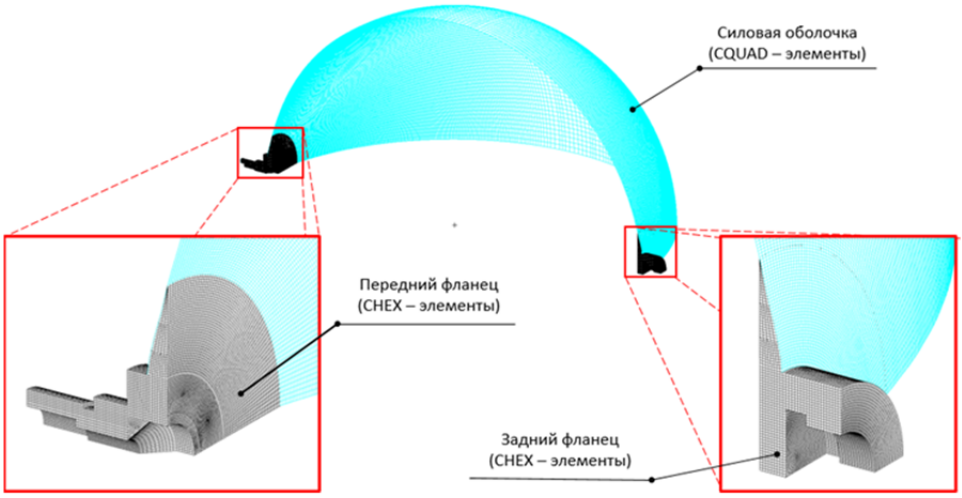


Рис. 1. Общий вид КЭ-модели МКБВД

Для закрепления КЭ-модели используем условия симметрии баллона и фиксацию узла фланца вдоль оси баллона. Нагрузку задаем в виде расчетного давления, приложенного к внутренней поверхности баллона.

Для валидации принятых допущений был проведен расчет цилиндрической части МКБВД из работы [3]. Результаты удовлетворительным образом согласуются с экспериментальными данными.

Результаты расчета и их анализ

Поверочный расчет на прочность проведен в программном комплексе MSC PATRAN/NASTRAN. Поскольку данный программный продукт позволяет учитывать физическую нелинейность только изотропного материала лейнера, необходимо дать оценку влияния нелинейных свойств ортотропного материала силовой оболочки. Для этих целей был проведен расчет напряженно-деформированного состояния в баллоне давления по безмоментной теории оболочек вращения с использованием эндохронной теории пластичности, учитывающей нелинейность как изотропного, так и ортотропного материала [4, 5]. Анализ полученных данных показал, что влияние нелинейности силовой оболочки из углепластика несущественно и допускается ее не учитывать.

На рис. 2 приведены результаты расчета максимальных напряжений вдоль волокон σ_{11} для некоторых зон силовой оболочки баллона давления. На приведенном рисунке видно, что напряжения, возникающие в силовой оболочке, приводят к обширному разрушению волокон. В связи с этим было принято решение добавить дополнительные двойные спиральные слои толщиной 0,3 мм в 1, 3 и 6-ю зону. Данное улучшение позволило снизить напряжения σ_{11} до допустимых значений, за исключением области фланцевого соединения для 1-й и 2-й зоны, в которой происходит резкое уве-

личение напряжений, связанное со скачкообразным изменением толщины, а также краевым эффектом. В реальной конструкции изменение толщины силовой оболочки имеет более плавный характер, что способствует снижению напряжений. Для уменьшения концентрации напряжений, связанной с краевым эффектом, в область фланцевого соединения необходимо добавить адгезионный слой из резины [6]. Из вышесказанного следует, что при нагружении МКБВД расчетным давлением волокна силовой оболочки не разрушаются.

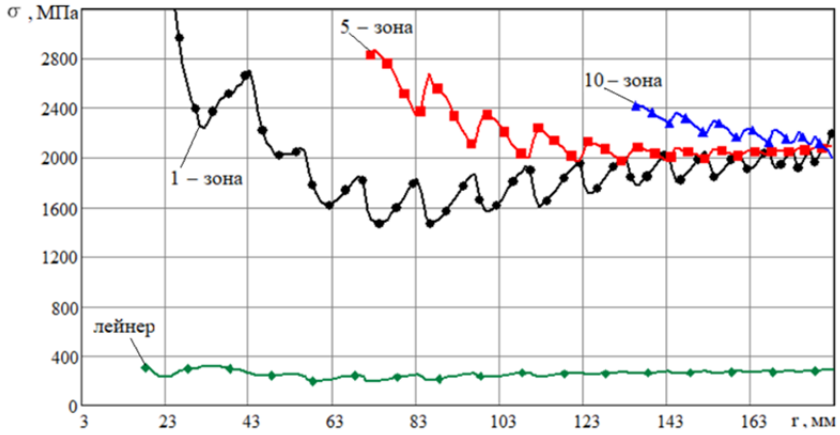


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в лейнере и максимальные напряжения вдоль волокон для 1, 5 и 10-й зоны силовой оболочки

С учетом предложенных улучшений касательные напряжения σ_{12} в силовой оболочке не превышают предела прочности при сдвиге, поэтому они не приведены в данной работе. Результаты расчета напряжений поперек укладки волокон σ_{22} представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что матрица силовой оболочки полностью разрушается, после чего всю нагрузку воспринимают волокна. Аналогичное поведение наблюдается и в реальной конструкции.

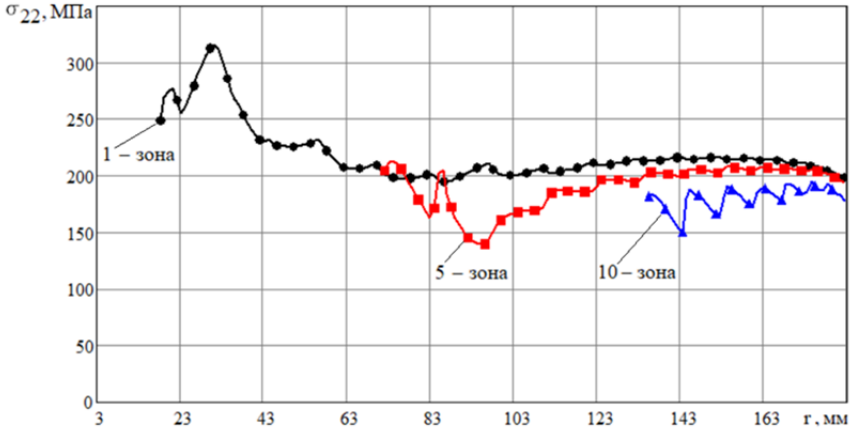


Рис. 3. Максимальные напряжения поперек укладки волокон для 1, 5 и 10-й зоны силовой оболочки после добавления дополнительных слоев

Заключение

В данной работе был проведен расчет на прочность металлокомпозитного баллона высокого давления в программном комплексе MSC PATRAN/NASTRAN с использованием нелинейного решателя SOL400, позволяющем учитывать нелинейные свойства изотропного материала в составе композитного пакета. Анализ полученных данных показал, что необходимо добавить дополнительные двойные спиральные слои в некоторые зоны баллона, а также адгезионный слой из резины в область фланцевого соединения.

Литература

[1] Васильев В.В., Мороз Н.Г. Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания. Москва, Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015, 373 с.

[2] Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. Москва, Машиностроение, 1977, 144 с.

[3] Vasiliev V.V. Composite pressure vessels — Design, analysis, and manufacturing. Blacksburg, Bull Ridge Publishing, 2009, 704 p.

[4] Valanis K.C. A theory of viscoplasticity without a yield surface. Archives of Mechanics, 1971. vol. 23, no. 4, pp. 517–551.

[5] Зиновьев П.А., Сарбаев Б.С. Эндохронная теория неупругого деформирования волокнистых композитов. Механика композитных материалов, 1985, № 3, с. 423–430.

[6] Сарбаев Б.С. Расчет силовой оболочки композитного баллона давления. Москва, Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001, 96 с.

УДК 62-529

Возможность изготовления наноспутника в единой цепочке технологических операций

Селиванов Алексей Борисович a_selivanov@list.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Турчанинов Сергей Олегович tso@inbox.ru
АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Рассматриваются новые методы и возможности организации производственного процесса выпуска наноспутника в единой цепочке технологических операций, использующих мультиматериальную и многокомпонентную печать: различные металлы, структурированные материалы, керамику и электронику — в едином технологическом цикле. Данное решение исключает многочисленные варианты поэлементной обработки, и последующей сборки, что дополнительно ускоряет и удешевляет технологию производства. Способ доставки материала в зону плавки, дозирование энергии нагрева и скорость теплоотвода из окрестности обрабатываемого элемента изделия создают возможность придавать материалу уникальные физико-механические и эксплуатационные характеристики; получать материалы с программируемыми свойствами.

Ключевые слова: *аддитивное производство, 3D-печать, автоматизация, роботизация, технологический цикл*

Уровень развития аддитивных технологий производства (АП) на сегодня позволяет создавать цепочки роботизированных технических комплексов, решающих задачу изготовления изделия, в едином непрерывном технологическом цикле. В данной работе рассмотрено применение АП к выпуску наноспутников в системе импульсного старта [1]. В процессе разгона в рельсотроне и движения в атмосфере, наноспутник испытывает экстремальные механические и температурные нагрузки.

Конструкция включает: корпус, теплозащиту, рабочий модуль, двигатели для доразгона и перехода на целевую орбиту. Материалы конструкции подбираются:

- с учетом требований баллистики, обеспечивая минимальное миделево сечение при данной массе, т.е., на основе тяжелых металлов;
- по акустической жесткости — для предотвращения расслоения в процессе разгона. Отражение ударных волн от границ раздела сред с разной акустической жесткостью создает растягивающие напряжения, которые приводят к локальным разрывам и трещинам.

Как вариант: материал корпуса на основе вольфрамового сплава, теплозащита — из пористой керамики, либо пенометалла; рабочий модуль — электронная схема в компаунде. Двигатель — пеноалюминий с пропиткой плюс сопло.

Конструкция наноспутника не допускает пустот, зазоров и резких переходов. Данное требование заставляет отказаться от традиционного технологического процесса сборки изделия из отдельных деталей. Современные аддитивные технологии позволяют создать единый производственный цикл выпуска наноспутника.

Составляющие технологической цепочки. Основные операции технологического процесса выполняет установка 3d-печати лазерным наплавлением порошка, доставляемого в проволоке или трубке в место наплавления (актуальный обзор АП — см., например, [2, 3]). Первая операция технологического процесса — снаряжение проволоки наполнителями, для каждой точки роста (пикселя) изделия — необходимого по составу. Таким образом программируется химический состав материала в зоне наплавки. Дозирование энергии нагрева лазерным лучом до необходимой температуры и скорость теплоотвода из окрестности обрабатываемого пикселя также программирует свойства материала в данной точке.

Рассмотрим технологическую цепочку по этапам.

I. Рабочий модуль. Технологическое оборудование для изготовления электронной схемы в компаунде обеспечивает:

1. Согласованную подачу проволоки с наполнителем;

2. Дозированный направленный подвод энергии к текущему пикселю;

3. Быстрый отвод излишков тепла от пикселя и его соседей осуществляется жидким азотом;

4. Вставку функциональных отдельных блоков в изделие — подвижных элементов и микросхем.

Дозирование энергии нагрева лазерного луча до заданной температуры, скоростью теплоотвода из окрестности обрабатываемого элемента для получения необходимой структуры — крупно- или мелкокристаллической, аморфной – создают возможность придавать материалу уникальные физико-механические и эксплуатационные характеристики; получать материалы с программируемыми свойствами.

II. Теплозащитная оболочка рабочего модуля изготовляется из пенометалла на основе тугоплавкого сплава или карбида титана, вольфрама. Пенометаллы получают двумя основными способами: литьем [4] и методом порошковой металлургии [5–7].

Представляет интерес идея [5] технологии получения пористого тугоплавкого материала, путем карботермического восстановления оксидов элементов в матрице пеноуглерода. Синтез карбидной фазы может происходить в готовом изделии.

В приложении этой технологии к рассматриваемому процессу, корпус изнутри покрывается реагентами и проходит термообработку, затем выращивается рабочий модуль; затем — двигатель.

III. Корпус. Изготовление деталей из тугоплавких металлов в традиционной технологии производится методами порошковой металлургии. Технологический процесс включает приготовление шихты, прессование, спекание в водороде, затем в вакууме, токарную обработку.

Использование лазера мощностью до 100 кВт обеспечит локальный кратковременный нагрев порошка вольфрама до температуры плавления.

IV. Твердотопливный или гибридный двигатель. Пеноалюминий возможно получать по технологии [6, 7]. Затем формируются другие элементы корпуса, и сопловой блок.

Таким образом, производственный процесс выпуска наноспутника требует наличия трех рабочих столов, использующих мультиматериальную и многокомпонентную печать: различные металлы, структурированные материалы, керамику и электронику — в едином технологическом цикле. Данное решение исключает многочисленные варианты поэлементной обработки, и последующей сборки, что дополнительно ускоряет и удешевляет технологию производства.

Литература

[1] Герасимов Ю.В., Каретников Г.К., Селиванов А.Б., Фионов А.С. Оценка относительной конечной массы наноспутника, доставляемой в околоземное пространство с помощью импульсных стартового и корректирующего устройств. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение, 2013, № 3 (92), с. 69–76.

[2] Трубашевский Д.С. Eppur si muove, или забудьте все, что вы знали о классической 3d-печати. Фотоника, 2022, т. 16, № 5, с. 358–369.

[3] Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Васильев Б.Е., Кинзбурский В.С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей. Технология легких сплавов, 2015, № 4, с. 7–13.

[4] Крушенко Г.Г. Технологии и механизм формирования пенометаллов и их применение в летательных аппаратах II. Вестник СибГАУ, 2014, № 1 (53), с. 154–161.

[5] Парфенова М.С. Пористые термостойкие материалы на основе синтактных пенопластов и оксида титана. Дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2013, 163 с.

[6] Буньков В.Н., Решетников Е.Ю., Глызин В.В., Ливанцов С.В. Способ получения вспененного металла. Патент RU2016113C1 Российская Федерация, 1994, опубл. 15.07.1994, бюл. № 46, 7 с.

[7] Абиев Р.Ш., Васильев М.П. Способ получения суспензии высокодисперсных частиц неорганических и органических материалов и аппарат для его осуществления. Патент RU2625980C1 Российская Федерация, 2017, опубл. 20.07.2017 Бюл. № 20, 17 с.

УДК 521.11: 531.311: 531.51

Не реактивная сила отталкивания в неоднородном гравитационном поле

Семиколенов Андрей Владимирович avsemik@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрена теоретическая возможность создания силы отталкивания в неоднородном гравитационном поле, то есть силы, направленной против силы гравитационного притяжения. Такая сила отличается от известной реактивной силы тем, что для ее создания не нужно отбрасывать от тела некоторую массу вещества. Возможность создания не реактивной силы отталкивания особенно актуальна для решения научно-технических вопросов, связанных с движением в космическом пространстве. Техническая реализация предложенного метода создания силы вполне осуществима на современном этапе развития технологий, в отличие от многих подобных теоретических предложений.

Ключевые слова: *сила отталкивания, гравитационное поле, не реактивная сила, движение в космическом пространстве*

На современном этапе развития науки и техники при движении в космическом пространстве в большинстве случаев применяются устройства, в основе действие которых лежит реактивная сила. Для ее создания от тела отбрасывается каким-то способом некоторая масса вещества с ненулевой относительной скоростью. Существенным недостатком подобных устройств является то, что необходимо отбрасывать массу вещества. То есть это вещество в каком-то виде должно быть заранее запасено в устройстве. Очевидно, когда запасы этого вещества ввиду их очевидной ограниченности закончатся, устройство перестанет создавать реактивную силу.

На сегодняшний день существуют теоретические исследования по созданию возможных устройств, принцип действия которых основан не на реактивной силе, а на искусственно создаваемой кривизне пространства времени-времени [1-6]. О практической реализации подобных устройств пока речь не идет.

Способ создания силы отталкивания, предлагаемый в данной работе, как представляется, может быть реализован уже на современном уровне развития технологий.

Для изложения метода создания силы отталкивания понадобится описание движения малого тела массойm вблизи массивного сферического тела массы M, $m<<M$. Уравнение траектории в плоскости движения согласно [7], в полярной системе координат, связанной с центром тела M, имеет вид

$$r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cdot cos(\varphi - \varphi_0)} \qquad (1)$$

с учетом обозначений $p = \frac{L_0^2}{G \cdot M}$ и $\varepsilon = \frac{C \cdot L_0^2}{G \cdot M}$, $G \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $м^3/(кг\ с^2)$ — гравитационная постоянная, C — константа, которая определяет тип орбиты.

Для значений эксцентриситета $\varepsilon \geq 1$ можно принять $\varphi_0 = 0$ в точке, в которой минимальное расстояние от траектории до центра тела равно r_0 и где вектор скорости

тела $\vec{V_0}$ направлен перпендикулярно радиус-вектору $\vec{r_0}$ (точка А на рис.1). Тогда $L_0 = V_0 \cdot r_0$.

Пусть величина скорости малого тела при $\varphi = 0$ задана в виде

$$V_0 = \beta \cdot \sqrt{\frac{G \cdot M}{r_0}}, \tag{2}$$

где число $\beta \geq 1$.

Уравнение траектории движения (1) в этом случае можно записать в виде

$$r = \frac{\beta^2 \cdot r_0}{1 + (\beta^2 - 1) \cdot cos(\varphi)}. \tag{3}$$

Стоит отметить, что значение $\beta = 1$ соответствует круговой орбите малого тела. Рассмотрим движение малого тела при $\beta > 1$. Пусть A – точка траектории, в которой $\varphi = 0$, расстояние до центра тела равно минимальному r_0 и где вектор скорости тела $\vec{V_0}$ направлен перпендикулярно радиус-вектору $\vec{r_0}$ (рис. 1).

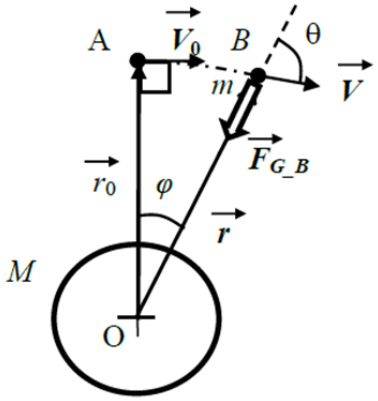


Рис. 1. К описанию движения малого тела

В некоторой точке траектории Bс координатами $\left(\vec{r}, \varphi\right)$ вектор скорости малого тела уже не будет направлен перпендикулярно радиус-вектору $\vec{r}$, а значит и вектору силы гравитационного притяжения $\vec{F_{G_B}}$, так как траектория в этом случае не является окружностью.

Приближенная оценка величины угла θ между вектором скорости $\vec{V}$ тела и радиус-вектором $\vec{r}$ для малой величины угла $\varphi << 1$ приводит к выражению

$$cos(\theta) = \varphi \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^2}. \tag{4}$$

Таким образом, при $\beta > 1$ вблизи точки A справедливо $\cos(\theta) > 0$, поэтому $\theta < 90^o$.

Предположим, что в точке *B* малое тело упруго отражается от некоторой стенки, и после удара движется в обратном направлении по той же траектории. Дойдя до точки *A*, тело опять упруго отражается от стенки и движется опять по той же траектории до точки *B*, где снова отражается и т. д. Вектор силы $\vec{F_B}$, действующей на стенку в точке *B* при упругом отражении малого тела, можно представить в виде суммы

$$\vec{F_B} = \vec{F_{\perp B}} + \vec{F_{\parallel B}} \tag{5}$$

так, что вектор $\vec{F_{\perp B}}$ направлен перпендикулярно вектору силы гравитационного притяжения $\vec{F_{G_B}}$, а вектор $\vec{F_{\parallel B}}$ направлен параллельно, но противоположно $\vec{F_{G_B}}$ (рис. 2). Следовательно, можно сделать оценку величины проекции $\vec{F_{\parallel B}}$:

$$F_{\parallel B} = F_B \cdot cos(\theta). \tag{6}$$

Изменение вектора импульса малого тела $\vec{\Delta p}$ при отражении от стенки равно импульсу средней (по времени силы) $\vec{F_B}$, действующей на малое тело со стороны стенки при ударе:

$$\vec{\Delta p} = \vec{F_B} \cdot \Delta t. \tag{7}$$

Величину интервала времени Δt в (7) можно оценить как время между двумя последовательными ударами малого тела о стенку в точке *B*. С учетом третьего закона Ньютона и закона сохранения энергии из (7) для (6) получаем выражение

$$F_{\parallel B} = \frac{m{V_0}^2}{r_0} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^2}. \tag{8}$$

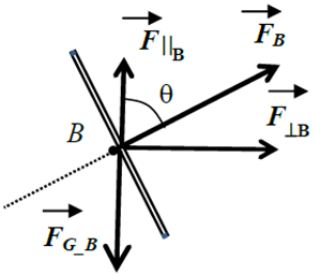


Рис. 2. Удар малого тела о стенку в точке *B* (стенка изображена в виде двойной полосы)

Теперь предположим, что из точки A одновременно начинают двигаться два одинаковых малых тела — левое (*L*) и правое (*R*) в противоположных направлениях с одинаковыми начальными скоростями. При этом оба тела одновременно упруго отражаются от стенок и после возвращения в точку *A* опять отражаются и т. д. Пусть все три стенки составляют единую конструкцию (рис. 3), в этом случае суммарная сред-

няя сила, действующая со стороны малых тел на конструкцию, будет направлена против силы тяжести

$$\vec{F_{BR}} + \vec{F_{BL}} = F_{\parallel} \quad . (9)$$

так как перпендикулярные составляющие вида $\vec{F_{\perp B}}$ в (5) в сумме дают нулевой вектор

$$\vec{F_{\perp}} = \vec{F_{\perp BR}} + \vec{F_{\perp BL}} = \vec{0}.$$

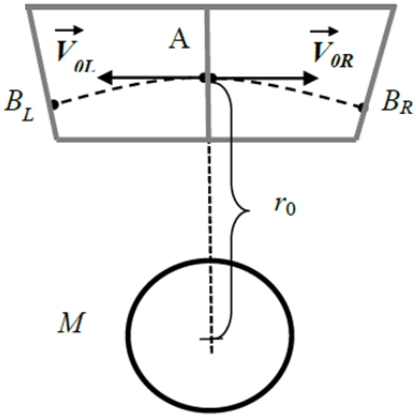


Рис. 3. Траектории движения левого (*L*) и правого (*R*) малых тел

В этом случае величина силы (9) в два раза больше, чем (8):

$$F_{\parallel} = 2 \cdot \frac{m{V_0}^2}{r_0} \cdot \frac{(\beta^2 - 1)}{\beta^2}. \quad (10)$$

Пусть $g = \sqrt{G \cdot M}/r_0$ — ускорение свободного падения на расстоянии r_0 от центра большого тела, тогда с учетом (2) выражение (10) примет вид

$$F_{\parallel} = 2 \cdot mg \cdot (\beta^2 - 1). \quad (11)$$

Величину β в (2) можно трактовать как отношение скорости тела V_0 к скорости движения V_1 по круговой орбите радиуса r_0. Вблизи поверхности Земли можно оценить верхний предел величины β как отношение скорости света $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с к первой космической скорости $V_1 \approx 8 \cdot 10^3$ м/с: $\beta < 37500$. То есть две частицы массами m каждая могут создать силу (11), величина которой не превосходит значения $F_{\parallel} < mg \cdot 2{,}81 \cdot 10^9$.

Если кинетическую энергию малого тела записать в виде $E_K = m{V_0}^2/2$, тогда $\beta^2 = \frac{2 \cdot E_K}{m{V_1}^2}$ и при $\beta^2 >> 1$ из (11) следует

$$F_{\parallel} = \frac{4 \cdot E_K}{r_0}. \quad (12)$$

Следовательно, при постоянной кинетической энергии частиц величина силы отталкивания (12) уменьшается при удалении от большого тела.

Литература

[1] Pares D.P., Judah M., Finley K. The Artificial inducement of a local space warp bubble using a VEM drive. 2018 Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018. DOI: https://doi.org/10.2514/6.2018-4633

[2] Alcubierre M. The warp drive: hyper-fast travel within general relativity. Classical and Quantum Gravity, 1994, vol. 11, no. 5, pp. L73–L77.

[3] Fil'chenkov M., Laptev Y. Galaxy travel via Alcubierre's warp drive. Acta Astronautica, 2017, vol. 139, pp. 254–257.

[4] Lobo F.S.N. Wormholes, Warp Drives and Energy Conditions. Cham, Springer International Publishing, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-55182-1

[5] Fell S.D.B., Heisenberg L. Positive energy warp drive from hidden geometric structures. Classical and Quantum Gravity, 2021, vol. 38, no. 15, art. no. 155020.

[6] Bobrick A., Martire G. Introducing physical warp drives. Classical and Quantum Gravity, 2021, vol. 38, no. 10, art. no. 105009.

[7] Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. Санкт-Петербург, Лань, 2009, 336 с.

УДК 535.421

Особенности разработки оптических волноводов для устройств дополненной реальности

Соломашенко Артем Борисович asol@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шишова Мария Владимировна mshishova@bmstu.ru
Афанасьева Ольга Леонидовна o-lin98@mail.ru
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Выполнена оценка эффективности голографического волновода в зависимости от различных параметров дифракционных решеток, полученных на его поверхности а именно глубины и формы профиля поверхностного рельефа. Экспериментально проанализировано качество изображения, формируемого устройством дополненной реальности на основе такого типа волновода, в зависимости от параметров подложки, конфигурации, количества и расположения дифракционных решеток. Показано, что при получении наложенной дифракционной решетки формируется «паразитная» структура, приводящая к нежелательной дифракции излучения и появлению дефектов изображения.

Ключевые слова: *дифракционная решетка, волноводы, дополненная реальность, поверхностный рельеф, дифракционная эффективность*

Нарастающая вычислительная мощность современных устройств и повсеместная цифровизация позволили вывести технологии дополненной и виртуальной реальности на принципиально новый уровень, в результате чего они могут выйти за пределы индустрии развлечений и охватить широкий спектр новых сфер деятельности человека. Анализ таких устройств и различных способов вывода изображения пользователю показывает, что с точки зрения обеспечения наилучших рабочих параметров, а именно рабочее угловое поле и размер выходного зрачка устройства, на данный момент лидирующие позиции занимает технология голографических волноводов [1, 2].

Голографические волноводы представляют собой стеклянные плоскопараллельные пластины, в которых излучение распространяется за счет полного внутреннего отражения (ПВО), а в качестве компонентов ввода и вывода излучения применяются дифракционные оптические элементы в виде рельефно-фазовых или объемных дифракционных решеток, сформированных на поверхности или внутри волновода [2, 3].

Задача разработки оптической системы устройства дополненной реальности заключается в соблюдении лучшего компромисса между эффективностью волновода, размером рабочего углового поля и выходного зрачка, равномерностью яркости в пределах поля зрения, затратами на производство и размером/весом. В данной работе анализируется влияние структуры и формы профиля дифракционных решеток на качество изображения, выражаемого присутствием хроматических аберраций и других артефактов по равномерности яркости. Исследования направлены на обеспечение качественной передачи изображения через голографический волновод, полученный по аналоговой технологии.

Наиболее перспективной реализацией с точки зрения обеспечения наилучшей равномерности яркости наблюдаемого изображения на базе аналоговой технологии является конфигурация, описанная ниже. Голографический волновод разбит на 5 зон: две для ввода излучения внутрь пластины, две для расширения выходного зрачка по горизонтали и одна — для вывода излучения в сторону глаза оператора. В первой зоне записываются две отдельные решетки под углом плюс и минус 60° друг относительно друга, т. е. область ввода физически разбита на 2 части, каждая из которых отвечает за дифракцию и ввод в пластину своей части падающего излучения. В промежуточной зоне 2 записывается одномерная дифракционная решетка, причем для правой и левой части записываются две разные решетки с углами поворота минус и плюс 60° соответственно, таким образом, чтобы дифрагировавшее на ней излучение направлялось вниз в сторону области вывода. При этом период всех трех решеток на отдельной световодной пластине одинаковый, т.е. отличается только ориентация штрихов.

В данной реализации голографический волновод состоит из трех отдельных пластин для RGB-составляющих. Периоды структур составляют 380, 430 и 520 нм (для каждой из трех RGB-пластин), а рекомендованная глубина поверхностного рельефа составляет от 130 до 180 нм. Это условие, во-первых, согласуется с выравниванием дифракционной эффективности при дифракции пучков с различным углом падения. Во-вторых, при такой глубине профиля меньше проявляется свойство зависимости дифракционной эффективности от поляризации. Для определения эффективности дифракционных решеток в зависимости от формы профиля, глубины поверхностного рельефа и углов падения излучения использовался метод фурье-мод [4, 5].

Исследование выполнено в МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках выполнения НИР при реализации программы «Приоритет-2030».

Литература

[1] Eisen L., Meyklyar M., Golub M., Friesem A.A., Gurwich I., Weiss, V. Planar configuration for image projection. Applied Optics, 2006, vol. 45 (17), pp. 4005–4011.

[2] Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations. Proc SPIE, 2019, vol. 11062, art. 110620J.

[3] Levola T., Aaltonen V. Near to eye display with diffractive exit pupil expander having chevron design. Journal of the Society for Information Display, 2008, vol. 16 (8), pp. 857–862.

[4] Moharam M.G., Pommet D.A., Grann E.B., Gaylord T.K. Stable implementation of the rigorous coupledwaveanalysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. J Opt Soc Am. A, 1995. vol. 12, no. 5, pp. 1077–1086.

[5] Magnusson R., Gaylord T.K. Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape. J Opt Soc Am, 1978, vol. 68, pp. 806–809.

УДК 531.7

Численное исследование неопределенности коэффициента истечения цилиндрических сопел

Харитонов Александр Олегович alharitonov@yandex.ru
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Бусыгина Елена Борисовна bus-elena3@yandex.ru
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Никитина Ольга Александровна line_av@mail.ru
МГТУ им. Г.И. Носова

Масленников Игорь Марселевич tookai88@gmail.com
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Датчики расхода жидкостей и газовых сред при их эксплуатации подвержены влиянию множества вредных факторов, отрицательно сказывающихся на точности производимых измерений. Для датчиков расхода переменного перепада давления с цилиндрическими соплами к числу таковых относятся притупление в результате абразивного износа входной и выходной кромок. В работе представлены результаты исследования совокупного влияния на величину коэффициента истечения указанных факторов. Исследования включали численное моделирование по методу конечных элементов работы датчика с цилиндрическим соплом с использованием программного комплекса ANSYS. Статистическая обработка и анализ полученных результатов выполнены средствами программы Statistica 6.1. Дана количественная оценка влияния указанных факторов на величину коэффициента истечения.

Ключевые слова: *расход, датчики давления, численное моделирование, статистическая обработка*

Простота конструкции и надежность в эксплуатации обусловили широкое применение расходомеров переменного перепада давления с цилиндрическими соплами. Кроме того, они допускают расход на 60 % больше, чем диафрагмы того же диаметра при одинаковом перепаде давления и обеспечивают более высокую точность измерения по сравнению с диафрагмой [1]. Среди ряда факторов одним из значимых и влияющих на возникновение погрешности измерения является абразивное изнашивание внутренних поверхностей сопел. Методическими рекомендациями РД 50-213-80. «Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами» [2] предписаны ограничения по величине отклонений от цилиндричности и параметра шероховатостей внутренней поверхности сопла. Притупление же кромок на входе и выходе потока из него оговорено лишь отсутствием отражения от рассеянного источника света, направленного под углом 45°. Кромку считают острой, если при таком освещении она не блестит. Исключить влияние на измерение расхода притупления кромок невозможно, поэтому должна быть возможность внесения поправок для получения объективных результатов измерения.

В работе представлены результаты исследования влияния на коэффициент истечения притупления кромок на входе и выходе из цилиндрического сопла расходомеров переменного перепада давления. Принимали, что притупление кромок в результате абразивного износа происходит по радиусам r_1 и r_2 (рис. 1).

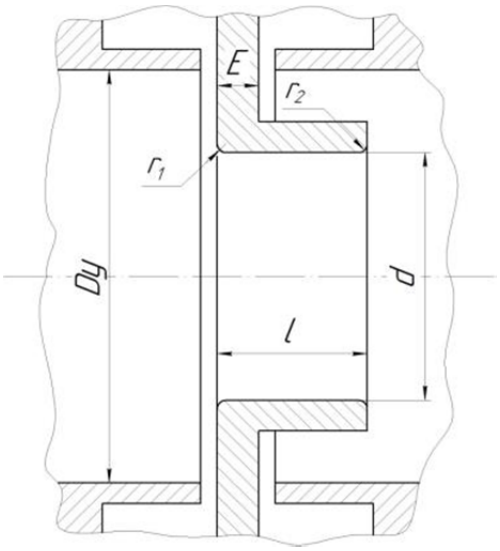


Рис. 1. Цилиндрическое сопло расходомера

Исследования выполняли численным моделированием течения воды на измерительном участке трубопровода с условным диаметром D_y = 0,2 м. Размеры цилиндрического сопла соответствовали требованиям ГОСТ 8.586.3 -2005 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования» [3], согласно которым принимали внутренний диаметр d = 0,12 м, длину внутренней цилиндрической поверхности l = 0,075 м и толщину фланца E = 0,020 мм.

Для исходного состояния сопла значениям радиусов r_1 и r_2 придавали нулевые значения. Максимально допустимое притупление кромок нормативными документами количественно не оговаривается. Рекомендациями РД 50-213-80 [2] для сопел «четверть круга» регламентируются отклонения радиусов дуг от номинальных значений. Указанные отклонения не должны превышать 3 %. Следуя этому ограничению, максимальная величина притупления кромок принималась равной $2{,}4\times10^{-3}$ м, что соответствовало 2 % от величины внутреннего диаметра dсопла.

Численный эксперимент спланировали как двухфакторный с варьируемыми параметрамиr_1 и r_2. При этом в качестве функции отклика принимали величину коэффициента истечения C_i на сужающем устройстве расходомера. Данные для постановки численного эксперимента соответствовали результатам натурного эксперимента, приведенным в работе [4]. Давление воды на входе принимали равным 2 МПа. Плотность и коэффициент вязкости воды при температуре С принимали соответственно равными 975 кг/м^3 и $0{,}3799\cdot10^{-3}$ Па·с. С учетом температурной деформации расчетное значение диаметра условного прохода стального трубопровода принимали равным $200{,}12\cdot10^{-3}$ м и диаметра отверстия диафрагмы — $120{,}11\cdot10^{-3}$ м. Действительный массовый расход принимали равным 73,43 кг/с. Граничные условия формировали как ограничения по скорости на внутренних поверхностях, обтекаемых

потоком воды и заданием величины скорости воды на входе, соответствующей указанному расходу.

Моделирования течения осуществляли средствами приложения FLOTRAN CFD программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов. Для чего область решения разбивали на элементы FLUID 141 из библиотеки программы. Результатом расчета по каждой схеме являлось определение перепада давления Δp_i на сужающем устройстве. Значения давления жидкости до и после сопла находили по изолиниям распределения давления (рис. 2).

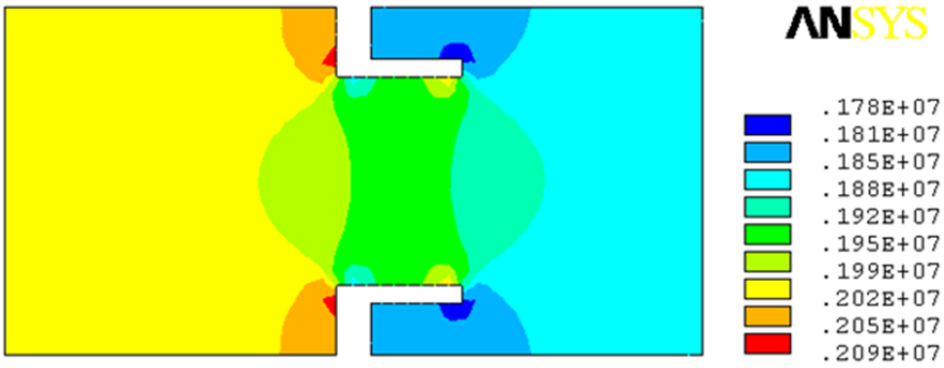


Рис. 2. Изолинии распределения давления без притупления кромок, Па

Изолинии полей скоростей подобно течению при нулевых значениях радиусов r_1 и r_2 (рис. 3) от опыта к опыту изменялись незначительно.

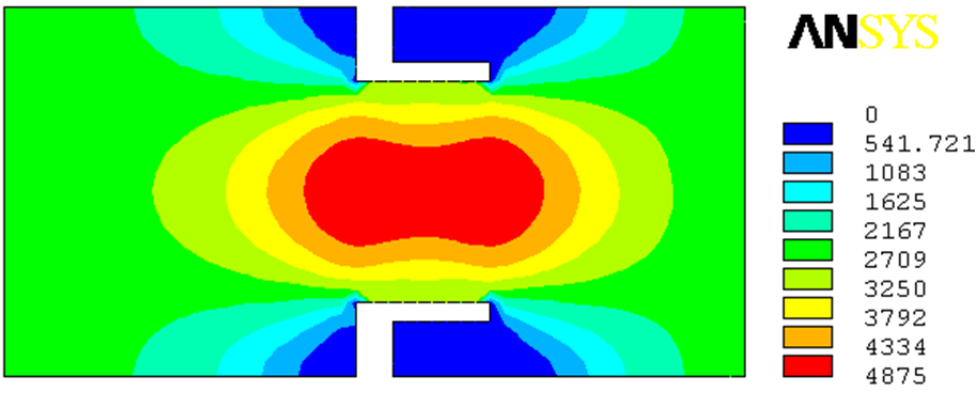


Рис. 3. Изолинии поля скоростей без притупления кромок, 10–3 м/с

Экстремальные значения графика перепада давления на сужающем устройстве и графика скорости в среднем слое потока жидкости (рис. 4) в каждом опыте совпадали по расположению на измерительном участке трубопровода.

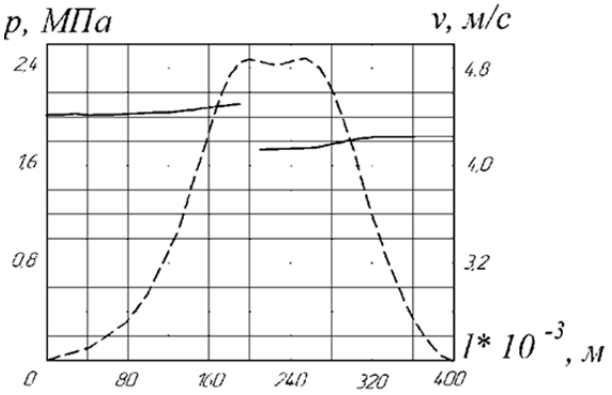


Рис. 4. Распределение давления и скорости на измерительном участке трубопровода:
_____ давление жидкости; - - - - - скорость в среднем слое потока жидкости

Уровни варьирования факторов и принятый интервал соответствовали требованиям симметричного композиционного ротатабельного униформплана второго порядка [5]. Численный эксперимент включал в себя десять опытов полного факторного эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

План численного эксперимента

/	Притупление кромки на входе r_1, 10^{-3} м	Притупление кромки на выходе r_2, 10^{-3} м	Перепад давления Δp_i, Delta p_{i}, Δp_i, МПа	Коэффициент истечения C_iC_{i}	C_i/ C_0C_{i}/C_{0}
1	0,000000	1,200000	0,19	0,314	0,946000
2	1,200000	1,200000	0,31	0,246	0,741000
3	2,048000	2,048000	0,21	0,299	0,900000
4	2,048000	0,352000	0,46	0,202	0,608000
5	0,352000	0,352000	0,19	0,314	0,946000
6	1,200000	0,000000	0,27	0,264	0,795000
7	2,400000	1,200000	0,37	0,225	0,768000
8	0,352000	2,048000	0,18	0,323	0,972000
9	1,200000	2,400000	0,21	0,299	0,900000
10	0,000000	0,000000	0,17	0,332	1,000000

Изменение гидродинамических условий течения оценивали по величине коэффициента истечения C_i, который рассчитывали по формуле [6]:

$$C_i = \frac{q_m(1-\beta^4)^{0,5}}{(\pi/4)d^2(2\rho\Delta p_i)^{0,5}}, \quad (1)$$

где β — отношение, равное d/D_y, $\rho = 975$ кг/м^3— плотность воды при температуре t = 20 °С.

Относительную величину этих изменений рассчитывали как отношение C_i/C_0, где C_0 — коэффициент истечения для условий по опыту 10 для нулевых значений варьируемых параметров r_1 и r_2.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Анализ полученных результатов выполнили средствами программы Statistica 6.1. При 5%-ном уровне значимости коэффициентов уравнение регрессии функции отклика имеет вид

$$C_i/C_0 = 1{,}033 - 0{,}263r_1 - 0{,}135r_2 + 0{,}029r_1^2 + 0{,}069\mathrm{r}_1\mathrm{r}_2 + 0{,}053\mathrm{r}_2^2. \quad (2)$$

Глобальный экстремум функции отклика находится за пределами интервалов варьирования параметров r_1 и r_2 (рис. 5).

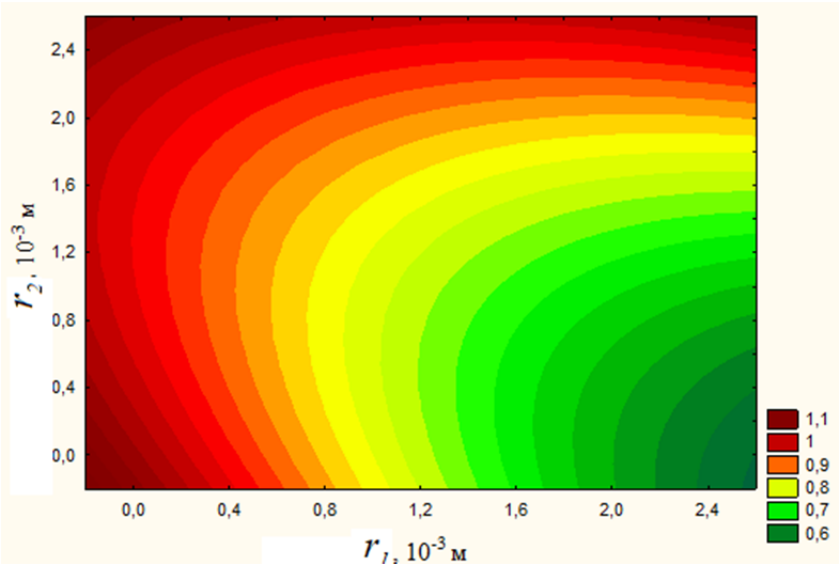


Рис. 5. Карта линий уровня поверхности функции отклика

Абсолютные значения коэффициентов при факторах эксперимента свидетельствуют о том, что наиболее существенное влияние на изменение коэффициента истечения, а следовательно, и результаты определения расхода, оказывает притупление кромки сопла на входе. Оценку влияния факторов на процесс течения получили по результатам анализа по методу Парето (рис. 6).

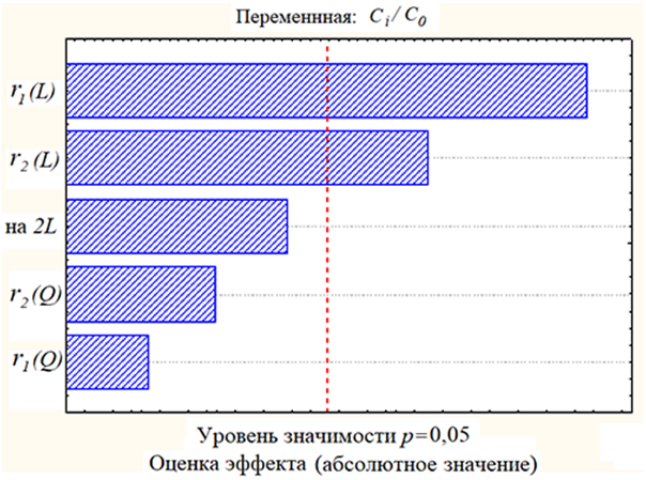


Рис. 6. Карта Парето t-значений для коэффициентов

Влиянием квадратичных членов уравнения регрессии (2) можно пренебречь, равно как и слагаемым от произведения r_1 и r_2. Превышение на одну треть по уровню значимости на истечение r_1 против r_2 позволил сделать вывод о целесообразности применения химикотермического упрочнения кромок сопел на входе. Последнее уменьшит неопределенность в погрешности измерения расхода.

Результаты опытов, выполненных в ходе численного эксперимента, позволили сделать следующие выводы:

- разработана методика количественной оценки влияния притупления кромок цилиндрических сопел на изменение коэффициента истечения;
- установлено, что притупление входной кромки отверстия сопла оказывает наиболее существенное влияние на изменение коэффициента истечения, о чем свидетельствуют коэффициенты уравнения регрессии (2) и результаты анализа по методу Парето;
- предлагается для уменьшения неопределенности в погрешности измерения расхода с использованием цилиндрических сопел кромку входного отверстия подвергать химико-термическому упрочнению.

Литература

[1] РД 50-411-83. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств. Москва, Изд-во стандартов, 1984.

[2] РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. Москва, Изд-во стандартов, 1982.

[3] ГОСТ 8.586.3–2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. Москва, Стандартинформ, 2007.

[4] Зезин В.Г., Лазуков В.А. Определение расхода сплошных сред методом переменного перепада давления. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2007, 102 с.

[5] Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва, Машиностроение; София, Техника, 1980, 304 с.

[6] Методический материал по практическому применению ГОСТ 8.586.1–2005 — ГОСТ 8.586.5–2005. Р Газпром 5.7–2009. Москва, Газпром, 2010, 135 с.

СЕКЦИЯ 4

НЕОБРАТИМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Руководитель секции —
д-р физ.-мат. наук

Бункин Николай Федорович

УДК 53.043

Особенности взаимодействия аминокислот с полимерной мембраной Нафиона в зависимости от изотопного состава жидкой матрицы

Болоцкова Полина Николаевна bolotskova@inbox.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Бункин Николай Федорович nbunkin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козлов Валерий Анатольевич vkozlov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрено взаимодействие полимерной мембраны Нафион с различными аминокислотами в экспериментах по фотолюминесцентной спектроскопии. Представлено, что при набухании полимерной мембраны в воде происходит разматывание полимерных волокон в объем жидкости, причем в случае обычной воды размер области, содержащей размотанные волокна, в то время как при набухании в обедненной по дейтерию воде этот размер существенно меньше. Показано, что при взаимодействии аминокислот с размотанными в объем жидкости полимерными волокнами, следует учитывать эффекты тушения люминесценции. Сделаны выводы, что на основе полимерной мембраны, набухающей в суспензиях аминокислот, вызывающих тушение и восстановление люминесценции, можно создавать логические бинарные ячейки.

Ключевые слова: *полимерная мембрана Нафион, фотолюминесцентная спектроскопия, аминокислоты, динамическое рассеяние света*

Введение

Данная работа посвящена изучению взаимодействия биологических макромолекул с полимерной мембраной Nafion [1, 2]. Взаимодействие рассмотрено в контексте образования исключенной зоны из концевых волокон молекулы вблизи поверхности Нафиона [3, 4].

Мы исследовали суспензии аланина, глицина, лизина, гистидина, аспарагиновой и глутаминовой кислот в физиологическом растворе NaCl на основе обычной и обедненной дейтерием воды(DDW)[5].

Материалы и методы

В экспериментах по фотолюминесцентной спектроскопии (рис. 1) было изучено взаимодействие полимерной мембраны Нафион с различными аминокислотами. Эксперименты проводились с физиологическими растворами NaCl, приготовленными на основе обычной воде (содержание дейтерия 157 ppm) и на обедненной дейтерием воде (deuterium depleted water, DDW, содержание дейтерия 1 ppm).

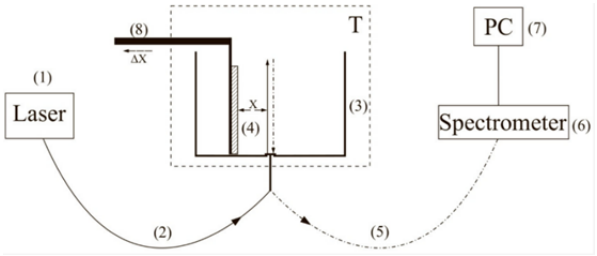


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — лазер; *2*, *5* — многорежимное оптическое волокно; *3* — ячейка с жидким образцом; *4* — пластина Nafion; *6* — спектрометр; *7* — компьютер; *8* — ступень, оснащенная микрометрической горизонтальной подачей для выравнивания пластины Nafion относительно оптическая ось; *T* — термостат

Эффект разматывания волокон Нафиона в объем жидкости

Было установлено, что при набухании полимерной мембраны в воде происходит разматывание полимерных волокон в объем жидкости, причем в случае обычной воды размер области, содержащей размотанные волокна, порядка 300 μm, в то время как при набухании в DDW этот размер существенно меньше, т. е. эффектом разматывания (с учетом погрешности измерений) можно пренебречь, что было подробнее показано в [3]. Размотанные с поверхности мембраны в объем воды полимерные волокна аналогичны гликокаликсу (внеклеточному матриксу) клеточных мембран, то есть исследования взаимодействий аминокислот с такой структурой позволяет на качественном уровне (с учетом разницы масштабов) проводить моделирование процессов на поверхности клеточных мембран, то есть изучать клеточные метаболизмы [4].

Результаты взаимодействия Нафиона с аминокислотами

Показано, что при взаимодействии аминокислот с размотанными в объем жидкости полимерными волокнами следует учитывать эффекты тушения люминесценции [5]. Оказалось, что динамика набухания мембран Нафиона и тушения люминесценции аминокислотами различна для суспензий аминокислот, приготовленных в физиологических растворах на основе обычной воды и DDW, что прослеживается из рис. 2.

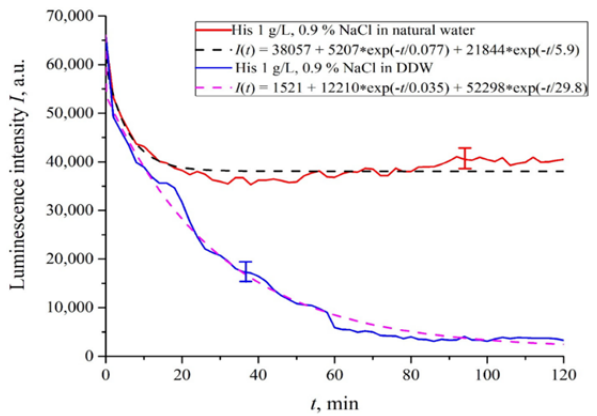


Рис. 2. Интенсивность люминесценции $I(t)$ в зависимости от времени вымачивания Нафиона в солевом растворе на водной основе и на основе DDW (0,9 об.% NaCl) для суспензии гистидина

Стационарный уровень интенсивности люминесценции для суспензий на основе обычной воды существенно выше, чем для DDW, что связано с защитной функцией размотанных в объем воды полимерных волокон.

При длительном вымачивании Нафиона в суспензии глутаминовой кислоты интенсивность люминесценции на поверхности Нафиона падает из-за эффектов тушения, но добавление в жидкость небольшого количества лизина приводит к восстановлению интенсивности (рис. 3). Именно в суспензиях на основе DDW попеременные добавки глутаминовой кислоты и лизина приводят к эффектам тушения и восстановления люминесценции, причем величины скачков и спадов интенсивности люминесценции достаточно стабильны [6, 7].

На 30-й минуте добавляли суспензию лизина (1 г/л), приготовленную в физиологическом растворе на основе DDW. Затем на 70-й минуте еще раз добавляли суспензию глутаминовой кислоты того же объема и концентрации 1 г/л (см. рис. 3).

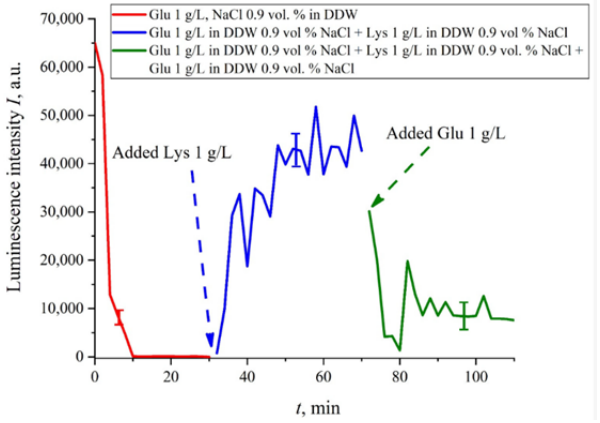


Рис. 3. Интенсивность люминесценции I(t) в зависимости от времени вымачивания Наифона в растворах на основе DDW (0,9 об.% NaCl), содержащих суспензию глутаминовой кислоты (концентрация 1 г/л)

Заключение

В результате проделанной работы мы видим, что добавки различных аминокслот приводят как к ослаблению, так и к востановлеию интенсивности люминесценции Нафиона в зависимости от выбранной аминокислоты. Была высказана гипотеза, что на основе полимерной мембраны, набухающей в суспензиях аминокислот, вызывающих тушение и восстановление люминесценции, можно создавать логические бинарные ячейки 0 — 1 и 0 — 1 — 0.

Литература

[1] Mauritz K.A., Moore R.B. State of understanding of Nafion. Chem Rev, 2004, vol. 104, pp. 4535–4585. DOI: https://doi.org/10.1021/cr0207123

[2 Choi J.S., Tsui J.H., Xu F., Lee S.H., Sung S.K., Lee H.J., Wang C., Kim H.J., Kim D.H. Fabrication of micro- and nanopatterned nafion thin films with tunable mechanical and electrical properties using thermal evaporation-induced capillary force lithography. Adv Mat Int, 2021, vol. 8, art. no. 2002005. DOI: https://doi.org/10.1002/admi.202002005

[3] Bunkin N.F., Shkirin A.V., Kozlov V.A., Ninham B.W., Uspenskaya E.V., Gudkov S.V. Near-surface structure of Nafion in deuterated water. J Chem Phys, 2018, vol. 149, art. no.164901. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5042065

[4] Yurchenko S.O., Shkirin A.V., Ninham B.W., Sychev A.A., Babenko V.A., Penkov N.V., Kryuchkov N.P., Bunkin N.F. Ion-specific and thermal effects in the stabilization of the gas nanobubble phase in bulk aqueous electrolyte solutions. Langmuir, 2016, vol. 32, pp. 11245–11255. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b01644

[5] Bunkin N.F., Bolotskova P.N., Bondarchuk E.V., Gryaznov V.G., Kozlov V.A., Okuneva M.A., Ovchinnikov O.V., Penkov N.V., Smoliy O.P., Turkanov I.F. Dynamics of polymer membrane swelling in aqueous suspension of amino-acids with different isotopic composition, photoluminescence spectroscopy experiments. Polymers 2021, vol. 13. DOI: https://doi.org/ 10.3390/ polym13162635

[6] Millero F.J., Lo Surdo A., Shin C. The apparent molal volumes and adiabatic compressibilities of aqueous amino acids at 25 °C. J Phys Chem, 1978, vol. 82, pp. 784–792. DOI: https://doi.org/ 10.1021/j100496a007

[7] Ji G., Zheng T., Gao X., Liu Z. A highly selective turn on luminescent logic gates probe based on postsynthetic MOF for aspartic acid detection. Sens Actuators B Chem, 2019, vol. 284, pp. 91–95. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.114

УДК 534.63 535.33

Некоторые возможности модуляционной акустооптической спектрометрии

Боритко Сергей Викторович boritko@mail.ru
НТЦ УП РАН

Иванов Сергей Игоревич ivanov.si797@gmail.com
НТЦ УП РАН

Богданова Татьяна Владимировна bogdanova131099@mail.ru
МФТИ

Одним из способов выявления тонкой структуры оптических спектров является метод производной спектрометрии, основанный на непосредственном измерении частотной зависимости оптической плотности многокомпонентных образцов с последующим математическим сглаживанием и дифференцированием. Однако искажения в производных спектров, вносимые различными процедурами их вычисления, могут приводить к неверной интерпретации результатов. В работе рассмотрен другой путь, основанный на методе модуляционной акустооптической спектрометрии, который основан на применении не вычислительных методов, а методов связанных с непосредственным измерением производных спектра.

Ключевые слова: *спектрометрия, акустооптическое взаимодействие, модуляционная методика, производная оптического спектра*

Основной задачей спектрометрии является точное определение положения спектральных составляющих. Часто встречаемая ситуация состоит в том, что в спектре на фоне мощного широкого пика расположен более узкий и менее мощный пик. В этом случае, как показано ни рис. 1 (слева), какой бы точный спектрометр не использовался измерение спектрального положения меньшего максимума происходит с существенной ошибкой.

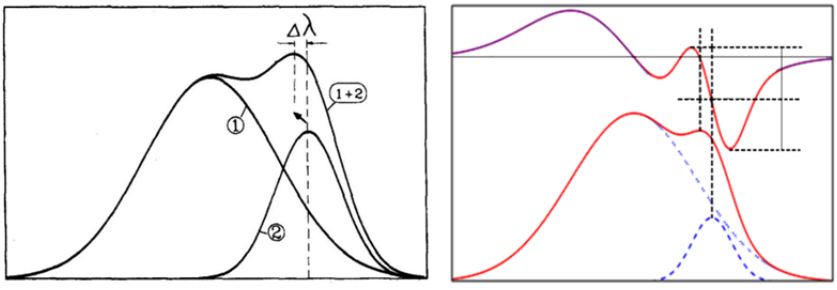


Рис. 1. Один спектральный пик на фоне другого (слева), результат дифференцирования пересекающихся спектральных линий (справа)

Для решения озвученной выше проблемы достаточно продифференцировать имеющуюся зависимость и, как это показано на рис. 1 (справа), положение меньшего

пика определяется с достаточной точностью. Этот способ широко используется в молекулярной спектроскопии и аналитической химии при исследовании мутных жидкостей и сложных растворов [1, 2]. Процедура заключается в измерении частотной зависимости спектральной плотности образца, затем сглаживании (удаление шумовой составляющей) и последующее дифференцирование результата. Однако искажения в производных спектров, вносимые различными процедурами их вычисления, могут приводить к неверной интерпретации.

В работе рассмотрен другой путь, основанный на методе модуляционной акустооптической спектрометрии, который основан на применении не вычислительных методов, а методов связанных с непосредственным измерением производных спектра. В [3, 4] теоретически была предсказана возможность непосредственной регистрации спектра оптического излучения и его производных, основанной на акустооптической дифракции на фазовой решетке, созданной акустической волной с резкой периодической модуляцией фазы. Нами был создан макет спектрометра, позволяющего регистрировать производные оптических спектров. Макет включает в себя монохроматор на основе квазиколлинеарной акустооптической ячейки, модуль выработки управляющего сигнала (синтезатор частоты), модуль обработки и управления. Последний представляет собой одноплатный компьютер, обеспечивающий выработку управляющих сигналов для всех блоков в соответствии с заданием, поступающим с внешнего компьютера, а также передачу данных на этот внешний компьютер. Внешний вид макета, собранного в корпусе персонального компьютера приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид созданного макета акустооптического спектрометра: без кожуха (справа) и в собранном состоянии (слева)

В качестве тестового эксперимента была произведена регистрация излучения неоновой лампы, имеющей, как известно, линейчатый спектр. На рис. 3 показан участок зарегистрированного спектра, а так же его первой производной. Из графика видно, что созданный макет модуляционного акустооптического спектрометра довольно эффективно регистрирует как спектр оптического сигнала, так и его производную, причем в реальном масштабе времени (см. представленный скан) — слева присутствуют как сигнал спектра, так и его производной; справа сигналов нет. Осталось выяснить насколько «физическая» производная, т. е. производная зафиксированная макетом модуляционного акустооптического спектрометра, совпадает с «математической», рассчитанной из частотной зависимости спектральной плотности. Были выбра-

ны два пика излучения, спектры сглажены математически, а затем продифференцированы и нормированы на единицу. Величины зарегистрированных производных также быль нормированы на единицу.

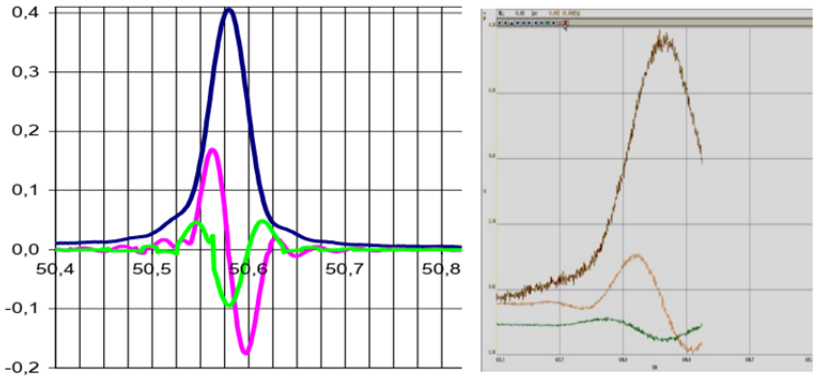


Рис. 3. Часть спектра неоновой лампы, зарегистрированная макетом модуляционного акустооптического спектрометра (справа), и скан с экрана регистрирующей системы (слева)

Результаты «физического» (пунктир) и «математического» дифференцирования приведены на рис. 4 (большие пики — сами спектральные линии). Видно, что графики не совпадают.

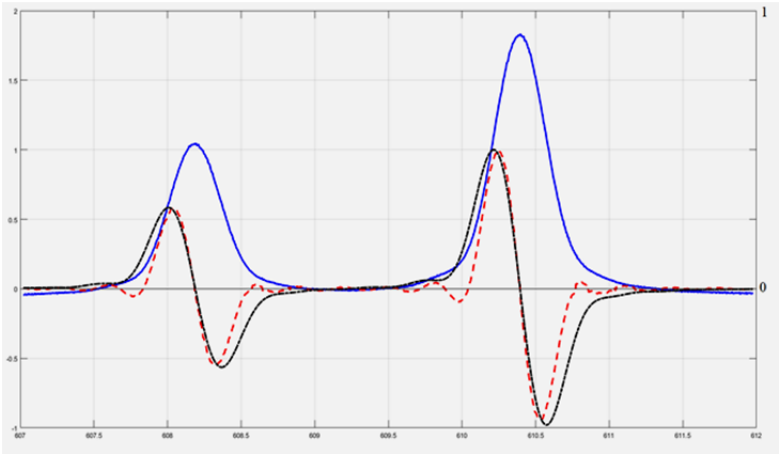


Рис. 4. Результаты «физического» и «математического» дифференцирования части зарегистрированного спектра неоновой лампы

Мы предполагаем, что различия, а именно, заужение «физической» производной и появление дополнительных экстремумов, связаны с формой аппаратной функции акустооптического спектрометра. Однако на вершинах спектральных пиков, т. е. в районах пересечения производных с нулевой линией результаты совпадают, что позволяет использовать акустооптическое дифференцирование для выявления «тонкой структуры» оптических спектров, причем в реальном масштабе времени.

Таким образом, в результате проведенных работ предложен метод точного определения положения спектральных максимумов в сложных перекрывающихся спектрах в реальном масштабе времени и создана приборная реализация предложенного метода. Следует отметить, что, как это видно из графика на рис. 3, созданное устройство позволяет регистрировать не только первую, но и вторую производную оптического спектра, правда с низкой эффективностью. Мы предполагаем продолжить работы с целью выявления возможности более высокой эффективности регистрации именно второй производной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00002)

Литература

[1] Берштейн И.Я., Каминский Ю.Л. Спектрометрический анализ в органической химии. Ленинград, 1986, 200 с.

[2] Цокова Т.Н., Котлова Т.И., Осипова А.В. Метод производной УФ-спектрометрии определения концентрации лекарственного препарата в смесях. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015, № 11–5, с. 694–698.

[3] Пустовойт В.И., Пожар В.Э. Управление характеристиками коллинеарного акустооптического фильтра путем модуляции ультразвука. Радиотехника и электроника, 1998, т. 43, № 1, с. 121–127.

[4] Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Дифракция света на акустической кусочно-однородной волне со скачкообразным изменением фазы. Успехи современной радиоэлектроники, 2006, № 9, с. 47–61.

УДК 543.42

Изучение специфических ионных эффектов в водных растворах солей щелочных металлов

Герасимов Ростислав Юрьевич r_guerassimov@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Бункин Николай Федорович nbunkin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследования молекулярных процессов, проходящих в воде и водных растворах солей при облучении в радиодиапазоне, является очень важным направлением диэлектрической спектроскопии; диэлектрическая спектроскопия является частным случаем импедансной спектроскопии. Методика диэлектрической спектроскопии применительно к воде и водным растворам является эффективным средством для исследования динамики водородных связей в объемной воде при микроволновом нагреве. В этих экспериментах можно делать оценки числа молекул в молекулярных кластерах, которые сохраняют кратковременную устойчивость благодаря водородным связям. Диэлектрические потери определяются в широком диапазоне частот от килогерц до гигагерц.

Ключевые слова: *спектроскопия, диэлектрическая проницаемость, электромагнитное поле, сверхвысокочастотное излучение, СВЧ-генератор, СВЧ-диапазон*

Исследования молекулярных процессов, проходящих в воде и водных растворах солей при облучении на частотах гигагерцового диапазона, является важным направлением диэлектрической спектроскопии [1–4]. Эффекты, связанные с откликом системы на внешнее электромагнитное поле, описывают с помощью комплексной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon = \varepsilon' - i \cdot \varepsilon'',$$

где действительная часть ε' описывает «способность» среды поляризоваться внешним полем, а мнимая часть ε'' описывает потери энергии, связанные с преобразованием в тепло.

Учет ионной компоненты приводит к незначительному уменьшению действительной части диэлектрической проницаемости за счет упорядочивания молекул воды в гидратных оболочках [5–11]. Кроме того, кроме тока связанных зарядов появляется ток проводимости, обусловленный ионной компонентой. При этом подвижность ионов (т. е., фактически, их проводимость), зависит от среднего числа молекул воды, непосредственно входящих в первую гидратную сферу иона. Действительно, для разных ионов существует так называемая серия Хоффмайстера, в которой ионы подразделяются на структуро-образующие и структуро-разрушающие. Ионы первого типа эффективно притягивают молекулы воды в гидратной оболочке, что приводит к повышению устойчивости этой оболочки, а для ионов второго типа гидратная оболочка не устойчива. В качестве исследуемых солей были выбраны LiCl, NaCl и KCl с концентрациями 10^{-3}, 10^{-2} и 10^{-1} М. При этом ионы Li^+ и Na^+ — структуро-образующие, в то время как K^+ занимает в серии Хофмайстера промежуточное положение между

структуро-образующими и структуро-разрующими ионами [12]. В процессе раскачки внешним полем гидратная оболочка может «удерживаться» таким ионом, что приведет к росту эффективной массы частицы «ион – гидратная оболочка». Очевидно, что этот эффект пропадает для структуро-разрующих ионов. В данной работе к находящейся в конденсаторе ячейке, содержащей жидкий образец, прикладывалось излучение на частотах 2000 МГц с полосой несколько МГц. Таким образом, ячейка с жидким образцом представляла собой излучатель квазимонохроматической волны, сигнал которой принимается широкополосной антенной, и далее анализируется спектр сигнала в зависимости от концентрации и типа ионов. Было получено заметное отличие спектральных плотностей для исследованных катионов на всех частотах [13–15]. Полученные результаты могут быть интерпретированы именно в рамках модели структуро-образующих и структуро-разрушающих ионов.

Метод исследования основан на регистрации спектров радиоволновых излучений сканирующим широкополосным приемником, которые возникают вследствие возбуждения переменных высокочастотных токов смещения и проводимости в объекте контроля или его отдельных элементах, помещенных между гибкими обкладками емкостного рабочего датчика, и последующем анализе получаемых спектров на аппаратно-программном комплексе.

Исследования проводились на установке, схема которой показана на рис. 1.

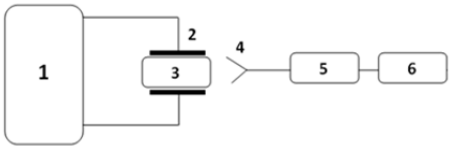


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования спектральных характеристик электромагнитных сигналов при облучении проб микропорошков в СВЧ-диапазоне:
1 — СВЧ-генератор; *2* — емкостной резонатор; *3* — исследуемый порошок; *4* — приемная антенна; *5* — широкополосный приемник; *6* — компьютер

На основании результатов измерений спектров излучения генератора G на указанных частотах была получена аппаратная функция AF измерительной установки по формуле

$$AF = (1/2)[G(t = 0) + G(t = T)],$$

где $G(t = 0)$ соответствует измерению в самом начале эксперимента; $G(t = T)$ — измерению в конце эксперимента.

Таким образом, незначительный временной дрейф частоты генератора в высокочастотную и низкочастотную область эффективно усредняется.

На основании известной аппаратной функции были получены экспериментальные значения для исследованных жидких образцов. Рассчитывалась величина

$$S' = (1/2)[S + AF],$$

и затем проводилось временное усреднение

$$\text{áWñ} = (1/2)[S'(t = t_{\text{начальное}}) + S'(t = t_{\text{конечное}})].$$

Для каждой концентрации на примере áLiClñ рассчитывалась разность áLiClñ — áWñ для спектральной области — порядка $2 \cdot 10^{-3}$ МГц. Соответствующие зависимости приведены на рис. 2.

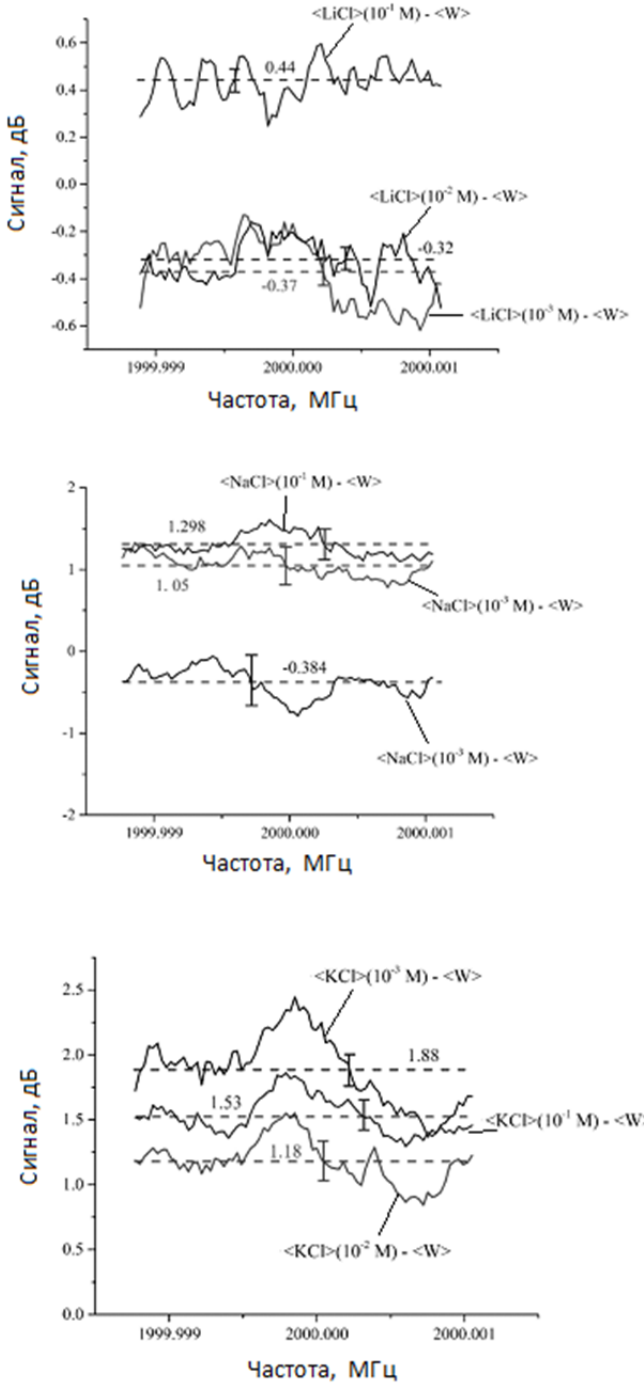


Рис. 2. Разностные спектры для ионных концентраций 10^{-3} М (вверху), 10^{-2} М (в центре) и 10^{-1} М (внизу)

Как следует из приведенных графиков, спектр раствора áLiClñ для концентрации 10^{-3}M внутри указанной спектральной области всегда лежит ниже спектра áWñ, в то время как для концентраций 10^{-2}и 10^{-1}M спектр áLiClñ оказывается выше áWñ. Отличия спектров для воды и водных растворов LiCl несет информацию именно о вкладе ионов в спектральные зависимости. Действительно, при понижении содержания ионов спектральные зависимости должны стремиться к спектру чистой воды, поэтому спектр áWñ, казалось бы, должен быть базовой линией, а спектр áLiClñ для концентрации 10^{-3}M должен примерно совпадать со спектром áWñ. Поскольку этого не происходит, можно сделать вывод о том, что данная методика, основанная на возбуждении электромагнитных колебаний из жидкого образца, содержащего ионную компоненту, позволит в дальнейшем количественно характеризовать растворенные в воде структуро-образующие и структуро-разрушающие ионы.

В наших последующих работах будут изучены ионные добавки на основе так называемой серии Хофмайстера; в соответствии с этой серией свойства растворенных в воде ионов меняются (в зависимости от их валентности и размера) от структуро-образующих к структуро-разрушающим. Мы ожидаем, что разностные спектры ионных растворов и чистой воды будут отличаться для структуро-образующих к структуро-разрушающих ионов [16, 17].

Литература

[1] Kremer F., Schonhals A., Luck W. Broadband dielectric spectroscopy. Berlin, Springer-Verlag, 2002, 705 p.

[2] Hippel A.R. Dielectrics and waves. New York, John Willey & Sons, 1954, 284 p.

[3] McIntyre J.M., Pham H. Electrochemical impedance spectroscopy; a tool for organic coatings optimizations. Progress in Organic Coatings, 1996, vol. 27 (1-4), pp. 201–207. DOI: https://doi.org/ 10.1016/0300-9440(95)00532-3

[4] Maalouf R., Fournier-Wirth C., Coste J., Chebib H., Saïkali Y., Vittori O., Errachid A., Cloarec J.-P., Martelet C., Jaffrezic-Renault N. Label-free detection of bacteria by electrochemical impedance spectroscopy: comparison to surface plasmon resonance. Analytical Chemistry, 2007, vol. 79, pp. 4879–4886. DOI: https://doi.org/10.1021/ac070085n

[5] Kaatze G.A., Behrends R., Pottel R. Hydrogen network fluctuations and dielectric spectrometry of liquids. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002, vol. 305 (1–3), pp. 19–29. DOI: https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01084-0

[6] Kaatze U., Feldman Y. Broadband dielectric spectrometry of liquids and biosystems. Measurement Science and Technology, 2005, vol. 17, pp. R17–R35. DOI: https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/2/R01

[7] Jansson H., Bergman R., Swenson J. Slow dielectric response of Debye-type in water and other hydrogen bonded liquids. Journal of Molecular Structure, 2010, vol. 972, pp. 92–98. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.01.072

[8] Jansson H., Bergman R., Swenson J. Hidden slow dynamics in water. Physical Review Letters, 2010, vol. 104 (1), art. no. 017802. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.017802

[9] Pérez C., Muckle M., Zaleski D., Seifert N., Temelso B., Shields G., Kisiel Z., Pate B. Structures of cage, prism, andbook isomers of water hexamer from broadband rotational spectroscopy. Science (New York), 2012, vol. 336, pp. 897–901. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1220574

[10] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Москва, Гостехиздат, 1957, 532 с.

[11] Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and seawater from microwave satellite observations. IIEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, vol. 42, pp. 1836–1849.

[12] Dogonadze R.R., Kalman E., Kornyshev A.A., Ulstrup J., eds. The chemical physics of solvation. Amsterdam, Elsevier, 1985, 313 p.

[13] Berne B.J., Pecora R. Dynamic light scattering. Krieger, Malabar, FL, 1990, 376 p.

[14] Chu B. Laser light scattering. New York, Academic Press, 1974, 317 p.

[15] Risman P.O., Wäppling-Raaholt B. Retro-modelling of a dual resonant applicator and accurate dielectric properties of liquid water from −20 °C to +100 °C. Measurement Science and Technology, 2007, vol. 18, pp. 959–966. DOI: https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/4/001

[16] Lo Nostr P., Ninham B.W. Hofmeister phenomena: an update on ion specificity in biology. Chemical Reviews, 2012, vol. 112, pp. 2286–2322. DOI: https://doi.org/10.1021/cr200271j

[17] Salis A., Ninham B. Models and mechanisms of Hofmeister effects in electrolyte solutions, and colloid and protein systems revisited. Chemical Society Reviews, 2014, vol. 43, pp. 7358–7377. DOI: https://doi.org/10.1039/c4cs00144c

УДК 538.958

Люминесценция ультратонких наночастиц селенида кадмия планарной геометрии

Дайбаге Даниил Саюзович daibagya@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Захарчук Иван Александрович zia18f064@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Осадченко Анна Владимировна osadchenkoav@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Гехт Милана Эмилевна milana.gekht@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Селюков Александр Сергеевич selyukov@lebedev.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Амброзевич Сергей Александрович s.ambrozevich@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Скориков Михаил Львович skorikovml@lebedev.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Васильев Роман Борисович romvas@inorg.chem.msu.ru
МГУ имени М.В. Ломоносова

Рассмотрены абсорбционные и люминесцентные свойства полупроводниковых коллоидных наночастиц селенида кадмия планарной геометрии. Обнаружены энергетические переходы в спектре поглощения, которые обусловлены межзонными переходами, узкая полоса люминесценции, связанная с экситонным переходом, а также широкая полоса поверхностных состояний. Отсутствие второго более коротковолнового экситонного пика фотолюминесценции объясняется тем, что время преобразования легкой дырки в тяжелую гораздо меньше, чем время излучательной релаксации.

Ключевые слова: *люминесценция, поглощение, нанопластины, селенид кадмия*

Введение

Исследования люминесцентных свойств нанокристаллов начались еще во второй половине прошлого века [1]. Интерес к наноразмерным структурам обусловлен тем фактом, что варьирование размера наночастиц дает возможность управлять как межзонными переходами – экситонной люминесценцией, так и люминесценцией, связанной с дефектными состояниями [2]. Совсем недавно ученым удалось получить новый тип квантово-размерных структур – наночастицы планарной геометрии [3]. В таких нанопластинах квантово-размерный эффект реализуется только в одном направлении.

На сегодняшний день установлено наличие межзонной и рекомбинационной люминесценции в коллоидных нанопластинах CdSe со средним размером в 3–5 монослоев [4]. В данной работе представлены результаты исследования абсорбционных и люминесцентных свойств более тонких нанопластин селенида кадмия, средняя толщина которых составляет примерно 2,5 монослоя.

Методы

Спектр люминесценции исследованных нанопластин измеряли с помощью волоконного спектрометра Ocean Optics Maya 2000 Pro с рабочим диапазоном длин волн: 200...1100 нм. Возбуждение проводили с помощью лазера Coherent Mira 900, излучающего в области 350 нм со средней мощностью 96 мкВт и длительностью импульсов в 3 пс. Спектр оптического поглощения раствора наноструктур CdSe в гексане был зарегистрирован с помощью спектрофотометра Specord M40.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен спектр оптического поглощения полупроводниковых коллоидных двумерных наночастиц CdSe. В спектре поглощения присутствуют две экситонные особенности — пики на длинах волн 373 и 394 нм, обусловленные переходами $1S_{lh}$-$1S_e$ и $1S_{hh}$-$1S_e$ между подзонами легких и тяжелых дырок в валентной зоне и зоной проводимости. Стоит также отметить, что сохранилась ступенчатая форма спектра поглощения, присущая двумерным наноразмерным структурам, обусловленная плотностью энергетических состояний.

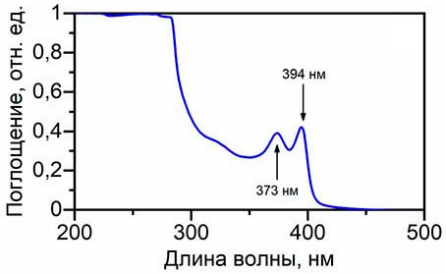


Рис. 1. Спектр оптического поглощения нанопластин селенида кадмия

На рис. 2 представлен спектр фотолюминесценции (ФЛ) коллоидных нанопластин CdSe при комнатной температуре. Максимум межзонной люминесценции приходится на длину волны 397 нм, а ширина полосы ФЛ на полувысоте (FWHM) составила 12 нм. Невысокий, по сравнению со сферическими квантовыми точками, стоксов сдвиг, который составил 3 нм, обусловлен меньшей величиной энергетического расщепления между синглетным и триплетным экситоном [5]. Стоит также отметить, что, несмотря на наличие межзонной полосы поглощения в коротковолновой области спектра, второй более коротковолновый экситонный пик фотолюминесценции отсутствует. Это объясняется тем, что время преобразования легкой дырки в тяжелую гораздо меньше, чем время излучательной релаксации.

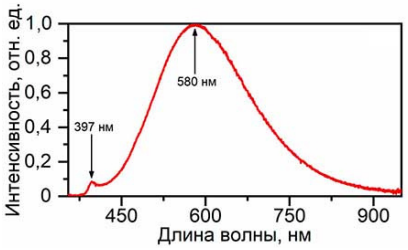


Рис. 2. Спектр люминесценции нанопластин селенида кадмия

Помимо экситонной люминесценции наблюдается широкая полоса, связанная с поверхностными состояниями. Эта полоса имеет следующие характеристики: положение максимума — 580 нм, FWHM = 196 нм.

Заключение

В данной работе исследованы абсорбционные и люминесцентные свойства полупроводниковых коллоидных нанопластин селенида кадмия толщиной 2,5 монослоя. В спектрах поглощения обнаружено два пика, связанных с межзонными переходами. В спектрах люминесценции наблюдается один экситонный пик, обусловленный рекомбинацией электрона и тяжелой дырки, а также полоса люминесценции, обусловленная поверхностными состояниями.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-02-00222А.

Литература

[1] Ekimov A.I., Onushchenko A.A. Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals. JETP Letters, 1981, vol. 34, pp. 345–349.

[2] Kondratenko T.S., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V. et al. Size-dependent optical properties of colloidal CdS quantum dots passivated by thioglycolic acid. Semiconductors, 2018, vol. 52. no. 9, pp. 1137–1144. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782618090087

[3] Соколикова М.С., Васильев Р.Б., Гаськов А.М. Синтез квазидвумерных коллоидных наночастиц селенида кадмия и формирование сульфидного монослоя на их поверхности. Журнал неорганической химии, 2014, т. 59, № 5, с. 577–577.

[4] Селюков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С., и др. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2015, т. 147, № 4, с. 687–701.

[5] Biadala L., Liu F., Tessier M.D. et. al. Recombination dynamics of band edge excitons in quasi-two-dimensional CdSe nanoplatelets. Nano Letters, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 1134–1139. DOI: https://doi.org/10.1021/nl403311n

УДК 535.371

Эффект фторирования лигандов из класса 1,3-дикетонов в процессах переноса энергии в комплексах европия

Заниздра Сергей Романович sergej.zanizdra@mail.ru
ФИАН

Метлин Михаил Тимофеевич mikhail.metlin@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана; ФИАН

Коршунов Владислав Михайлович vladkorshunov@bk.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана; ФИАН

Тайдаков Илья Викторович taidakov@mail.ru
ФИАН

Для возбуждения люминесценции лантаноидов создают координационное соединение с ионом лантаноида и проводят оптическое возбуждение лигандной части получившегося комплекса, с последующей передачей энергии возбуждения на ион. Среди большого количества различных лигандов перспективными являются органические лиганды из класса 1,3-дикетонов. Исследовано влияние фторирования радикалов в лигандах из данного класса на фотофизические свойства комплексов европия с ними. Показано, что фторирование радикалов в лигандах исследуемых комплексов приводит к значительным изменениям в их энергетической структуре.

Ключевые слова: *люминесценция, перенос заряда, координационные соединения, лантаноиды*

Для возбуждения люминесценции лантаноидов часто используется так называемый антенный эффект — создается координационное соединение с ионом лантаноида и производится оптическое возбуждение лигандной части получившегося комплекса, с последующей передачей энергии возбуждения на ион. Существует большое количество различных лигандов, использующихся для данных целей. Перспективными, например, являются органические лиганды из класса 1,3-дикетонов, которые имеют потенциал применения в качестве эффективных сенсибилизаторов люминесценции в координационных соединениях трехзарядных ионов лантаноидов [1, 2]. Помимо целевых свойств (высокий квантовый выход) люминофоров, данные лиганды обеспечивают им наличие практических свойств — высокую растворимость, пленкообразование, совместимость с технологией изготовления органических светодиодов [3, 4].

Методами молекулярной спектроскопии были исследованы свойства органических лигандов с различными радикалами и комплексов европия на их основе, синтезированных в ФИАН им. П.Н. Лебедева. В частности, получены спектры оптического поглощения, оптического возбуждения и люминесценции. На основании экспериментально полученных данных были установлены зависимости фотофизических свойств комплексов европия от химической структуры молекул лигандов (рис. 1).

Молекулы исследованных органических лигандов содержат 1,3-дикетонный фрагмент с двумя органическими заместителями (радикалами) в положениях 1 и 3. В качестве заместителей использовались две функциональные группы CF_3 и CH_3. В работе исследована зависимость фотофизических свойств комплексов европия с лигандами при различных комбинациях радикалов.

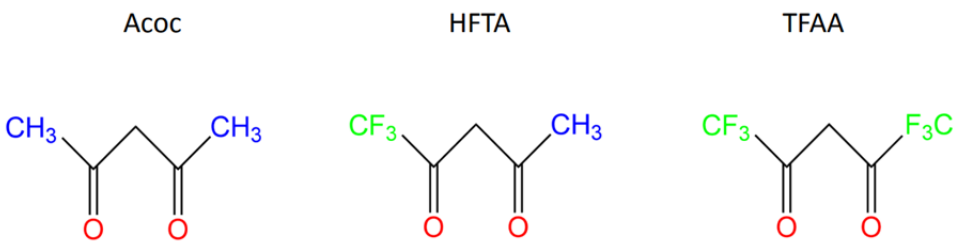


Рис. 1. Химические структуры лигандов в исследуемых комплексах

Спектры оптического поглощения растворов исследуемых веществ в ацетонитриле были зарегистрированы с помощью двухлучевого спектрофотометра Jasco V-770. Для всех образцов молярная концентрация составляла величину порядка 5×10^{-6} М. Также было исследовано влияние концентрационных эффектов на форму спектров оптического поглощения и на линейность в законе Бугера — Ламберта — Бера. Все исследуемые комплексы интенсивно поглощают (Е порядка 10^4 моль$^{-1}$·л·см$^{-1}$) оптическое излучение в спектральном диапазоне от 200 до 350 нм, причем длинноволновый край поглощения испытывает значительный батохромный сдвиг, что может быть следствием увеличения π-сопряжения в молекуле лиганда (рис. 2).

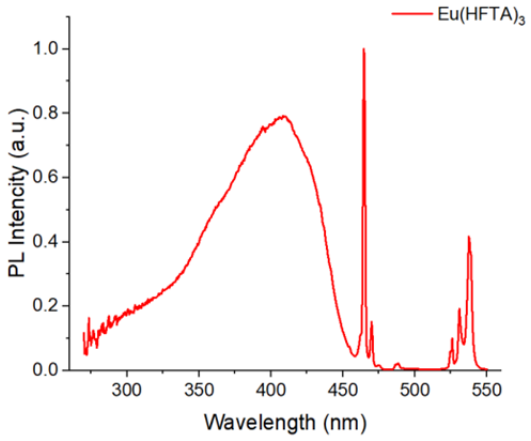


Рис. 2. Нормированный спектр оптического возбуждения, на котором показана полоса, связанная с состоянием с переносом заряда

Спектры оптического возбуждения также демонстрируют интересную закономерность. Экспериментально установлено, что в зависимости от типа радикала в данных спектрах наблюдается появление широкой полосы в диапазоне 350...400 нм, что может быть связано с появлением состояния с переносом заряда. Длина волны максимума данной полосы также зависит от химической структуры лиганда. Также были измерены внешние квантовые выходы для всех исследуемых соединений. Для вычисления коэффициентов сенсибилизации, характеризующих эффективность процесса передачи энергии от органического лиганда к иону, были также вычислены внутренние квантовые выходы.

Таким образом, в данной работе показано, что фторирование радикалов в лигандах исследуемых комплексов приводит к значительным изменениям в их энергетической структуре, что проявляется в изменении их фотофизических свойств, в частности, изменяется квантовый выход и коэффициент сенсибилизации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-13-00272)

Литература

[1] Bünzli J.-C.G. On the design of highly luminescent lanthanide complexes. Coordination Chemistry Reviews, 2015, vol. 293–294, pp. 19–47. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.10.013

[2] Bünzli J.-C.G. Lanthanide light for biology and medical diagnosis. Journal of Luminescence, 2016, vol. 170, part 3, pp. 866–878. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.07.033

[3] Metlin M.T. et al. Bright Yb3+ complexes for efficient pure near-infrared OLEDs. Dyes and Pigments, 2021, vol. 195, art. no. 109701. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109701

[4] Binnemans K. Rare-earth beta-diketonates. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, 2005, vol. 35, pp. 107–272. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-1273(05)35003-3

УДК 539

Замена тканеэквивалентных термолюминесцентных детекторов для космической дозиметрии: тетрабораты лития и магния против фтористого лития

Захарчук Иван Александрович zia18f064@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Дайбаге Даниил Саюзович daibagya@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Осадченко Анна Владимировна osadchenkoav@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Селюков Александр Сергеевич selyukov@lebedev.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Мосягина Ирина Владимировна IrVMosyagina@sniip.ru
АО «СНИИП»

Амброзевич Сергей Александрович s.ambrozevich@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Гехт Милана Эмилевна milana.gekht@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ивкина Ольга Викторовна Olvivkina@sniip.ru
АО «СНИИП»

Данилкин Михаил Игоревич mihhail.danilkin@ya.ru
МФТИ; Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Рассмотрены отклики различных тканеэквивалентных материалов, используемых для изготовления термолюминесцентных детекторов, в зависимости от значений энергий ионизирующего излучения, приведены их сравнительные диаграммы и графики дозовых зависимостей. Показана линейность отклика для таких детекторов, в связи с чем сделан вывод о возможности их перспективного использования для детектирования радиации в условиях космических полетов.

Ключевые слова: *тетраборат, радиация, дозиметр, отклик, детектирование оптического излучения, ионизирующее излучение*

Космическая радиация имеет сложный состав по видам и энергиям излучений. Значительную часть составляют протоны высоких энергий и различного рода тормозные излучения, возникающие непосредственно в обшивке и в деталях космических аппаратов.

Отклик материалов в зависимости от различных энергий ионизирующего излучения показан на рис. 1.

Таким образом, дозиметрия в космосе — это всегда дозиметрия смешанных радиационных полей, что подразумевает использование детекторов, не обладающих зависимостью отклика от энергии (см. рис. 1) [1]. Сильная зависимость отклика от энер-

гии излучения характерна для материалов, в составе которых присутствуют ядра с большим зарядом. Детекторы, для которых не требуется вводить поправку на энергию ионизирующих излучений, называют тканеэквивалентными. Только такие детекторы и возможно применять для дозиметрии смешанных радиационных полей.

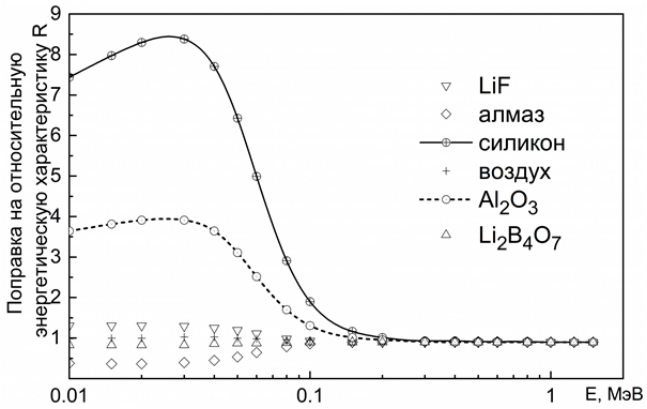


Рис. 1. Отклик различных материалов в зависимости от различных энергий ионизирующего излучения

До недавнего времени хорошими тканеэквивалентными термолюминесцентными детекторами (ТЛД) считались материалы на основе LiF, так как для этого материала почти отсутствует зависимость отклика от энергии падающего ионизирующего излучения (см. рис. 1). Однако в случае высокой плотности ионизации в треке, что как раз и будет характерно для протонов, радиационные дефекты в LiF начинают агрегировать, и тогда повреждение материала становится необратимым, приводя к постепенному накоплению металлического лития и молекулярного фтора, а также к накоплению сложных агрегатов из анионных вакансий, которые при нагревании восстанавливаются лишь частично. Данное явление приводит к значительным ошибкам в определении дозы при считывании таких ТЛД, зато в последнее время набирает популярность флуоресцентного детектирования и анализа распределения треков тяжелых частиц в облученных этими частицами кристаллах LiF [2].

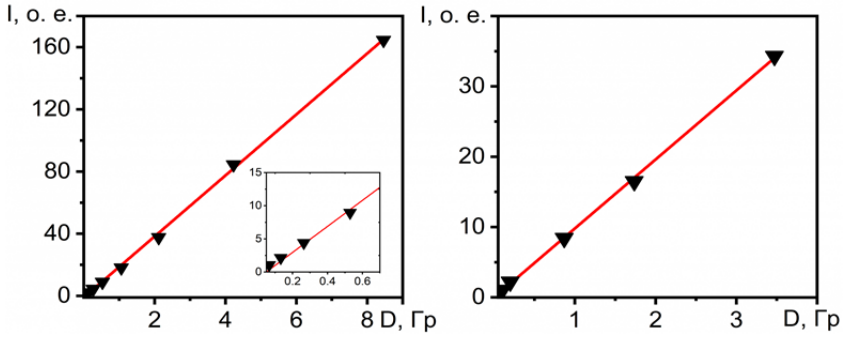


Рис. 2. Отклики для MgB4O7:Dy,Na (слева) и LiB4O7:Mn (справа) в зависимости от поглощенной дозы

Как видно из рис. 1, хорошей заменой ТЛД на основе LiF могли бы быть ТЛД на основе тетрабората лития ($Z_{эфф}$ = 7,4) и тетрабората магния ($Z_{эфф}$ = 8,4). Как было показано [3], сверхлинейность дозовой зависимости отклика и радиационная деградация детекторов на основе $Li_2B_4O_7$:Mn зависит от равномерности распределения марганца в материале и от введенного соактиватора. Работа над технологией изготовления детекторов [4] позволила обеспечить равномерное распределение примесей, а, следовательно, и хорошую линейность отклика в зависимости от дозы радиации. На рис. 2 показаны дозовые зависимости площади под основным дозиметрическим пиком для ТЛД-800 (на основе $Li_2B_4O_7$:Mn) и ТЛД-580н (на основе MgB_4O_7:Dy,Na).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-02-00222 А

Литература

[1] Selvam T. P., Keshavkumar B. Monte Carlo investigation of energy response of various detector materials in and brachytherapy dosimetry. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2010, vol. 11, no. 4, pp. 70–82.

[2] Bilski P., et al. Fluorescent imaging of heavy charged particle tracks with LiF single crystals. Journal of Luminescence, 2019, vol. 213, pp. 82–87.

[3] Danilkin M.I., et al. Manganese agglomeration and radiation damage in doped Li2B4O7. Radiation Measurements, 2019, vol. 126, art. no. 106134.

[4] Верещагина Н.Ю., Данилкин М.И. Способ получения люминесцентной керамики, люминесцентная керамика и детектор ионизирующего излучения. Патент 2 660 866 Российская Федерация, 2018, бюл. № 19, 9 с.

УДК 681.785.472

Измерение содержания жира и крупномасштабных примесей в молоке с помощью лазерной скаттерометрии

Игнатенко Дмитрий Николаевич DmitriyEK13104@yandex.ru
Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН

Асташев Максим Евгеньевич astashev@yandex.ru
Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН

Шкирин Алексей Владимирович AVShkirin@mephi.ru
Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН

Разработан малогабаритный лазерный скаттерометрический датчик для определения жирности молока, прокачиваемого через цилиндрический канал. Устройство работает путем регистрации углового распределения рассеянного излучения полупроводникового лазера, работающего на длине волны 532 нм, с помощью осесимметрично расположенного массива фотодиодов. Экспериментально установлено, что индикатриса светорассеяния коровьего молока имеет монотонную зависимость от жирности молока. Интенсивность на углах бокового или прямого рассеяния, нормированная на интенсивность обратного рассеяния, оказалась надежным информативным параметром. Построена полиномиальная аппроксимация калибровочной кривой зависимости содержания жира от нормированной интенсивности рассеяния, позволяющая измерять содержание жира в достаточно широком диапазоне ~ 0,01...10 %. Кроме того, интенсивность на углах прямого рассеяния зависит от присутствия в молоке крупномасштабных частиц. Устройство было протестировано в ламинарном режиме течения молока при скоростях потока до 100 мл/с.

Ключевые слова: *лазерные датчики, скаттерометрия, состав молока, молочный жир*

Ввведение

Контроль качество молочного производства напрямую зависит от автоматизации, в основе которой лежат различные сенсорные технологии. Информация о количественном содержании компонентов молока (жира, белков, лактозы, соматических клеток и др.) лежит в основе оценки качества молока, а также диагностики баланса питания и клинического состояния коров. Контроль состава молока в режиме реального времени особенно важен для оперативного реагирования на отклонения параметров физиологического состояния животных и своевременной корректировки рационов при снижении удоев. Очевидно, что эффективность молочного производства можно значительно повысить за счет использования недорогих и компактных приборов для встроенного анализа состава молока в процессе доения. Ввиду рекомендации использовать контрольные устройства, не приводящие к значительному падению давления в молочном шланге, при разработке датчиков качества молока для оборудования молочных ферм в первую очередь перспективны оптические методы диагностики, так как они методы позволяют проводить бесконтактную и неразрушающую диагностику с высокой чувствительностью и скоростью [1–3].

В нашей работе предлагается прототип датчика для определения содержания жира в потоке молока, исполненный в виде цилиндрической геометрии, совместимой с молокопроводами. Датчик основан на измерении углового распределения света, рас-

сеянного молоком, протекающим внутри оптически прозрачной цилиндрической стеклянной трубки, с помощью лазерного диода, работающего на видимой длине волны, вместе с аксиальной фотодиодной матрицей. Наряду с измерением содержания основных компонентов молока актуальной задачей является также выявление крупномасштабных примесей, таких как, например, соматические клетки. Эксперименты показывают, что, начиная с определенного уровня концентрации, наличие в молоке крупных примесей приводит к относительному изменению интенсивности прямого рассеяния по сравнению с чистым молоком. Таким образом, такой тип скаттерометрического датчика также способен указывать на концентрацию крупных примесей выше определенного уровня.

Схема прибора

Нами была собрана экспериментальная установка в соответствии с оптической схемой, представленной на рис. 1, которая представляет собой лазерный скаттерометр, измеряющий жирность молока. Излучение лазерного диода с длиной волны 532 нм диффузно рассеивается в молоке, протекающем через прозрачную цилиндрическую кварцевую трубку (внешний диаметр 15 мм, толщина стенки 1 мм). Концы трубки оканчиваются штуцерами для подсоединения молочных шлангов. Угловое распределение интенсивности рассеянного света регистрируется набором из восьми фотодиодов, расположенных по окружности с угловым шагом 18°. Радиус этой окружности выбран таким, чтобы он соответствовал фокусу воображаемой цилиндрической линзы, в которую превратилась бы трубка при заполнении водой. Фотодиоды разделены промежутками на три группы, охватывающие угловые диапазоны прямого рассеяния (0°, 18°, 36°), бокового рассеяния (72°, 90°, 108°) и обратного рассеяния (144°, 162°). Перед попаданием на фотодиоды поле рассеянного света ограничивается прямоугольными диафрагмами шириной 1 мм, выполненными в пластиковом кольце.

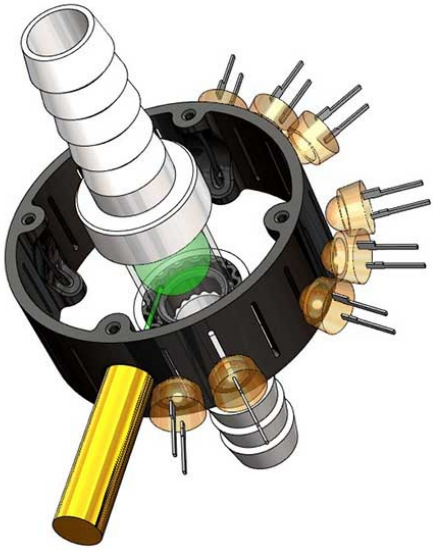


Рис. 1. Оптическая схема лазерного рефлектометрического датчика:
лазерный диод с длиной волны 532 нм; цилиндрическая трубка диаметром 15 мм; заполненная проточным молоком; аксиальная фотодиодная матрица; кольцо с прямоугольными диафрагмами

Результаты

Нами были зарегистрированы показания фотодиодов для образцов молока с номинальным процентным содержанием жира 0,05; 0,5; 1,5; 3,2; 6 и 10% при нормальных условиях (температура 20°C). Вычислив медианы фототока, мы фактически получили значения интенсивности рассеянного света при соответствующих углах, где фотодиоды расположены так, как показано на рис. 1. Таким образом, датчик измеряет угловое распределение рассеянного света, которое называется индикатрисой рассеяния. Вначале индикатриса рассеяния для проб молока измерялась в статическом случае, т. е. при нулевой скорости потока в пробирке (рис. 2). Молоко, заполняющее трубку диаметром ~1 см, является многократно рассеивающей средой, так как его оптическая толщина, оцениваемая по данным о коэффициентах рассеяния и поглощения молока в видимом диапазоне [4], превышает 10, а это означает, что выполняется условие преобладания многократного рассеяния [5, 6]. Как следствие, индикатрисы рассеяния, показанные на рис. 2, имеют типичный для многократно рассеивающей среды вид, а именно их значения возрастают от углов прямого рассеяния к углам обратного рассеяния, что согласуется с результатами теоретического моделирования для многократно рассеивающие среды [7].

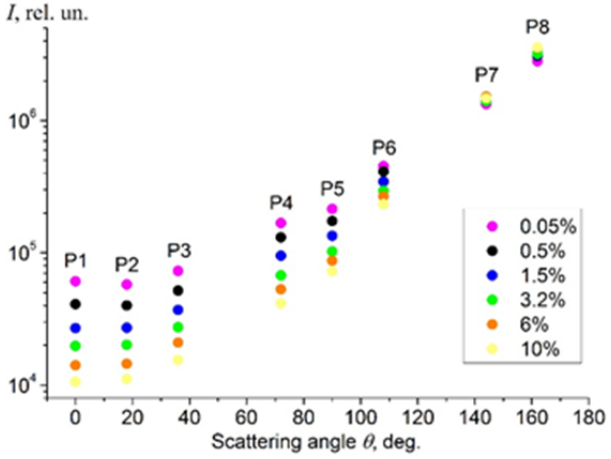


Рис. 2. Индикатриса рассеяния, измеренная для проб молока номинальной жирностью 0,05; 0,5; 1,5; 3,2; 6 и 10 % при нулевой скорости потока при температуре 20 °C. Длина волны лазера 532 нм

График (рисунок 2) демонстрирует монотонную зависимость интенсивности рассеяния $\boldsymbol{I}$ от содержания жира при каждом угле рассеяния $\boldsymbol{\theta}$. Также видно, что интенсивности рассеяния при углах обратного рассеяния 144° и 162° практически одинаковы для всех процентных долей жира в измеренных образцах молока.

Наши экспериментальные испытания показали, что использовать имеющиеся в схеме датчика (рис. 1) углы прямого рассеяния $\boldsymbol{\theta_i}$ = {0°, 18°, 36°} для измерения содержания жира нецелесообразно в связи с тем, что на интенсивность рассеяния под этими углами большее влияние оказывают крупные примесные частицы (этот эффект описан далее). Таким образом, измерения содержания жира более стабильны при углах бокового рассеяния $\boldsymbol{\theta_i}$ = {72°, 90°, 108°}.

Далее мы протестировали поведение индикатрисы рассеяния молока с крупномасштабными примесями. С этой целью сравнивались измерения, сделанные для чистого молока жирностью 1,5 % и того же молока, куда были добавлены соматические клетки с конечной концентрацией 10^6 см$^{-3}$ (рис. 3).

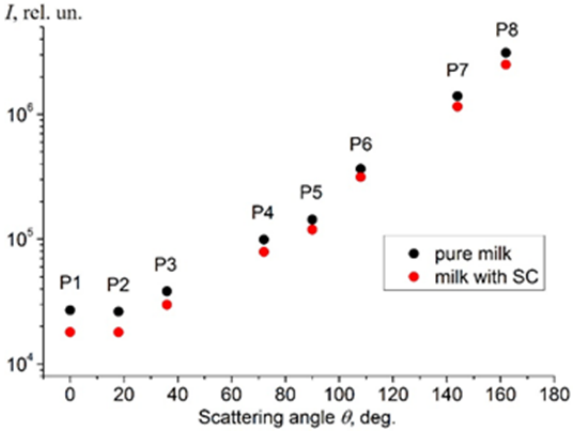


Рис. 3. Индикатриса рассеяния, измеренная для образцов молока номинальной жирностью 1,5 %: без крупномасштабных примесей (отмечено черным), с добавлением соматических клеток (СК) на уровне концентрации 106 см–3 (отмечено красным). Скорость потока молока в трубке равна нулю. Температура 20 °C. Длина волны лазера 532 нм

Отметим, что добавление соматических клеток мало влияет на соотношение интенсивностей бокового и обратного рассеяния на углах (72°, 90°, 108°). Это важный результат, который означает, что измерения содержания жира под этими углами не нарушаются присутствием соматических клеток.

Соотношения интенсивностей при углах прямого рассеяния $\boldsymbol{\theta_i}$ = {0°,18°,36°} могут служить индикаторами наличия в молоке крупных частиц.

Выводы

Результаты наших экспериментов показали, что, используя измерения светорассеяния в цилиндрической геометрии, можно разработать компактный и быстродействующий датчик процентного содержания молочного жира и уровня концентрации крупномасштабных примесей. Предлагаемый прототип датчика на основе лазерного диода с длиной волны 532 нм и кремниевых фотодиодов имеет относительно небольшие габариты и вес, что позволяет интегрировать его в различные доильные системы. Кроме того, измерение параметров состава молока в режиме реального времени также позволяет молочной промышленности сократить временные и финансовые затраты на подготовку молока. Мы ожидаем, что этот тип датчиков станет оптимальным решением для измерения содержания жира и концентрации крупномасштабных примесей в молоке.

Литература

[1] Pichal M. (ed.). Optical methods in dynamics of fluids and solids. Proceedings of an international symposium. In Proceedings of the Insti-tute of Thermomechanics Czechoslovak Academy of Sci-

ences, Liblice Castle, Czechoslovakia, 17–21 September 1984. Berlin, Germany, Springer, 1985. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-82459-3

[2] Cha S.S., Trolinger J.D. (eds.). Optical diagnostics in fluid and thermal flow. In Proceedings of the SPIE, International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation, San Diego, USA, 11–16 July 1993. 1993, vol. 2005.

[3] Optical methods and physics of colloidal dispersions. In Proceedings of the International Workshop on Optical Methods and the Physics of Colloidal Dispersions, Held in Memory of Prof. Dr. Klaus Schätzel, Mainz, Germany, 30 September 1996. Heidelberg, Germany, Steinkopff, 1997. DOI: https://doi.org/10.1007/BFb0110733

[4] Aernouts B., van Beers R., Watté R., Huybrechts T., Lammertyn J., Saeys W. Visible and near-infrared bulk optical prop-erties of raw milk. J Dairy Sci, 2015, vol. 98, pp. 6727–6738. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2015-9630

[5] Jönsson J., Berrocal E. Multi-Scattering software: part I: online accelerated Monte Carlo simulation of light transport through scattering media. Opt Express, 2020, vol. 28, pp. 37612–37638. DOI: https://doi.org/10.1364/OE.404005

[6] Regnima G.-O., Koffi T., Bagui O., Kouacou A., Kristensson E., Zoueu J., Berrocal E. Quantitative measurements of tur-bid liquids via structured laser illumination planar imaging where absorption spectrophotometry fails. Appl Opt, 2017, vol. 56, pp. 3929–3938. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.56.003929

[7] Tuchin V.V. Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnostics. Bellingham, WA, USA, SPIE, 2015. DOI: https://doi.org/10.1117/3.1003040

УДК 53.09

Эффекты деполяризованного рассеяния низкочастотного излучения на анизотропных металлических наночастицах при набухании полимерной мембраны в воде с разным изотопным составом

Исмаилов Серафим Микаэльевич ismailovsm@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Бункин Николай Федорович nbunkin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козлов Валерий Анатольевич vkozlov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Болоцкова Полина Николаевна bolotskova@inbox.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Изучена фотолюминесценция с поверхности полимерной мембраны Нафион при набухании в водных суспензиях наночастиц коллоидного золота. Было исследовано два вида суспензий коллоидного золота. В первую суспензию добавляли соли двухвалентных металлов, что приводило к агрегативной неустойчивости коллоидных наночастиц и образованию анизотропных кластеров. Во второй суспензии соли двухвалентных металлов отсутствовали, и суспензия представляла собой практически монодисперсную систему из сферически симметричных наночастиц коллоидного золота. Таким образом, если эти суспензии были приготовлены на основе воды с содержанием дейтерия 157 ppm, то добавки анизотропных коллоидных наночастиц кластерного типа приводили к стохастическим скачкам интенсивности люминесценции, в то время как в суспензиях сферически симметричных наночастиц стохастических осцилляций интенсивности люминесценции не наблюдалось. В суспензиях на основе воды, обедненной по дейтерию, стохастических осцилляций не наблюдалось ни для изотропных, ни для анизотропных наночастиц. Выяснено, что если поместить экспериментальную установку в пермаллоевый контейнер, т. е. обеспечить экранировку от возможных внешних низкочастотных источников, то стохастические осцилляции также не наблюдаются независимо от изотопного состава воды и анизотропных свойств наночастиц. Возникновение стохастических осцилляций связывается с деполяризованным рассеянием низкочастотной линейно поляризованной электромагнитной волны. Источником этого излучения, возможно, являются низкочастотные пульсации нейтронных звезд или белых карликов; линейный характер поляризации может быть связан с синхротронной природой этого излучения.

Ключевые слова: *люминесценция, полимеры, вода, фотолюминесценция, деполяризационное рассеяние, экранировка, дейтерий, коллоиды, наночастицы, изотопный состав*

Нафион — это полимерная протонно-обменная мембрана. Полимерная матрица состоит из тетрафторэтиленовой основы и подшитых к ней концевых сульфогрупп. Нафион благодаря формированию структуры отрицательно заряженных нанометровых каналов используется в качестве протонообменной мембраны в водородной энергети-

ке. В экспериментах по фотолюминесцентной спектроскопии было показано, что при погружении пластинки Нафиона в водный раствор происходит разматывание концевых волокон молекулы (сульфогрупп) в объем жидкости. Образуется своеобразная щетка, протяженность которой в объем воды может достигать сотен микрон. Размотанные в объем воды полимерные волокна подобны гликокаликсу (внеклеточному матриксу), которые расположены с внешней стороны липидного бислоя клеточной мембраны. Важно, что эффект разматывания полимерных волокон в объем воды зависит от содержания дейтерия в воде. Так, в природной воде (содержание дейтерия равно 157 ppm) размер области, занятой полимерными волокнами, порядка 300 микрон, в то время как для обедненной по дейтерию воде (содержание дейтерия равно 3 ppm) эффект разматывания отсутствует.

Мы изучали динамику набухания Нафиона в воде в зависимости от изотопного состава в экспериментах по люминесцентной спектроскопии. В этих экспериментах пластинка Нафиона размещалась параллельно оптической оси, т. е. эксперименты проводились в геометрии скользящего падения, а излучение накачки на длине волны 370 нм по оптоволокну подводилось через дно кюветы. Как было показано в наших предыдущих экспериментах, центрами люминесценции являются сульфогруппы, находящиеся на концах полимерных волокнах, размотанных в объем воды. В экспериментах исследовалась интенсивность люминесценции в спектральном максимуме (460 нм) в зависимости от времени вымачивания полимера. Начало отсчета времени вымачивания соответствует моменту заливки образца жидкости в ячейку.

Интенсивность люминесценции может быть аппроксимирована формулой

$$I(t) = A + kI_{pump}s_{lum}n_{Naf},$$

где I_{pump}— интенсивность накачки, s_{lum} — сечение люминесценции, n_{Naf} — приповерхностная плотность сульфогрупп — центров люминесценции.

В предположении, что сечение люминесценции является постоянной величиной, а приповерхностная плотность сульфогрупп уменьшается по мере набухания (проникновения молекул жидкости в приповерхностный слой), можно показать, что приповерхностная плотность сульфогрупп уменьшается по экспоненциальному закону.

В процессе набухания Нафиона в воде происходит диссоциация контактирующих с водой сульфогрупп $R{-}SO_3H + H_2O = R{-}SO_3^- + H_3O^+$, т. е. от сульфогруппы отрывается протон, и сульфогруппа оказывается отрицательно заряженной. Таким образом, на поверхности Нафиона присутствуют как электро-нейтральные, так и отрицательно заряженные сульфогруппы. По-видимому, и те, и другие сульфогруппы служат центрами люминесценции, поскольку люминесценция наблюдается как для сухого Нафиона (отрицательных сульфогрупп нет), так и погруженного в воду Нафиона. При этом в момент погружения не происходит резкого уменьшения интенсивности люминесценции несмотря на появление на поверхности Нафиона отрицательно заряженных сульфогрупп.

При изучении люминесценции необходимо учитывать возможность Форстеровского резонансного переноса энергии люминесцентного состояния от донора к акцептору люминесценции. Этот перенос возможен при расстоянии между донором и акцептором порядка 3...6 нм. При этом донор и акцептор должны быть центрами люминесценции, т. е. это сульфогруппы. В то же время сульфогруппы могут быть либо нейтральными, либо отрицательно заряженными. Если перенос энергии от донора к

акцептору осуществляется от нейтральной сульфогруппы к заряженной или наоборот, то такой процесс может сопровождаться также переносом электрона, что приводит к тушению люминесценции. равно нулю. Если расстояние между донором и акцептором фиксировано, то сечение люминесценции в среднем не меняется s_{lum}, т. е. интенсивность люминесценции в спектральном максимуме уменьшается из-за уменьшения в приповерхностном слое объемной плотности сульфогрупп в процессе набухания. Однако, если расстояние между сульфогруппами в процессе набухания каким-то образом меняется от времени, то сечение люминесценции также будет зависеть от времени. Можно предположить, что при эффективном сближении концов полимерных волокон сечение люминесценции будет уменьшаться, а при увеличении расстояния между концами волокон сечение люминесценции будет возрастать.

Ранее был рассмотрен эксперимент, в котором размотанные в объем воды полимерные волокна облучались ультразвуковой волной с помощью одного либо двух пьезоэлементов. Ультразвуковая волна была направлена поперек размотанных в объем воды волокон. В слое размотанных волокон ультразвук поглощался, что приводило к генерации акустических течений (акустический ветер). Эти течения эффективно сдвигали концы размотанных полимерных волокон. При этом, если используется один пьезоэлемент, то интенсивность люминесценции затухает по экспоненциальному закону, что достаточно хорошо воспроизводится в экспериментах. В то же время при использовании двух пьезоэментов, излучающих ультразвуковые волны навстречу друг другу, в поведении интенсивности люминесценции в зависимости от времени вымачивании наблюдаются характерные осцилляции, что связано с изменением расстояния между концами размотанных сульфогрупп. Это было проверено в эксперименте, где Нафион вымачивался в обедненной по дейтерию воде. В этом случае эффект разматывания отсутствует, т. е. ультразвук не может изменить расстояние между полимерными волокнами, которое остается фиксированным в течение всего эксперимента.

Возникает вопрос: можно ли изменить расстояние между полимерными волокнами с помощью внешнего электромагнитного излучения? Действительно, размотанные волокна являются диполями или монополями, поэтому поперечная электромагнитная волна со случайными поляризациями должна случайным образом менять расстояние между размотанными волокнами. Нами было выбрано излучение генератора шумового сигнала на частоте 100 МГц. Это излучение не поглощается в воде, что отражено в следующих формулах:

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega^2\tau^2)} + \varepsilon_\infty;$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_s)(\omega\tau)}{1 + (\omega^2\tau^2)};$$

$$\tau \approx 8{,}27\ ps.$$

Расстояние между излучающей антенной и установкой по люминесцентной спектроскопии составляло 1,5 м. Были использованы отражательные экраны для фиксации излучения на установке по люминесцентной спектроскопии (рис. 1).

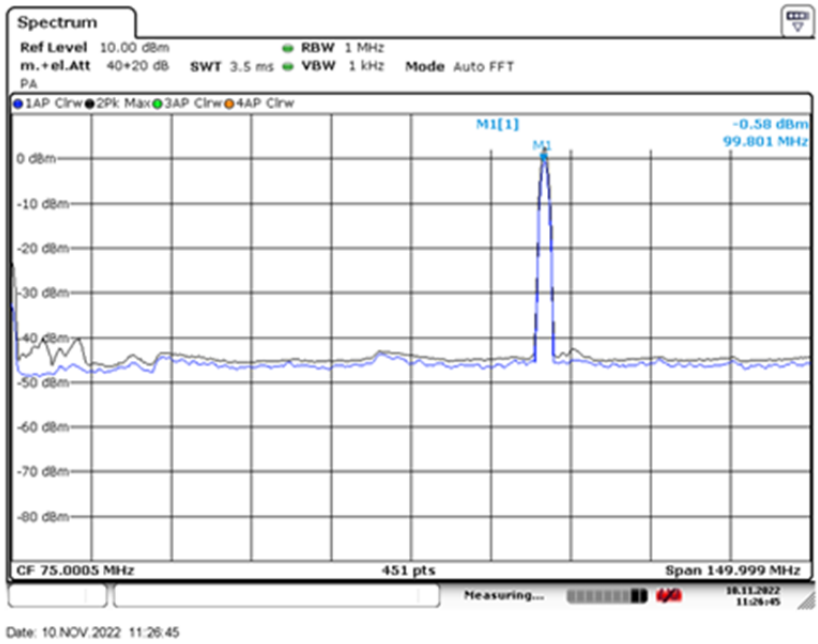


Рис. 1. Осциллограмма с экрана низкочастотного спектрометра (размер клетки по оси абсцисс соответствует примерно 17 МГц)

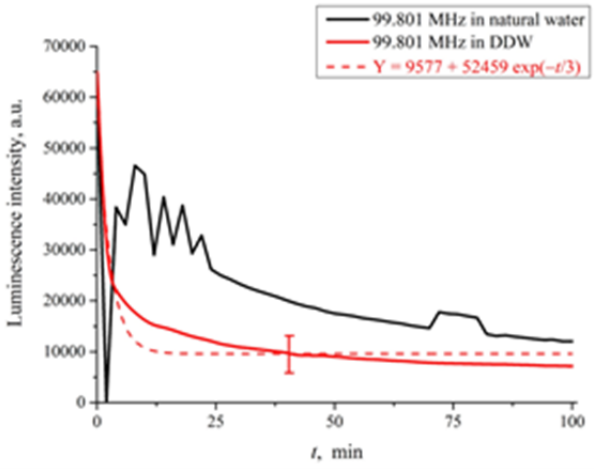


Рис. 2. Зависимость интенсивности люминесценции в спектральном максимуме при облучении установки по люминесцентной спектроскопии шумовым сигналом на частоте 99,8 МГц

На рис. 2 видно, что интенсивность люминесценции ведет себя случайным образом. Если Нафион вымачивается в обедненной по дейтерию воде, то стохастические осцилляции исчезают, и интенсивность люминесценции затухает по экспоненциальному закону, т. е. в этом случае сечение люминесценции постоянно. Таким образом, низкочастотное излучение способно менять расстояние между полимерными волокнами.

Оказалось, однако, что стохастические осцилляции возникают не только при облучении шумовым низкочастотным источником, но и при добавлении в воду, в которой вымачивается Нафион, металлических наночастиц. Были исследованы удлиненные и сферически симметрические наночастицы коллоидного золота и селена, а также наночастицы сферически симметричного коллоидного золота.

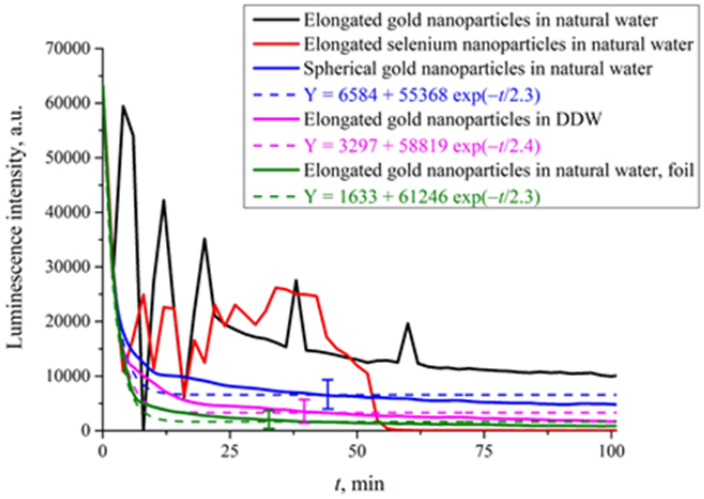


Рис. 3. Графики интенсивности люминесценции в спектральном максимуме в зависимости от времени вымачивания в водных суспензиях, содержащих удлиненные и сферически симметричные наночастицы коллоидного золота, удлиненные частицы селена

Суспензии наночастиц коллоидного золота, описанные на рис. 3, готовились на основе обычной природной воды и воды, обедненной по дейтерию. Кроме того, были изучены водные суспензии удлиненных наночастиц селена, приготовленные на основе природной воды. Наконец, были изучены водные суспензии удлиненных наночастиц коллоидного золота, приготовленные на основе природной воды при накрывании установки по фотолюминесцентной спектроскопии экраном, покрытым слоем алюминиевой фольги. На рис. 3 видно, что в том случае, если мы имеем дело с удлиненными (анизотропными) металлическими наночастицами, растворенными в природной воде, в зависимости интенсивности люминесценции от времени вымачивания наблюдаются стохастические осцилляции. Если суспензия содержит сферически симметричные наночастицы, стохастические осцилляции отсутствуют, интенсивность люминесценции убывает по экспоненциальному закону, и результаты достаточно хорошо воспроизводятся. В том случае, если суспензия анизотропных наночастиц приготовлена на основе воды, обедненной по дейтерию, стохастические осцилляции также отсутствуют, и интенсивность люминесценции убывает по экспоненциальному закону. Наконец, если установка по люминесцентной спектроскопии накрывается металлическим экраном, стохастические осцилляции интенсивности люминесценции также отсутствуют. Видно, что полученные экспоненциальные зависимости примерно одинаковы. Поскольку стохастические осцилляции не возникают в суспензиях на основе обедненной по дейтерию воды, для их возникновения необходимо разматывание полимерных волокон в объем жидкости. Кроме того, суспензия должна содержать анизотроп-

ные частицы. Наконец, если установка экранирована, то стохастические осцилляции также отсутствуют. Можно предположить, что осцилляции возникают в результате рассеяния низкочастотного внешнего линейно поляризованного излучения на анизотропных частицах. В результате эффектов деполяризации в плоскости поперек размотанных волокон возникают случайные компоненты электрического поля рассеянной волны, что вызывает колебания концов размотанных полимерных волокон, то есть возможны эффекты тушения и усиления люминесценции.

В недавно опубликованной статье в журнале «Nature» сообщалось об открытии магнетара, который излучает вспышки низкочастотного (в диапазоне 100 МГц) электромагнитного линейно поляризованного излучения. Эти вспышки следуют с периодом 18,18 мин. По нашей гипотезе, именно рассеяние этого излучения на анизотропных наночастицах приводит к стохастическим осцилляциям интенсивности люминесценции.

Временные зависимости интенсивностей люминесценции, полученных из водных суспензий анизотропного коллоидного золота на основе природной воды и из воды, облученной шумовым источником на частоте 100 МГц, были обработаны с помощью вейвлет-преобразования, т. е. был взят фурье-спектр от этих функций. На рис. 4 представлены зависимости спектральной плотности (квадрат спектральной амплитуды) от периода колебаний в минутах.

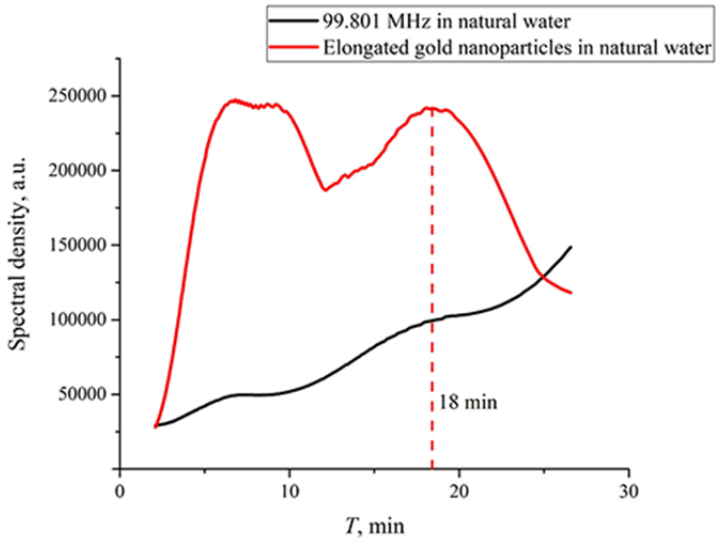


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности (квадрат спектральной амплитуды) от периода колебаний в минутах в экспериментах с водной суспензией анизотропного коллоидного золота на основе природной воды и водой, облученной шумовым источником на частоте 100 МГц

Видно, что спектральная плотность случайных колебаний, полученных при облучении воды шумовым источником, монотонно растет с ростом периода колебаний, в то время как в случае суспензии на основе обычной воды, содержащей анизотропные наночастицы коллоидного золота, четко видно два максимума, причем низкочастотный максимум относится к периоду порядка 18 мин. Таким образом, стохастические колебания интенсивности люминесценции, которые наблюдаются при добавлении в

воду анизотропных наночастиц коллоидного золота, могут быть связаны с эффектами деполяризации при рассеянии от удаленного радиоисточника, о котором сообщалось в журнале «Nature».

Литература

[1] Bunkin N.F., Lyakhov G.A., Kozlov V.A., Shkirin A.V., Molchanov I.I. et al. Time dependence of the luminescence from a polymer membrane swollen in water: Concentration and isotopic effects. Phys Wave Phen, 2017, vol. 25, pp. 259–271. DOI: https://doi.org/10.3103/S1541308X17040045

[2] Bunkin N.F., Shkirin A.V., Kozlov V.A., Ninham B.W., Uspenskaya E.V., Gudkov S.V. Near-surface structure of Nafion in deuterated water. J Chem Phys, 2018, vol. 149, art. 164901. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5042065

[3] Ninham B.W., Bolotskova P.N., Gudkov S.V., Juraev Y., Kiryanova M.S., Kozlov V.A., Safronenkov R.S., Shkirin A.V., Uspenskaya E.V., Bunkin N.F. Formation of water-free cavity in the process of Nafion swelling in a cell of limited volume; effect of polymer fibers unwinding. Polymers, 2020, vol. 12, art. 2888. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12122888

[4] Mauritz K.A., Moore R.B. State of understanding of Nafion. Chem Rev, 2004, vol. 104, pp. 4535–4585. DOI: https://doi.org/10.1002/chin.200450273

УДК 535

Разработка подхода по осушению пробы выдыхаемого воздуха человека

Карпов Иван Александрович kia21f012@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Фуфурин Игорь Леонидович igfil@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Небритова Ольга Александровна onebritova@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Анфимов Дмитрий Романович anfimovdr@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Дёмкин Павел Павлович Demkin.Pavel1996@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

В настоящий момент 6 % от всего населения планеты больны сахарным диабетом обоих типов, 4 % больны бронхиальной астмой. Актуальной задачей является разработка неинвазиного метода диагностирования этих и других болезней. Рассмотрен и изучен подход подготовки проб выдыхаемого воздуха человека для диагностирования вышеуказанных заболеваний с помощью метода, основанного на инфракрасной лазерной спектроскопии.

Ключевые слова: *выдыхаемый воздух, нафионовый осушитель, инфракрасная спектроскопия, спектральный анализ*

Введение

В приведенной работе объектом исследований является выдыхаемый воздух. С помощью ИК-квантово-каскадного лазера ставятся эксперименты с пробами выдыхаемого воздуха (ВВ) для обнаружения в них веществ-маркеров. Данные о присутствии некоторых веществ, таких как ацетон, оксид азота и других, в ВВ пациента можно использовать для диагностирования у него таких заболеваний как диабет, астма и т. д. [1].

Эта статья посвящена методу по исследованию ВВ, который основывается на спектроскопии, а точнее на получении спектра ВВ [2]. Необходимо точно определять спектральные линии веществ-маркеров, содержащихся в малых концентрациях. Проблемой, препятствующей спектральному анализу, является вода. Известно, что у воды много спектральных линий (рис. 1).

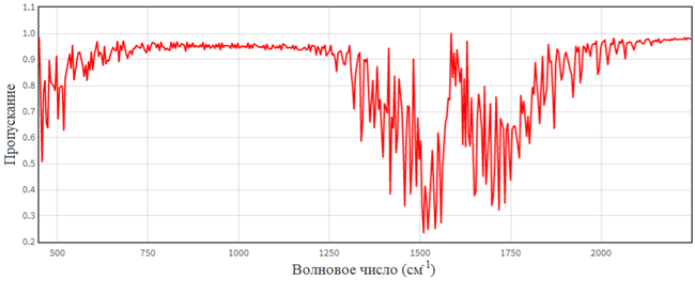


Рис. 1. Спектр пропускания воды по NIST

При получении спектра неосушенной пробы, вода создает шум, который мешает определению веществ-маркеров. Именно поэтому перед проведением эксперимента пробу необходимо осушать.

Материалы и методы

Существует много различных способов осушения проб ВВ, такие как криоловушка, капиллярная колонка, адсорбционные осушители и т. д. Для целей, преследуемых в этой работе, отлично подходит нафионовый осушитель.

Такие осушители представляют собой конструкцию из двух трубок, одна из которых находится внутри другой, подобно теплообменнику. Влажный газ двигается по внутренней трубке, выполненной из нафиона, омываемой сухим газом (в нашем случае азотом). Движущей силой процесса является разность во влажности этих двух потоков (рис. 2).

В данной работе использован осушитель газа серии MD фирмы Perma Pure, в котором происходит влагообмен между корпусом и трубкой, что позволяет осуществить передачу водяного пара между двумя противоточными газовыми потоками. Устройство состоит из внутренней трубки из нафионового полимера, окруженной внешней трубкой из различных инертных материалов. Водяной пар селективно сорбируется на стенках внутренней нафионовой трубки и переходит через ее стенки в поток чистого газа [3]. Движущей силой перехода является разность в парциальном давлении водяного пара с разных сторон трубки.

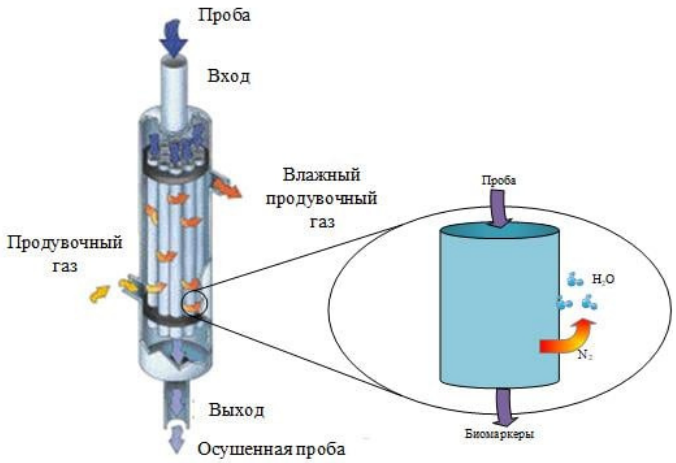


Рис. 2. Схема работы нафионового осушителя

Как правило, поток пробы движется по внутренней трубке, а чистый газ движется в противоположном направлении внутри корпуса. Сухой газ, входящий в осушитель рядом с патрубком выхода пробы, является носителем для удаления водяного пара из пробы. В качестве чистого воздуха может быть использован воздух с точкой росы при –40 °С, азот или другой газ. Важно сохранить пробу в газообразном состоянии, чтобы избежать проблем, возникающих при контакте мембраны с водой. Если в осушитель попадает вода, эффективность резко падает, а также может возникнуть неисправ-

ность. Внутренняя трубка удлиняется примерно на 10 % при насыщении водой. Это вызывает сворачивание трубки внутри корпуса, уменьшение эффективности осушки и падение расхода.

При использовании этого метода осушенная проба после выхода из осушителя возвращается обратно для использования в качестве чистого воздуха. Это предпочтительный метод благодаря своей простоте.

Расчеты и результаты

Поскольку в методе противотока проба используется в качестве чистого газа, через осушитель проходит воздух с расходом, необходимым исключительно для анализа пробы, что позволяет достигнуть высокую эффективность осушения. Для того, чтобы определить расход чистого газа, необходимого для реализации метода разделения пробы, используется формула (1):

$$V_c = \frac{V_p}{\left(\frac{P_p}{2P_c}\right)} - 1, \quad (1)$$

где V_c — расход чистого газа; P_c — давление чистого газа; V_p — расход пробы; P_p — давление пробы.

В этом случае разряжение чистого газа должно быть по крайней мере на уровне 15“ ртутного столба, более высокое разряжение еще предпочтительнее. Такой уровень разряжения необходим для создания необходимого соотношения 2:1 между расходом чистого газа и пробы, базирующегося на реальном объемном расходе.

Экспериментально была посчитана степень осушения ВВ нафионовым осушителем. Данные для расчетов брались из экспериментов, проведенных 24.08.2022 г. в 13:00 при температуре воздуха 30 °C и влажности 34 % (рис. 3).

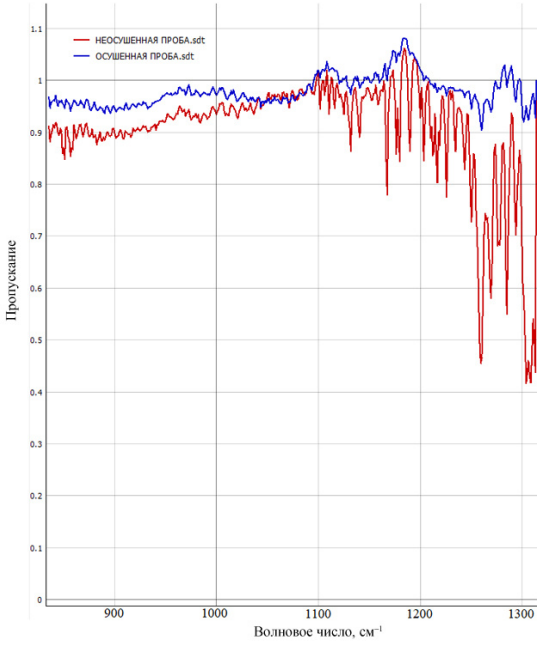


Рис. 3. Результат эксперимента: синим цветом указан нормированный спектр осушенной пробы; красным цветом — нормированный спектр неосушенной пробы

Были рассчитаны несколько линий полученных спектров, и с помощью закона Бугера — Ламберта — Бера (2) [4] была подсчитана степень осушения ВВ нафионовым осушителем:

$$I = I_o \cdot e^{a_\lambda lc}, \quad (2)$$

где I — интенсивность излучения прошедшего через среду; I_o — интенсивность падающего на вещество излучения; a_λ— коэффициент поглощения среды для данной длины волны; l — оптический путь; c — концентрация вещества.

Подводя итоги, можно сказать, что в приведенной работе был выявлен и изучен наиболее подходящий метод осушения пробы ВВ для ее спектрального анализа с помощью ИК-квантово-каскадного лазера.

Информация о гранте

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г. № 729

Литература

[1] Berezhanskiy P., Golyak I., Anfimov D., Kareva E., Scherbakova A., Demkin P., Nebritova O., Morozov A. Deep learning for type 1 diabetes mellitus diagnosis using Infrared quantum cascade laser spectroscopy. Materials, 2022, vol. 15, no. 9, art. no. 2984. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15092984

[2] Anfimov D., Fufurin I., Golyak I., Morozov A. Design of an analyzer based on a quantum cascade laser for substance identification by infrared reflected radiation. Proceedings of the Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI. SPIE, 2021, vol. 11775, pp. 115-122. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2589238

[3] Welp L., Keeling R., Weiss R., Paplawsky W., Heckman S. Design and performance of a Nafion dryer for continuous operation at CO2 and CH4 air monitoring sites. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, vol. 6, iss. 5, pp. 1217–1226. DOI: https://doi.org/10.5194/amt-6-1217-2013

[4] Мальцев А.А. Молекулярная спектроскопия. Москва, Изд-во МГУ, 1980, 272 с.; с. 97.

УДК 57.087.1

Исследование возможности мультимодального применения спектроскопии обратного рассеяния и термографии для раннего обнаружения очагов воспаления в биологических тканях

Колпаков Александр Владимирович Kolpakovalexx@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Турчанинов Сергей Олегович tso@inbox.ru
АО «Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Щербаков Михаил Иванович info@irtis.ru
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

Работа посвящена актуальной научно-технической задаче разработки и внедрению в клиническую практику аппаратно-программных комплексов и систем поддержки принятия медицинских решений на основе мультимодального применения оптических и термографических методов диагностики с целью обнаружения ранних стадий, измерения и контроля динамики патологических процессов. В ходе исследования in vivo были зарегистрированы серии спектров воспаленного и интактного участков десны в диапазоне от 400 до 1100 нм, а также термографическое изображение воспаленного участка десны на фоне интактных тканей, установлены статистически значимые различия сигналов воспаленного и невоспаленного участков и показана целесообразность дальнейшего исследования возможности мультимодального применения спектроскопии обратного рассеяния и термографии для раннего обнаружения очагов воспаления в биологических тканях на выборке пациентов и нозологий большего объема.

Ключевые слова: *спектроскопия, термография, мультимодальная система, система поддержки принятия решений, диагностика*

Важным преимуществом оптических методов диагностики, в частности, спектроскопии обратного рассеяния, является их неинвазивность и возможность обнаружения структурных неоднородностей в тканях, залегающих на глубине [1]. В результате исследований опубликованных рядом лабораторий, показана эффективность метода спектроскопии обратного рассеяния для обнаружения оптических неоднородностей, в том числе, онкологических новообразований в биологических тканях как *ex vivo,* так и i*n vivo* [2–13]. В частности, показана эффективность метода инфракрасной спектроскопии обратного рассеяния для обнаружения предраковых поражений в тканях слизистой оболочки рта *in vitro, n*о результатам исследования ротовых жидкостей[14, 15]. В работе [13] в результате эксперимента на небиологических моделях, показано, что погрешность определения оптических параметров методом спектроскопии обратного рассеяния не превышает 10 %.

В результате исследований, выполненных на кафедре биомедицинских технических систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность применения оптических методов диагностики для обнаружения на ранней стадии очагов воспаления пародонта методом ИК диафаноскопии в проходящем неионизирующем лазерном излучении ближнего ИК диапазона [16, 17], обнаружения методом спектроскопии нейроваскулярных структур в ходе нейрохи-

ргического вмешательства [18, 19], очагов предраковых поражений в слизистой оболочке рта.

В то же время обнаружение воспалительных очагов и нарушений кровоснабжения возможно с применением метода термографической визуализации, показавшим свою эффективность в диагностике поражений периферических артерий [20], воспалительных очагов [4], ревматоидного артрита, дерматологических заболеваний [21].

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка и внедрение в клиническую практику аппаратно-программных комплексов (АПК) и систем поддержки принятия медицинских решений (далее – СППР) на основе мультимодального применения оптических и термографических методов диагностики с целью обнаружения ранних стадий, измерения и контроля динамики патологических процессов.

Внедрение в клиническую практику указанных АПК и СППР обеспечит следующие улучшения диагностического процесса:

- минимизация фактора субъективной оценки информации при визуальном наблюдении медицинским специалистом;
- обнаружение изменений характеристик строения тканей на ранних, самых благоприятных для диагностики и лечения стадиях патологии;
- автоматизация и повышение скорости и качества диагностической процедуры;
- автоматизированный контроль эффективности лечения.

В настоящей работе представлены предварительные результаты апробации метода спектроскопии в сочетании с методом термографии для обнаружения очагов воспаления в тканях пародонта. Регистрация спектров обратного рассеяния проводилась с применением спектрометра Thorlabs CCS 200M и источника широкополосного некогерентного излучения в диапазоне от 400 до 2000 нм. Регистрация термографических изображений осуществлялась с помощью термографа ИРТИС-2000 МЕ.

В ходе исследования у добровольца in vivo были зарегистрированы серии из 10 спектров воспаленного и интактного участков десны в диапазоне от 400 до 1100 нм, а также термографическое изображение воспаленного участка десны на фоне интактных тканей (рис. 1, 2).

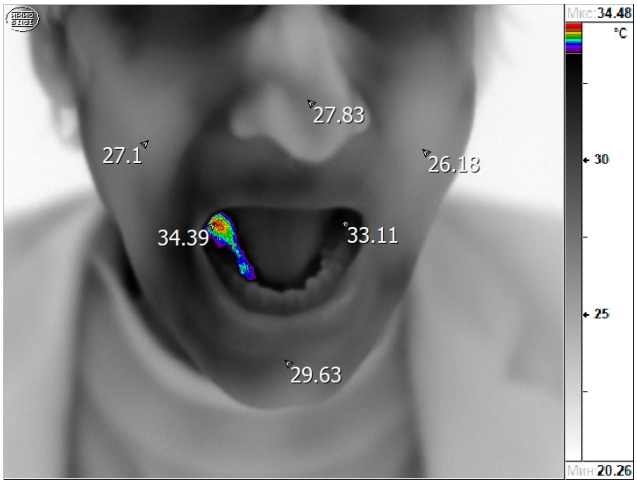


Рис. 1. Термограмма воспаленного участка десны на фоне интактных тканей

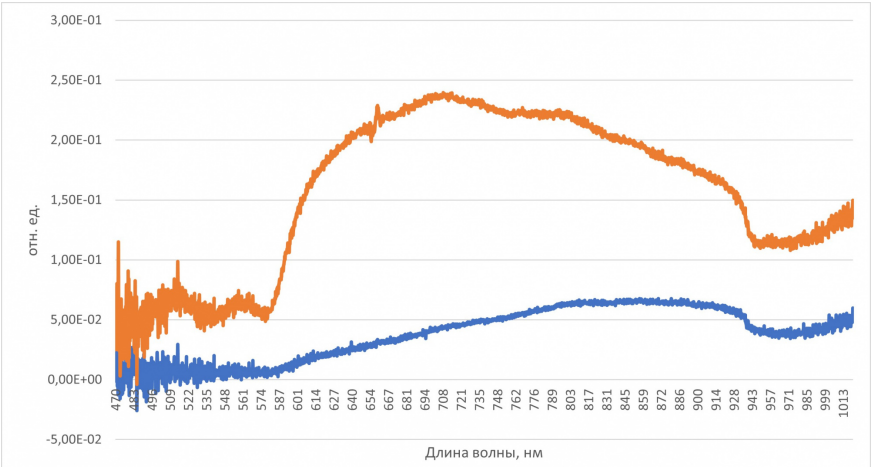


Рис. 2. Спектры обратного рассеяния интактного (желтый график) и воспаленного (синий график) участка десны

В результате анализа зарегистрированных спектральных и термографических данных установлены статистически значимые различия между воспаленным и невоспаленным участком десны в диапазоне длин волн от 450 до 1050 нм, а также различия температуры воспаленного и невоспаленного участка.

Таким образом, целесообразно продолжение исследования возможности мультимодального применения спектроскопии обратного рассеяния и термографии для раннего обнаружения очагов воспаления в биологических тканях на выборке пациентов и нозологий большего объема.

В ходе дальнейшего исследования планируется определение диагностических перспектив и характеристик, определение технических требований к аппаратным и программным средствам мультимодальной диагностической системы, разработка диагностических критериев, алгоритмов и программного обеспечения системы поддержки принятия решения.

Литература

[1] Синяева М.Л., Мамедов А.А., Адмакин О.И. Метод флюоресцентной диагностики в стоматологии. Стоматология детского возраста и профилактика, 2007, № 3, с. 26—30.

[2] Фатталь Р.К., Аммаев М.Г., Мелехов С.В. Оценка эффективности инфильтрации начального кариеса материалом ICON (DMG, Германия) (клинико-лабораторное исследование). Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2014, с. 189–193.

[3] Булгакова Н.Н., Волков Е.А., Позднякова Т.И. Аутофлуоресцентная стоматоскопия как метод онкоскрининга заболеваний слизистой оболочки рта. Российский стоматологический журнал, 2015, № 19 (1), с. 27–30. DOI: https://doi.org/10.17816/dent.39336

[4] Wilder-Smith P., Holtzman J., Epstein J., Le A. Optical diagnostics in the oral cavity: an overview. Oral Diseases, 2010, vol. 16, pp. 717–728. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1601-0825.2010.01684.x

[5] Balevi B. Evidence-based decision making: should the general dentist adopt the use of the VELscope for routine screening for oral cancer? J Can Dent. I Ass, 2007, vol. 73 (7), pp. 603–606.

[6] Кириллова В.П., Каганов О.И., Габриелян А.Г., и др. Методы ранней диагностики рака слизистой оболочки полости рта. Аспирантский вестник Поволжья, 2019, № 5–6, с. 86–90. DOI: https://doi.org/10.17816/2072-2354.2019.19.3.86-90

[7] Mezhevikina G.S., Glukhova E.A. Modern diagnostic methods precancerous and cancerous changes of the oral mucosa. Science of the young (Eruditio Juvenium), 2018, vol. 6 (4), pp. 600–606. DOI: https://doi.org/10.23888/HMJ201864600-606

[8] Mendes S.F. et al. Techniques for precancerous lesion diagnosis. Journal of Oncology. 2011, vol. 2011, art. 326094. DOI: https://doi.org/10.1155/2011/326094

[9] Brouwer de Koning S.D., Baltussen E.J., Karakullukcu M.B., Dashtbozorg B., Smit L., Dirven R., Hendriks B.H., Sterenborg H.J.C., Ruers T.J. Toward complete oral cavity cancer resection using a handheld diffuse reflectance spectroscopy probe. J Biomed Opt, 2018, vol. 12, art. 121611. DOI: https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.12.121611

[10] Тучин В.В. Оптическая биомедицинская диагностика. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2007, 560 с.

[11] Greening G.J., James H.M., Dierks M.K., Vongkittiargorn N., Osterholm S.M., Rajaram N., Muldoon T.J. Towards monitoring dysplastic progression in the oral cavity using a hybrid fiber-bundle imaging and spectroscopy probe. Sci Rep, 2016, vol. 6 (1), art. 26734. DOI: https://doi.org/10.1038/srep26734

[12] Yu B., Shah A., Nagarajan V.K., Ferris D.G. Diffuse reflectance spectroscopy of epithelial tissue with a smart fiber-optic probe. Biomed Opt Express, 2914, vol. 5, pp. 675–689. DOI: https://doi.org/10.1364/BIOMED.2014.BS3A.14

[13] Idrees B.S., Wang Q., Khan M.N., Teng G., Cui X., Xiangli W., Wei K. In-vitro study on the identification of gastrointestinal stromal tumor tissues using laser-induced breakdown spectroscopy with chemometric methods. Biomed Opt Express, 2022, vol. 13, pp. 26–38. DOI: https://doi.org/10.1364/BOE.442489

[14] Abati S., Bramati C., Bondi S., Lissoni A., Trimarchi M. Oral cancer and precancer: A narrative review on the relevance of early diagnosis. Int J Environ Res Public Health, 2020, vol. 8; 17 (24), art. 9160. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph17249160

[15] Moy A.J., Tunnell J.W. Chapter 17 – Diffuse Reflectance Spectroscopy and Imaging. In: Imaging in Dermatology. edn. MR Hamblin, P Avci, and GK. Gupta, eds. Academic Press, 2016, pp. 203–215.

[16] Колпаков А.В., Юдин И.Н., Зорина О.А., Спиридонов И.Н. Ранее обнаружение очагов воспаления в мягких тканей пародонта с помощью инфракрасной диафаноскопии. Медицинская техника, 2016, № 2 (296), с. 10–13.

[17] Колпаков А.В. Биотехническая система инфракрасной диафаноскопии мягких тканей пародонта. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2018.

[18] Сафонова Л.П., Орлова В.Г., Шкарубо А.Н. Исследование нейроваскулярных структур с помощью фазово-модуляционной спектрофотометрии. Оптика и спектроскопия, 2019, т. 126, № 6, с. 820.

[19] Orlova V.G., Safonova L.P., Soloveva P.M. In vitro study of optical properties of the central rvous system components. EIConRus. St. Petersburg and Moscow, 2020, p. 1567. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039169

[20] Ring E.F., Ammer K. Infrared thermal imaging in medicine. Physiol Meas, 2012, vol. 33 (3), pp. 33–46. DOI: https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/R33

[21] Jiang L.J., Ng E.Y.K., Yeo A.C.B., Wu S., Pan F., Yau W.Y., Chen J.H., Yang Y. A perspective on medical infrared imaging. Journal of Medical Engineering & Technology, 2005, vol. 29 (6), pp. 257–267. DOI: https://doi.org/10.1080/03091900512331333158

УДК 535.37

Моделирование электронной структуры и процессов переноса энергии в комплексах иона Eu(III)

Коршунов Владислав Михайлович vladkorshunov@bk.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Тайдаков Илья Викторович taidakov@mail.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Выполнено теоретическое моделирование энергетической структкуры и процесса переноса энергии между синглетным и триплетным состоянием в органическом лигандном окружении в составе координационных соединений иона Eu(III). Для достижения поставленной цели были исследованы новые комплексы иона Eu(III) с лигандным окружением из класса β-дикетонатов. В качестве заместителя в лигандах были выбраны пятичленные гетероциклы с различными гетероатомами: азота (N), кислорода (O) и серы (S).

Ключевые слова: *люминесценция, квантовая механика, квантовая химия, лантаноиды*

Метало-органические соединения ионов лантаноидов Ln^{3+} активно исследуются последние три десятилетия. Интерес к таким комплексам объясняется широким спектром возможных практических применений [1]. Это связано с высокой квантовой эффективностью (до 100 %) и узкополосным спектром излучения. Люминесценция таких веществ обусловлена внутриконфигурационными *f–f*-переходами иона, которые являются запрещенными по правилам отбора Лапорта [2]. Однако молекулы органического лиганда в составе комплекса с одной стороны частично снимают запрет, а с другой при поглощении энергии света переходят в возбужденное состояние с последующей передачей энергии электронного возбуждения на ион. После светопоглощения лигандное окружение иона переходит в возбужденное синглетное состояние. Затем посредством интеркомбинационной конверсии (ISC) молекула лиганда переходит в возбужденное триплетное состояние [3].

В настоящее время не существует надежной модели, способной предсказать эффективность переноса энергии внутри лигандного окружения и от лиганда к центальному иону. В частности, плохо изучено, как варьирование ароматической части лигандного окружения влияет на скорость синглет-триплетного перехода.

В рамках данной работы была поставлена цель с помощью методов квантовой химии установить влияние тяжелого гетероатома в заместителе β-дикетонного лиганда в составе координационных соединений трехвалентного иона Eu^{3+} на скорость интеркомбинационной конверсии, а также на структуру энергетических уровней лиганда. Для достижения поставленной цели были исследованы новые комплексы иона Eu^{3+} с лигандным окружением из класса β-дикетонатов. В качестве заместителя в лигандах были выбраны пятичленные гетероциклы с различными гетероатомами: азота (N), кислорода (O) и серы (S). Кроме того был получен известный комплекс с фенильной группой в роли заместителя в качестве материала для сравнения, поскольку данный заместитель не содержит гетероатомов.

Моделирование проводилось с помощью метода теории функционала электронной плотности, ее аналогом — нестационарной теории функционала электронной плотности для возбужденных состояний, а также на более высоком уровне теории с применением много конфигурационного метода самосопряженного поля полного активного пространства (CASSCF). Известно, что метод CASSCF плохо учитывает динамическую электронную корреляцию. Поэтому данный подход использовался для оптимизации геометрий молекул и для оптимизации наборов орбиталей для каждого состояния, а энергии состояний уточнялись с помощью модели Меллера-Плессета второго порядка в рамках теории возмущений (XMCQDPT2). Данные расчеты проводились с помощью программного пакета FireFly. Скорость конверсии ISC была рассчитана по «золотому правилу» Ферми:

$$k_{ISC}^{IF} = \frac{4\pi^2}{h}\langle \Psi_I^1 | H_{SO} | \Psi_F^3 \rangle^2 | \langle \chi_0 | \chi_N \rangle |^2 \rho,$$

где H_{SO} — оператор спин-орбитального взаимодействия; Ψ — волновые функции начального и конечного состояний; $\langle \chi_0 | \chi_N \rangle$— параметр неадиабатичности; ρ — плотность энергетических состояний. Матричные элементы спин-орбитального взаимодействия рассчитывались с помощью формализма Брейта — Паули, имплементированного в программный пакет Gamess US.

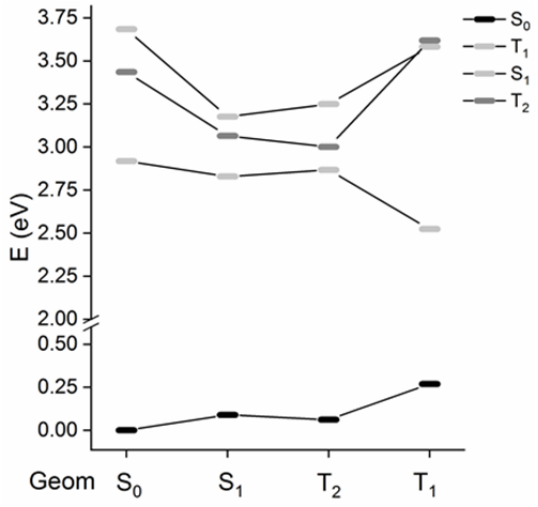


Рис. Энергетическая диаграмма для исследованного комплекса

Для всех четырех соединений были получены диаграммы энергетических уровней лигандной части комплексов. На рисунке представлена одна из них для вещества, содержащего гетероатом серы (S). Обнаружено, что для всех исследованных соединений ниже первого возбужденного синглетного состояния S_1 лежат два триплетных T_1 и T_2. При этом, несмотря на маленькую энергетическую щель между S_1 и T_2 конверсия происходит из синглетного уровня S_1 в первое триплетное состояние T_1. Это объясняется малой величиной матричного элемента перехода $S_1 - T_2$ по сравнению с элементом, рассчитанным для перехода $S_1 - T_1$. Обнаружено, что введение более тя-

желого гетеро атома приводит к увеличению скорости конверсии. Полученные характерные времена данного процесса имеют порядок наносукунд.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-13-00272.

Литература

[1] Weissman S.I. Intramolecular Energy Transfer The Fluorescence of Complexes of Europium. J Chem Phys, 1942, vol. 10, no. 4, pp. 214–218.

[2] Beeby A., Clarkson I., Dickins R. et al. Non-radiative deactivation of the excited states of europium, terbium and ytterbium complexes by proximate energy-matched OH, NH and CH oscillators: an improved luminescence method for establishing solution hydration states. J Chem Soc, 1999, vol. 2 (2), p. 493. DOI: https://doi.org/10.1039/A808692C

[3] Varaksina E.A., Vitukhnovsky A.G., Datskevich N.P., Taidakov I.V., Ambrozevich S.A. Experimental determination of energy transfer in Eu(III) complexes based on Pyrazole-substituted 1, 3-dDiketones. Journal of Russian Laser Research, 2015, vol. 36 (6), pp. 602–607. DOI: https://doi.org/10.1007/s10946-015-9538-4

[4] Korshunov V.M. et al. Candle light-style OLEDs with benzochalcogenadiazoles cores. Dyes and Pigments, 2021, vol. 185, art. 108917. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108917

УДК 53.09

Набухание полимерной мембраны в воде с разным изотопным составом; управление динамикой люминесценции с помощью ультразвуковых волн

Кравченко Артём Олегович ikrav514@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Бункин Николай Федорович nbunkin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козлов Валерий Анатольевич vkozlov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Болоцкова Полина Николаевна bolotskova@inbox.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Изучена временная динамика люминесценции с поверхности полимерной мембраны Нафиона вымачивании в обычной природной воде и воде, обедненной по дейтерию. Одновременно мембрану Нафиона облучали ультразвуковыми импульсами длительностью 1 мкс в геометрии скользящего или нормального падения. Установлено, что влияние встречных ультразвуковых волн на динамику люминесценции проявляется именно при набухании в обычной воде. Это влияние объясняется в рамках модели Форстеровского резонансного переноса энергии люминесцентного возбуждения от донора к акцептору люминесценции. Показано, что при облучении полимерной мембраны двумя встречными ультразвуковыми волнами в слое размотанных волокон возникает поглощение ультразвука, что приводит к появлению встречных акустических течений поперек размотанных волокон. Эти течения приводят к эффектам тушения / усиления люминесценции.

Ключевые слова: *люминесценция, мембрана, облучение, набухание*

Данная работа посвящена исследованию эффектов, возникающих при влиянии звукового излучения при набухании полимерных протонообменных мембран в природной воде, а также в воде, обедненной по дейтерию [1–4]. Нафион — это полимерная протонно-обменная мембрана. Полимерная матрица состоит из тетрафторэтиленовой основы и подшитых к ней концевых сульфогрупп. Нафион благодаря формированию структуры отрицательно заряженных нанометровых каналов используется в качестве протонообменной мембраны в водородной энергетике. В экспериментах по фотолюминесцентной спектроскопии было показано, что при погружении пластинки нафиона в водный раствор происходит разматывание концевых волокон молекулы (сульфогрупп) в объем жидкости. Образуется своеобразная щетка, протяженность которой в объем воды может достигать сотен микрон. Размотанные в объем воды полимерные волокна подобны гликокаликсу (внеклеточному матриксу), которые расположены с внешней стороны липидного бислоя клеточной мембраны (рис. 1) [5].

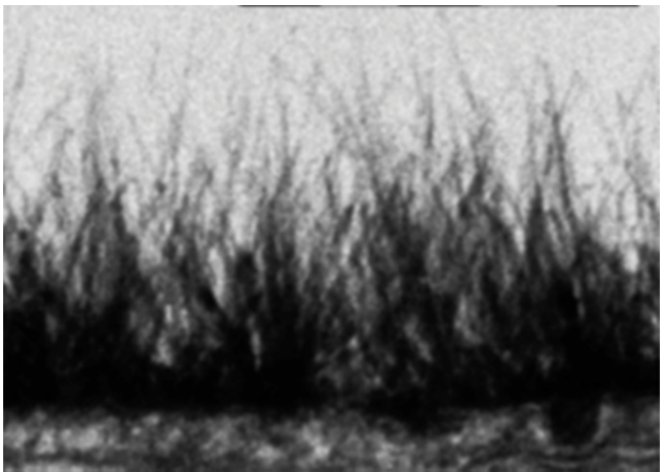


Рис. 1. Полимерные волокна

Важно, что эффект разматывания полимерных волокон в объем воды зависит от содержания дейтерия в воде. Так, в природной воде (содержание дейтерия 157 ppm) размер области, занятой полимерными волокнами, порядка 300 мк, в то время как для обедненной по дейтерию воде (содержание дейтерия 3 ppm) эффект разматывания отсутствует (рис. 2) [1].

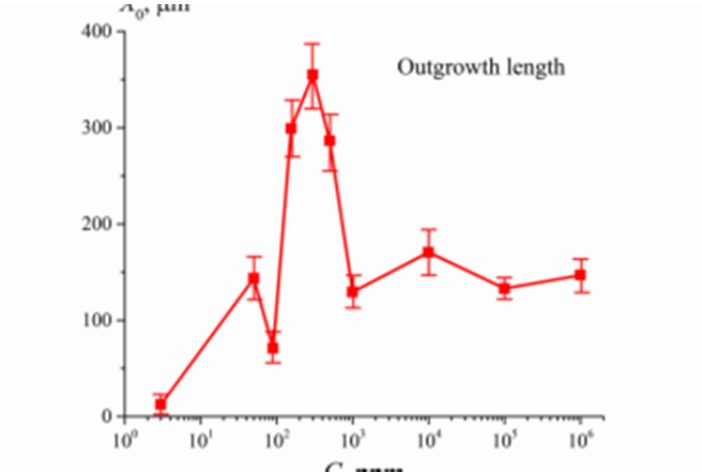


Рис. 2. Эффект разматывания полимерных волокон

Мы изучали динамику набухания Нафиона в воде в зависимости от изотопного состава в экспериментах по люминесцентной спектроскопии. Были исследованы пластины Nafion толщиной 175 мкм и площадью 1×1 см^2. Исследуемой жидкостью была деионизированная вода (содержание дейтерия 157 ± 1 ppm), а также вода, обедненная дейтерием (DDW, содержание дейтерия ≤ 1 ppm). Экспериментальная установка показана на рис. 3.

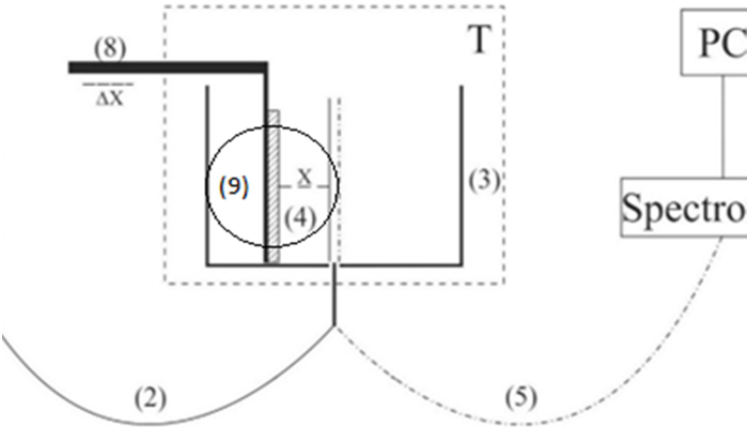


Рис. 3. Схема установки по люминесцентной спектроскопии на основе диодного лазера:

1 — диодный лазер; *2*, *5* — многомодовое оптическое волокно; *3* — кювета; *4* — пластинка Нафиона; *6* — спектрометр; *7* — персональный компьютер; *8* — столик с микрометрической подачей; *9* — пъезоэлементы; *T* — термостат

Эта настройка (см. рис. 3) включает в себя непрерывный волновой диодный лазер (1) с длиной волны λ = 369 нм; спектрометр (6) со спектральным диапазоном 240...1000 нм и разрешением 2 нм; многомодовое оптическое волокно (2) диаметром 50 мкм, которое передает лазерное излучение (1) в ячейку (3) с жидким образцом; и аналогичное оптическое волокно (5), через которое сигнал люминесценции подается на вход спектрометра. Для того чтобы предотвратить попадание достаточно интенсивного лазерного излучения на вход спектрометра (6), волокно (5) было оснащено рефокусатором и светофильтром, который отсекает излучение в диапазоне $\lambda < 350$ нм (на рис. 3 опущено). Спектры обрабатывались с помощью персонального компьютера (7). Цилиндрическая ячейка (3) была изготовлена из ABS пластика и имела радиус 2 см. Пластина Нафион (4) была установлена на подложке (8) с горизонтальной микрометрической подачей. Эта подача использовалась для точного выравнивания пластины Нафион относительно оптической оси, которая совпадала с геометрической осью цилиндрической ячейки, т. е. пластина Нафион подвергалась воздействию лазерного луча в геометрии скользящего падения. Также с двух сторон перпендикулярно плоскости пластинки были установлены пъезоэлементы, необходимость которых объясняется ниже.

Стоит упомянуть о проявлении эффекта раскручивания. А именно, ранее в исследованиях коллег изучалось набухание полимерной мембраны в обычной воде DDW при облучении низкочастотной электромагнитной волной. Было обнаружено, что случайные колебания интенсивности люминесценции возникали при замачивании в обычной воде, в то время как этот эффект пропадал при замачивании в DDW. Согласно разработанной модели, этот эффект можно объяснить следующим образом.

Представим, что там представляет собой центр люминесценции, локализованный на поверхности мембраны, который будет называться донором (рис. 4) [6]. Предположим далее, что на некотором расстоянии r от донора существует другая частица (акцептор); спектр поглощения акцептора совпадает со спектром поглощения донора. Как упоминалось выше, центры люминесценции представляют собой концевые суль-

фоновые группы, которые могут быть отрицательно заряжены вследствие диссоциации, или они остаются электрически нейтральными в отсутствие диссоциации. Ясно, однако, что заряженные и нейтральные сульфоновые группы должны иметь одинаковую структуру квантовых уровней.

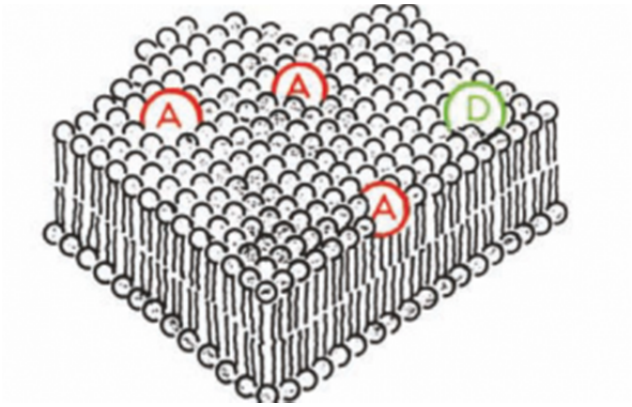


Рис. 4. Центр люминесценции

Как известно, если квантовые уровни для доноров и акцепторов одинаковы, становится возможным резонансный перенос энергии люминесцентного состояния между такими частицами. Очень важно, чтобы этот перенос происходил на определенном расстоянии *r* между донором и акцептором. Фактически, электрон с возбужденного акцепторного уровня может излучательно перейти в основное состояние акцептора, который сопровождается излучением фотонов (люминесценцией), но возможен и безызлучательный переход. В последнем случае люминесценция, по-видимому, гаснет. Ясно, что пространственный контакт электрически нейтральной и заряженной сульфоновых групп сопровождается переносом электронов, что, в свою очередь, должно приводить к тушению люминесценции. Таким образом, передача резонансной энергии от заряженной к электрически нейтральной сульфоновой группе (или наоборот наоборот), очевидно, связано с безызлучательным переходом.

Эффективность *E* резонансной передачи энергии от донора к акцептору определяется формулой

$$E = \frac{R_0^6}{R_0^6 + r^6}.$$

Здесь R_0 = 20...60 Ангстрем — это так называемый параметр Форстера.

Видно что значение *E* зависит от *r* как (т. е. это очень быстро убывающая функция).

Если донор и акцептор жестко закреплены на поверхности мембраны, то расстояние r между ними является постоянным (т. е. эффективность *E* не меняется при набухании). В этом случае интенсивность люминесценции *I*(*t*) может быть аппроксимирована формулой

$$I(t) = A_0 + kI_{pump}\sigma_{lum}n_{Naf}(t).$$

Здесь I_{pump} — интенсивность накачки; n_{Naf} — приповерхностная объемная численная плотность центров люминесценции (сульфоновых групп); σ_{lum} — поперечное

сечение люминесценции; k — размерный коэффициент, который обозначает чувствительность спектрометра; V — объем люминесценции.

В случае, когда E является постоянным, поперечное сечение люминесценции также является постоянным. Таким образом, плотность приповерхностных сульфоновых групп в объеме мембраны вблизи ее поверхности уменьшается при набухании (молекулы жидкости проникают в приповерхностный слой, что приводит к уменьшению плотности центров люминесценции), и уравнение для плотности сульфоновых групп:

$$\frac{dn_{Naf}}{dt} = -\frac{n_{Naf}}{\tau},$$

где τ — характерное время проникновения молекул жидкости внутрь полимерной матрицы.

Решение уравнения (3) выглядит следующим образом:

$$n_{Naf}(t) = \left(n_{Naf}\right)_0 exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

В процессе набухания Нафиона в воде происходит диссоциация контактирующих с водой сульфогрупп

$$R - SO_3H + H_2O \Leftrightarrow R - SO_3^- + H_3O^+$$

т. е. от сульфогруппы отрывается протон, и сульфогруппа оказывается отрицательно заряженной. Таким образом, на поверхности Нафиона присутствуют как электронейтральные, так и отрицательно заряженные сульфогруппы. По-видимому, и те, и другие сульфогруппы служат центрами люминесценции, поскольку люминесценция наблюдается как для сухого Нафиона (отрицательных сульфогрупп нет), так и погруженного в воду Нафиона. При этом в момент погружения не происходит резкого уменьшения интенсивности люминесценции несмотря на появление на поверхности Нафиона отрицательно заряженных сульфогрупп. Необходимо упомянуть о проявлении эффекта разматывания. Если расстояние между локализованными на концах полимерных волокон сульфогруппами меняется от времени, то сечение люминесценции также будет зависеть от времени. Можно предположить, что при эффективном сближении концов полимерных волокон сечение люминесценции будет уменьшаться, а при увеличении расстояния между концами волокон сечение люминесценции будет возрастать. Таким образом, в случае размотанных в объем жидкости полимерных волокон сечение люминесценции может быть случайной функцией времени.Возникает вопрос,можно ли изменить динамику свечения при набухании Нафиона в обычной воде и DDW. Поскольку интенсивность люминесценции регулируется значением E, и в случае, когда расстояние r между донором и акцептором может быть изменено, например, с помощью ультразвуковой волны, тогда можно управлять динамикой люминесценции (и, возможно, самого набухания). В работе, представленной ниже, изучалось возбуждение люминесценции с поверхности материала при набухании в обычной воде и DDW совместно с облучением ультразвуковыми волнами, направленными поперек размотанных в объем жидкости полимерных волокон в геометрии скользящего падения.

На преобразователи подавалось импульсное напряжение с амплитудой 60 В и длительностью импульса в диапазоне от 1 до 500 мкс. На рис. 5, *a* показана осциллограмма импульса длительностью 1 мкс, на рис. 5, *b* показана осциллограмма этого

импульса, приложенного к преобразователю, когда датчик погружен в воду. Можно видеть, что первоначальная прямоугольная форма импульса изменилась, и амплитуда импульса стала равной U = 25...27 В. Эти изменения, очевидно, связаны с эффективной проводимостью слоя воды. Частота следования импульсов варьировалась от десятков Гц до сотен кГц. Зная толщину пьезоэлемента, можно посчитать частоту ультразвука $\nu \simeq 6.1$ МГц. Эксперименты проводились при набухании Нафиона в природной воде (эффект разматывания полимерных волокон имеет место) и в обедненной по дейтерию воде (эффекта разматывания нет). В экспериментах использовался либо один, либо два пьезоэлектрический преобразователя.

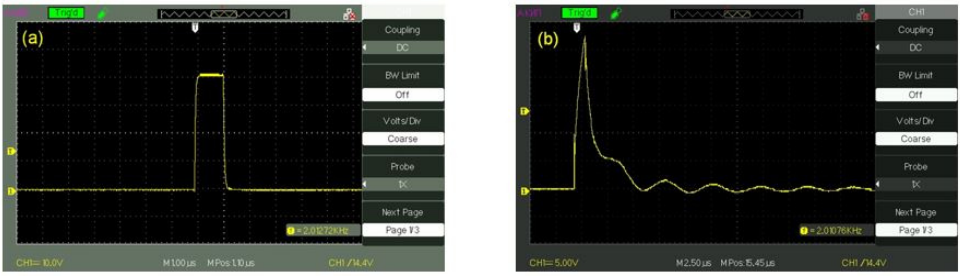


Рис. 5. Осциллограмма импульса:

a — вид импульса, когда датчик находится на воздухе; *b* — датчик погружен в воду

Поскольку интенсивность свечения*I(t)* подчиняется экспоненциальному закону затухания. В то же время, если расстояние *r* между донором и акцептором изменяется во время замачивания, то сечение люминесценции σ_{lum} также должно изменяться со временем. Возникает вопрос о возможности регулирования расстояния r между донором и акцептором при набухании. Если это возможно, то это должно проявляться в экспериментах по возбуждению люминесценции. Изменение эффективного расстояния *r* между донором и акцептором представляется возможным, если донор (сульфоновая группа) и акцептор (модифицированная сульфоновая группа) расположены на полимерных волокнах, размотанных в объеме жидкости (т. е. их взаимное пространственное расположение может быть изменено из-за некоторых внешних воздействий. Если акцептор не является люминесцентно-активным (квантовые переходы для акцептора не являются излучательными), то при значении люминесценция прекращается (гасящий эффект). В то же время, если (т. е. отсутствует передача энергии от донора к акцептору), свечение довольно интенсивное. Основной мотивацией этой работы было подтверждение того, что эффект разматывания волокна Нафиона действительно существует в прямом эксперименте. Для этого были проведены эксперименты по динамическому рассеянию света от частиц Нафиона нанометрового размера. В этом эксперименте были изучены частицы нафиона, взвешенные в обычной воде или DDW. Также было интересно выяснить, возможно ли изменить динамику свечения при набухании Нафиона в обычной воде и DDW. Поскольку интенсивность свечения регулируется значением *E*, и в случае, когда расстояние *r* между донором и акцептором может быть изменено, например, с помощью ультразвуковой волны, тогда может быть реализована возможность изменения динамики люминесценции (и, возможно, самого набухания). В работе, представленной ниже, изучалось возбуждение люми-

несценции с поверхности материала при набухании в обычной воде и DDW совместно с облучением ультразвуковыми волнами.

На рис. 6, 7 представлены наиболее типичные зависимости интенсивности люминесценции *I(t)* от времени замачивания *t*. Экспериментальные кривые связаны с набуханием мембраны нафиона в обычной воде при облучении одним пьезоэлектрическим преобразователем (левый) и два преобразователя (правый) для частоты следования импульсов 2 кГц. Также показаны зависимости для необлученной воды (эталонные зависимости). Можно видеть, что эталонные кривые были хорошо аппроксимированы экспоненциальными функциями. Вертикальной пунктирной линией отмечен момент, когда ультразвук был выключен (на 30-й мин). Было видно, что в случае одного пьезоэлектрического преобразователя момент выключения ультразвука практически не проявлялся в динамике *I(t)*, в то время как в случае двух пьезоэлектрических преобразователей зависимость *I(t)* приблизилась к контрольной зависимости после того, как ультразвук был выключен. То эталонные зависимости были достаточно хорошо воспроизводимы; приведены доверительные интервалы для этих кривых. Обратите внимание, что зависимости *I(t)*, полученные при облучении ультразвуком в обычной воде, не воспроизводились. Вот почему представлены только довольно типичные графики.

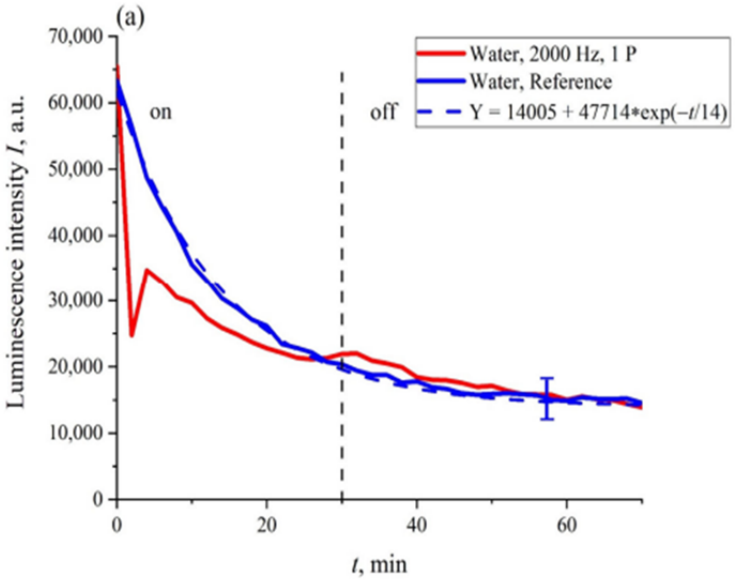


Рис. 6. Набухание нафиона в природной воде при облучении одним пьезоэлементом с частотой 2кГц

Как следует из графиков на рис. 6, 7 наиболее значительные различия между зависимостями *I(t)* и контрольными кривыми наблюдались при облучении мембраны Nafion двумя пьезокерамическими преобразователями, которые излучают ультразвуковые волны навстречу друг другу (правая).

Ультразвуковые волны, падающие нормально на поверхность мембраны, не влияют на динамику люминесценции. В то же время при ультразвуковом облучении

мембраны в геометрии скользящего падения наблюдаются резкие скачки интенсивности люминесценции, и характер этих скачков зависит от режима облучения: одной или двумя ультразвуковыми волнами, т. е. можно управлять динамикой люминесценции с поверхности мембраны. Такая возможность обусловлена эффектом разматывания полимерных волокон с поверхности полимера в объем жидкости в процессе набухания. Этот эффект зависит от содержания дейтерия в жидкости.

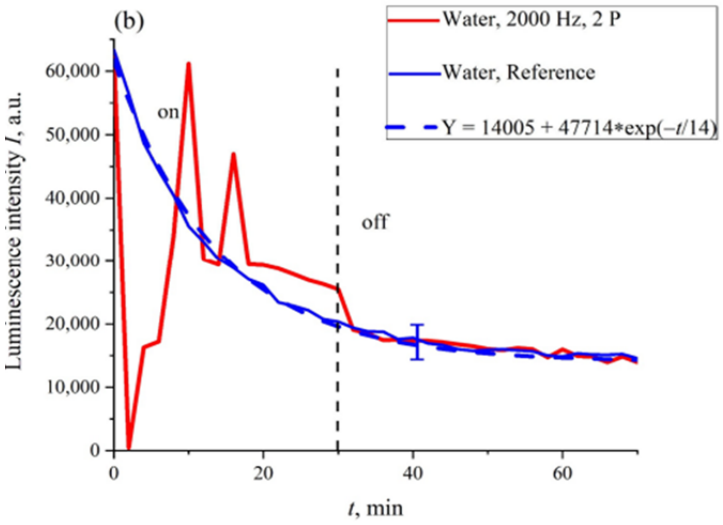


Рис. 7. Набухание нафиона в природной воде при облучении двумя пьезоэлементами с частотой 2кГц

Обратимся еще раз к графикам на рис. 6. После первых двух минут набухания Нафиона интенсивность свечения *I(t)* приблизилась к нулевому уровню, что, согласно предложенной модели, соответствовало перекрытию двух противоположно направленных гидродинамических потоков в области, близкой к центру нафионной пластины, что приводит к увеличению плотности размотанных волокон в этой области. В этом случае эффективность E резонансной передачи люминесцентной энергии от донора к акцептору составляет около единицы, и интенсивность свечения *I(t)* должна уменьшиться. По-видимому, по истечении времени $\tau = 2$ мин суммарная скорость гидродинамических потоков составила $u \approx 0$. В этом случае размотанные волокна должны вернуться в исходное состояние (т. е. интенсивность свечения должна мгновенно увеличиться, что действительно происходит). В то же время мы не можем исключить колебания скачки скорости u, возможно, из-за локальных турбулентных вихрей во встречно распространяющихся потоках. Таким образом, скачки интенсивности *I(t)* при $t > \tau$ соответствуют колебаниям, и скорость *u* близка к нулевому уровню.

Оказалось, что в случае, когда мембрана Нафион набухала в DDW, динамика *I(t)* не была чувствительна к ультразвуковому облучению, независимо от того, применялись ли один или два пьезоэлектрических преобразователя. На рисунке 8 представлена зависимость *I(t)* для случая двух преобразователей. Можно видеть, что в этом случае не было никаких особенностей в прогоне кривой *I(t)*, и эта зависимость была хорошо воспроизведена (указаны доверительные интервалы и аппроксимирующая экс-

поненциальная функция). Кроме того, кривая *I(t)* была близко к эталонной кривой, что было подтверждено перекрытием доверительных интервалов и близостью соответствующих экспоненциальных функций (вставка на рис. 8).

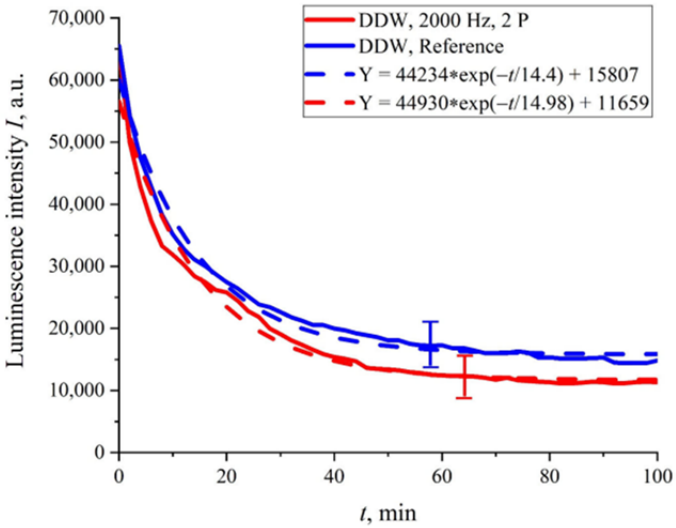


Рис. 8. Набухание нафиона в DDW при облучении двумя пьезоэлементами с частотой 2кГц

Как следует из результатов, представленных ранее, эффект распутывания полимерных волокон по направлению к основной массе жидкости имел место в обычной воде, в то время как в DDW этот эффект отсутствовал. Таким образом, нетрудно предположить, что влияние ультразвукового излучения на люминесценцию возникла именно из-за такого распутывания.

Литература

[1] Bunkin N.F., Shkirin A.V., Kozlov V.A., Ninham B.W., Uspenskaya E.V., Gudkov S.V. Near-surface structure of Nafion in deuterated water. J Chem Phys, 2018, vol. 149, art. no. 164901.

[2] Ninham B.W., Bolotskova P.N., Gudkov S.V., Juraev Y., Kiryanova M.S., Kozlov V.A., Safronenkov R.S., Shkirin A.V., Uspenskaya E.V., Bunkin N.F. Formation of water-free cavity in the process of Nafion swelling in a cell of limited volume; effect of polymer fibers unwinding. Polymers, 2020, vol. 12, art. no. 2888.

[3] Ninham B.W., Bolotskova P.N., Gudkov S.V., Baranova E.N., Kozlov V.A., Shkirin A.V., Vu M.T., Bunkin N.F. Nafion swelling in salt solutions in a finite sized cell: curious phenomena dependent on sample preparation protocol. Polymers, 2022, vol. 14, art. no. 1511.

[4] Bunkin N.F., Bolotskova P.N., Bondarchuk E.V., Gryaznov V.G., Gudkov S.V., Kozlov V.A., Okuneva M.A., Ovchinnikov O.V., Smoliy O.P., Turkanov I.F. Long-term effect of low-frequency electromagnetic irradiation in water and isotonic aqueous solutions as studied by photoluminescence from polymer membrane. Polymers, 2021, vol. 13, art. no. 1443.

[5] Van den Berg B., Vink H., Spaan J. The endothelial glycocalyx protects against myocardial edema. Circulation research, 2003, vol. 92, pp. 592–594. DOI: https://doi.org/10.1161/01.RES.0000065917.53950.75

[6] Lakowicz J.R. Energy Transfer. Principles of fluorescence spectroscopy. 3rd ed. Springer, New York, 2006, pp. 443–475.

УДК 538.958

Генерация второй гармоники в замороженной суспензии частиц ниобата лития

Кудрявцева Анна Дмитриевна akudr@sci.lebedev.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Чернега Николай Владимирович tchera@sci.lebedev.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Тареева Мария Вячеславовна tareevamv@lebedev.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Уманская Софья Филипповна sonya_umanskaya@mail.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Шевченко Михаил Александрович mishev87@mail.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Матрохин Антон Александрович ton.m99@yandex.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Показано значительное увеличение эффективности генерации второй гармоники при замораживании суспензии частиц ниобата лития при использовании нано- и пикосекундных лазерных импульсов. Данный эффект обусловлен образованием плотноупакованных структур в процессе замораживания. Получены энергетические зависимости и угловое распределение интенсивности излучения второй гармоники, возбуждаемой в замороженной суспензии, в порошке и в тонком слое частиц ниобата лития.

Ключевые слова: *лазер, наночастицы, замороженная суспензия, эффективность преобразования, угловое распределение*

Введение

Изучение особенностей генерации второй гармоники (ГВГ) в различных наноструктурах является актуальным направлением в нелинейной оптике и нанофотонике [1]. Наноматериалы, генерирующие вторую гармонику, широко используются для многочисленных приложений [2, 3]. Одним из перспективных материалов, широко используемых для различных приложений в области фотоники, прежде всего для генерации второй гармоники, является кристалл $LiNbO_3$ обладающий достаточно высоким коэффициентом нелинейности.

Эффективная генерация второй гармоники была получена в упорядоченных структурах, таких как фотонные кристаллы [4]. В случайно-неоднородной среде наличие многократного рассеяния может значительно усилить сигнал второй гармоники. Важным параметром, определяющим режим рассеяния при распространении света в неупорядоченной среде, является длина свободного пробега фотонов l_s. Уменьшение l_s может приводить к понижению порога генерации. При замерзании

коллоидной суспензии происходит вытеснение частиц из нарастающего льда и последующее увеличение концентрации частиц в областях жидкости перед границей замерзания. Этот процесс, приводящий к формированию плотноупакованных и, в отдельных случаях, даже упорядоченных структур, и лежит в основе формирования льда [5]. Уплотнение частиц приводит к уменьшению параметра l_s замороженной суспензии при оптической накачке по сравнению с жидкой суспензией.

В данной работе продемонстрирована генерация второй гармоники в замороженной суспензии частиц ниобата лития, возникающая в результате смещения частиц и их агломерации в процессе замораживания.

Материалы и методы исследования

В данной работе использовались образцы $LiNbO_3$ в виде порошка, водной суспензии и тонкого слоя частиц, нанесенного на стеклянную подложку. Коллоидная суспензия частиц ниобата лития была получена методом лазерной абляции в жидкости. Порошок частиц ниобата лития был получен механическим измельчением объемного кристалла. Образцы, представляющие собой тонкий слой частиц ниобата лития, были получены путем многократного нанесения и высушивания суспензии на стеклянную подложку. Такие образцы моделировали процесс образования агломератов частиц, образующихся при замерзании суспензии.

Для возбуждения второй гармоники в образцах использовались два источника накачки: Nd:YAG-лазер Solar Laser Systems с модуляцией добротности (λ = 1064 нм, τ = 11 нс, E_{max} = 0,4 Дж, частота 10 Гц) и Nd:YAG-лазер Ekspla с синхронизацией мод (λ = 1064 нм, τ = 30 пс, E_{max} = 50 мДж, частота 10 Гц). Для регистрации спектров второй гармоники использовался спектрометр Ocean HDX со спектральным разрешением 1 нм в исследуемом спектральном диапазоне.

Результаты

В замороженной суспензии частиц ниобата лития, в слое частиц на подложке и в порошке наблюдалась генерация второй гармоники при обеих длительностях возбуждения. В жидкой суспензии частиц ниобата лития при концентрации ~10^8 $см^{-3}$ при обеих длительностях импульса лазера в спектрах пропускания не наблюдалась генерация второй гармоники. Затем, когда суспензия частиц той же концентрации замораживалась, компонента, соответствующая ГВГ, появлялась в спектрах (рис. 1, *а*). Дальнейшее понижение температуры не приводило к изменению интенсивности ГВГ. В процессе формирования кристаллической структуры частицы скапливаются на поверхности твердого фронта, что связано с его смещением при росте твердой фазы. При этом происходит уплотнение частиц в локальных областях образца. Этот процесс показан схематически на рис. 1, *б*.

Уменьшение длины свободного пробега фотонов в образованных слоях частиц по сравнению с ее значением для жидкой суспензии способствует резкому увеличению эффективности процесса ГВГ.

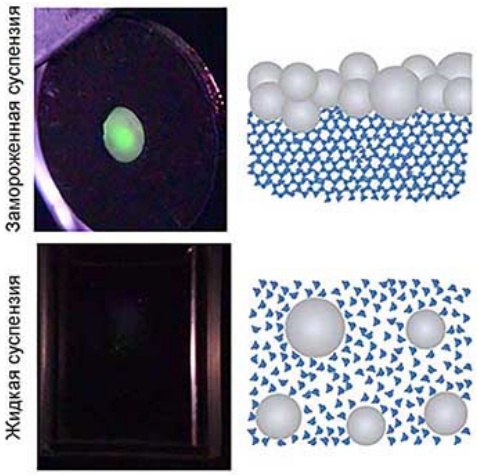


Рис. 1. Фотография жидкой и замороженной суспензии с сигналом второй гармоники (*а*) и соответствующие схематические изображения расположения частиц в жидкой и замороженной суспензиях (*б*)

На рис. 2 приведен спектр излучения второй гармоники в замороженной суспензии при различных энергиях накачки.

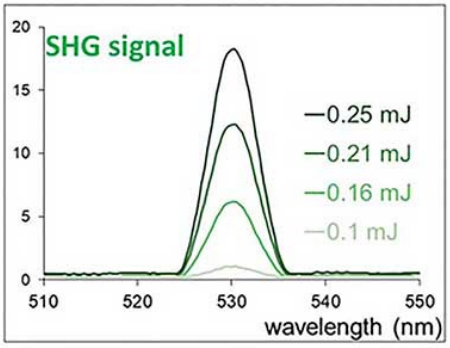


Рис. 2. Спектр излучения второй гармоники в замороженной суспензии при различных энергиях накачки

Интенсивность излучения второй гармоники пропорциональна квадрату интенсивности излучения основной частоты $I_{2\omega} = AL^2 I_\omega^2$, где L — толщина образца, A — константа пропорциональности. Экспериментально была получена зависимость интенсивности второй гармоники от энергии накачки для замороженной суспензии, для слоя частиц на подложке и для порошка при нано- и пикосекундной длительности накачки. Во всех случаях зависимость была близка к квадратичной.

С помощью метода когерентного обратного рассеяния была определена длина свободного пробега фотона в порошке ниобата лития. Она составила 28 мкм на длине волны второй гармоники и 15 мкм на длине волны лазерного излучения.

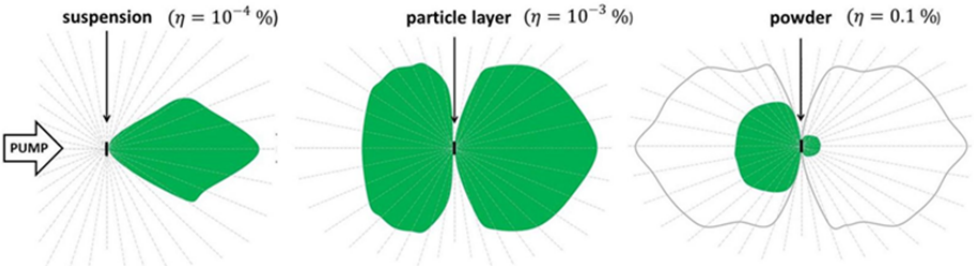


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности второй гармоники для жидкой суспензии, тонкого слоя частиц на стеклянной подложке и порошка при пикосекундной накачке (η – эффективность преобразования во вторую гармонику)

На рис. 3 показано угловое распределение интенсивности излучения второй гармоники для различных образцов. Излучение от суспензии преимущественно сонаправлено с излучением накачки. В случае тонкого слоя частиц направленность исчезает. В более толстых слоях, как и в порошках, соотношение интенсивности увеличивается в пользу обратного направления, что соответствует теоретическим расчетам для стационарной диффузионной модели ГВГ в многократно рассеивающих средах [6].

Заключение

Как было показано, фазовый переход жидкой суспензии в твердое состояние сопровождается образованием области с повышенной концентрацией частиц суспензии, что легко диагностировать по сигналу второй гармоники. Таким образом, путем включения в оптически прозрачную жидкость частиц, генерирующих вторую гармонику, процесс усиления света за счет многократного рассеяния можно использовать для изучения различных фазовых переходов, в частности, для изучения процессов организации частиц при формировании льда и как основу для создания сенсоров фазовых переходов в среде.

Литература

[1] Rogov A., Mugnier Y., Bonacina L. Harmonic nanoparticles: noncentrosymmetric metal oxides for nonlinear optics. Journal of Optics, 2015, vol. 17, no. 3, art. 033001. DOI: https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/3/033001

[2] Pantazis P., Maloney J., Wu D., Fraser S. E. Second harmonic generating (SHG) nanoprobes for in vivo imaging. PNAS, 2010, vol. 107, no. 33, pp. 14535–14540. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1004748107

[3] Pu Y., Centurion M., Psaltis D. Harmonic holography: a new holographic principle. Applied Optics, 2008, vol. 47, no. 4, pp. A103–A110. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.47.00A103

[4] Martorell J., Vilaseca R., Corbalan R. Second harmonic generation in a photonic crystal. Applied Physics Letters, 1997, vol. 70, no. 6, pp. 702–704. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.47.00A103

[5] Rempel A.W., Worster M.G. The interaction between a particle and an advancing solidification front. Journal of Crystal Growth, 1999, vol. 205, no 3, pp. 427–440. DOI: https://doi.org/10.1017/S0022112006000796

УДК 539.2

Исследование низкочастотной области инфракрасных спектров в жидких аренах и их галогеносодержащих

Мельников Геннадий Александрович melnikovga@mail.ru
Юго-Западный государственный университет

Игнатенко Николай Михайлович inmkstu@bk.ru
Юго-Западный государственный университет

Болдырев Кирилл Николаевич kn.boldyrev@gmail.com
Институт спектроскопии РАН

Манжос Ольга Александровна olga.apalkova@list.ru
Юго-Западный государственный университет

Громков Андрей Сергеевич andrei_gromkov@mail.ru
Юго-Западный государственный университет

Приведены результаты экспериментального исследования низкочастотной области инфракрасных спектров в чистых жидких аренах и их галогеносодержащих при температуре 24 °С. Погрешность определения положения максимумов спектральных полос составляла 2...3 см–1. Разрешающая способность экспериментальной установки 1...2 см–1. На примере фторбензола показан характерный инфракрасный спектр для 13 исследованных жидкостей в области частот 20...700 см–1. Установлена корреляция между положением спектральных полос в исследуемой области спектра с характеристиками кластерных образований в структуре жидкостей.

Ключевые слова: *инфракрасный спектр, жидкости, арены, спектральные полосы, погрешности измерений*

Экспериментальные и теоретические исследования в низкочастотной области инфракрасных (ИК) спектров веществ в настоящее время остаются актуальными. Это связано с техническими трудностями проведения экспериментальных исследований в этой области ИК-спектров, с необходимостью применения прецизионного оборудования и гелиевых температур для устранения побочных шумовых эффектов при снятии ИК-спектров [1, 2].

В теоретическом плане область частот 20...250 $см^{-1}$ попадает в область «бозонного» пика, природа образования и свойства этого пика до конца не выявлены [2–4]. Образование спектральных полос в низкочастотной области ИК-спектра обусловлено процессами формирования и развала кластерных систем в структуре конденсированных сред [5–8].

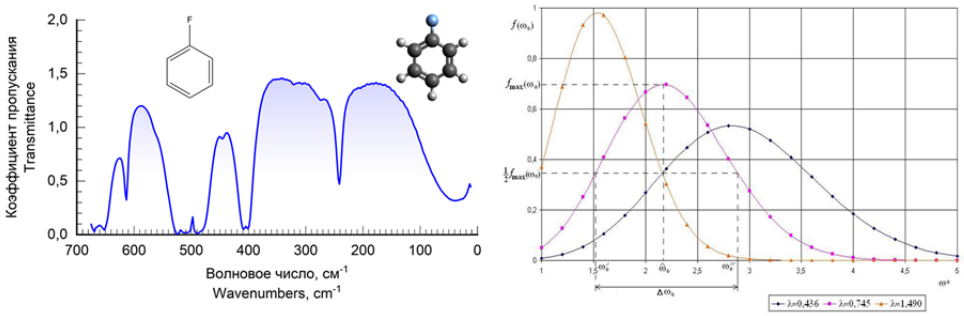
Экспериментальные исследования в низкочастотной области ИК-спектра выбранного класса жидкостей проводилось с помощью всеволнового вакуумного фурье-спектрометра высокого разрешения (Bruker IFS 125 HR) с лавсановым светоделителем, ртутной лампой низкого давления в качестве источника и глубокоохлаждаемым гелиевым болометром в качестве детектора.

Проведены исследования для чистых жидких аренов и их галогеносодержащих — циклических углеводородов, в основе молекулярного строения которых лежит бен-

зольное кольцо, причем в галогенозамещенных аренах один или несколько атомов водорода замещены атомами галогенов (F, Cl, Br). Выбранный класс жидкостей для исследований имеет широкое практическое применение в химических технологиях, парфюмерной промышленности и в процессах получения органических растворителей. В теоретическом плане арены и их галогеносодержащие используются как модельные жидкости для апробации различных моделей. В частности, благодаря присутствию межмолекулярного взаимодействия (ММВ) типа галоген — водород (H…F, H…Cl, H…Br) в структуре этих жидкостях возможно формирование кластерных систем, спектроскопические свойства которых проявляются в далекой (низкочастотной) области ИК спектров. Одна из возможных моделей ММВ рассмотрена в работе [7].

Анализ результатов экспериментального исследования ИК-спектров жидких аренов и их галогенозамещенных соединений позволил сделать следующие выводы.

В ИК-спектрах исследованных жидкостей в области частот 20...800 см$^{-1}$ обнаружены три-четыре явно выраженные спектральные полосы в области частот 20..250 см$^{-1}$, 280...400 см$^{-1}$, 450...500 см$^{-1}$, причем первая низкочастотная полоса (20...250 см$^{-1}$) обычно трактуется как «бозонный» пик в ИК-спектрах (или раман-спектрах) конденсированных сред (см. рис. 1, *а*).



а б

Рис.1. ИК-спектр для фторбензола при температуре 24 °С:
а — эксперимент; *б* — графики частот, полученные в кластерной модели

2. Наличие бозонного пика (БП) в низкочастотной области ИК-спектра в конденсированных средах объясняется процессами формирования и распадом кластерных систем в их структуре. В жидкостях и плотных газах с хаотичным движением частиц характерно формирование малых кластеров, содержащих в своем составе до 1000 частиц, причем в условиях динамического равновесия устанавливается распределения кластеров по числу частиц, содержащихся в их составе. Распределение кластеров по численному составу можно описать двухпараметрической функцией плотности вероятностей Эрланга [9, 10]

$$f(Z) = \frac{\lambda^m}{(m-1)!} \cdot Z^{m-1} \cdot e^{-\lambda Z}, \qquad (1)$$

которая позволила вычислить среднее число частиц в кластере в среде по ее плотности

$$\overline{Z} = \int_0^\infty Z \cdot f(Z) dZ = \frac{m!}{(m-1)!}\frac{1}{\lambda} = \frac{m}{\lambda} = m\theta = exp\frac{\rho}{\rho_C}. \qquad (2)$$

Функция распределения (1) позволяет найти функцию распределения частот в ИК-спектре жидкости (см. рис. 1, *б*)

$$f(\omega_*) = \frac{\lambda^4}{3}\omega_*^7 \cdot e^{-\lambda\omega_*^2}. \quad (3)$$

По ширине спектра на уровне $1/2f_{max}(\omega_*)$ оценивается время жизни наиболее вероятного кластера при выбранных параметрах состояния жидкости

$$\tau = \frac{1}{\Delta\omega_*} = \frac{1}{\omega_*'' - \omega_*'}. \quad (4)$$

«Бозонный» пик имеет тонкую структуру, включающую в себя серию низкоэнергетических спектральных линий, взаимное расположение которых связано с рядом чисел Фибоначчи. Математически спектральная серия в структуре бозонного пика можно описать простым соотношением [5, 9, 10]

$$\omega_i = \omega_{min}\sqrt{F_i}. \quad (5)$$

Низкочастотная граница бозонного пика (НЧГБП) ω_{min} получается при числе Фибоначчи $F = 1$ в формуле (5) и определяется выражением

$$\omega_{min} = \sqrt{\frac{2\Delta H_{dim}}{J_{dim}}}, \quad (6)$$

где J_{dim} — момент инерции димера относительно главных осей для различных конфигураций димера в структуре кластера, ΔH_{dim} — энтальпия образования димерной конфигурации.

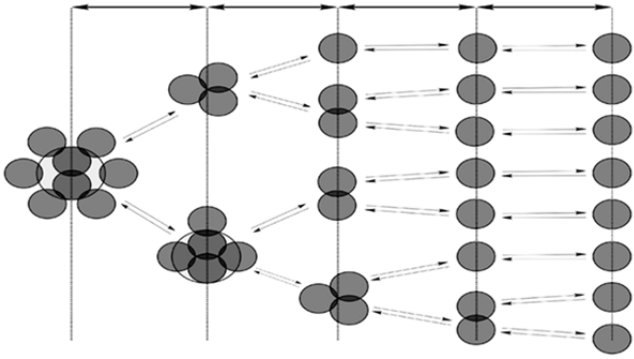


Рис. 2. Схема распада кластера из восьми частиц

В неупорядоченных конденсированных средах (плотных газах, жидкостях) с хаотичным движением частиц возможны процессы самоорганизации частиц в кластерные системы на основе эффекта Ефимова [11]. В результате обмена сформированного кластера с одиночными частицами среды, число частиц в кластере становится равным одному из чисел Фибоначчи. В этом случае кластер начинает делится согласно «золо-

той» пропорции, образуя цепное деление до развала на свободные, хаотично движущие частицы. На рис. 2 представлена схема распада кластера Фибоначчи с числом частиц 8, причем на каждом этапе распада излучается квант электромагнитного излучения. Этими процессами объясняется появление спектральных полос в низкочастотной области ИК-спектров органических жидкостей.

Литература

[1] Браун Д., Флойд А., Сейнзбери М. Спектроскопия органических веществ. Москва, Мир, 1992, 300 с.

[2] Рыжов В.А. Изучение низкоэнергетических процессов в полиметилметакрилате и его короткоцепочечных олигомерах методом терагерцовой ИК и рамановской спектроскопии. Оптика и спектроскопия. 2019, т. 127, вып. 6, с. 895–899. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/48682 (дата обращения 25.10.2022).

[3] Рыжов В.А., Берштейн В.А. Низкочастотные либрационные колебания, «бозонный пик» и межцепные взаимодействия в стеклообразном полимере. ФТТ, 2008, т. 50, вып. 10, с. 1901–1905. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/2830 (дата обращения 25.10.2022).

[4] Рыжов В.А. Низкоэнергетические либрационные возбуждения в стеклообразном полиметилметакрилате. ФТТ, 2002, т. 44, вып. 12, с. 2229–2233. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/39764 (дата обращения 25.10.2022).

[5] Melnikov G.A., Ignatenko N.M., Melnikov V.G., Cherkasov E.N., Manzhos O.A. Structure of small clusters and IR spectrum condensed matters. Journal of Nano- and Electronic Physics, 2015, vol. 7, no 4 (2), art. 04087.

[6] Duval E., Boukenter A., Achibat T. Vibrational dynamics and the structure of glasses. Journal of Physics: Condensed Matter, 1990, vol. 2, no 51, pp. 10227–10234. DOI: 10.1088/0953-8984/2/51/001

[7] Позднеев С.А. Многочастичная теория возникновения резонансного взаимодействия, приводящего к новому типу химической связи. Краткие сообщения по физике ФИАН, 2003, № 5, с. 3–19.

[8] Кудрявцев А.Б., Линерт В. Спиновый переход – необычное химическое равновесие. ЖСХ, 2010, т. 51, № 2, с. 350–378. URL: https://jsc.niic.nsc.ru/article/8402/ (дата обращения 25.10.2022).

[9] Мельников Г.А. Кластерная теория и релаксационные процессы в жидкостях. Курск, КГУ, 2010, 160 с.

[10] Мельников Г.А., Вервейко В.Н., Мелихов Ю.Ф., Вервейко М.В., Полянский А.В. Кластерная модель и ИК-спектры жидкостей. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки, 2011, № 3 (42), с. 108–123. URL: http://vestniken.ru/articles/67/67.pdf (дата обращения 25.10.2022).

[11] Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Громков А.С. Самоорганизация малых кластерных систем в рамках модели Ефимова. Вестник Воронежского государственного университета. Физика. Математика, 2022, № 3, с. 5–18. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49495806 (дата обращения 25.10.2022).

УДК 3937

Люминесценция новых координационных соединений европия

Осадченко Анна Владимировна osadchenkoav@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Дайбаге Даниил Саюзович daibagya@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Захарчук Иван Александрович zia18f064@student.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Селюков Александр Сергеевич selyukov@lebedev.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Московский Политех

Амброзевич Сергей Александрович s.ambrozevich@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Гехт Милана Эмилевна milana.gekht@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Певцов Николай Валерьевич 3372@bk.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Певцов Дмитрий Николаевич pevtsov.dn@mipt.ru
МФТИ, ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Рыжов Александр Вячеславович rigov@mail.ru
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Исследованы оптические свойства новых люминесцентных материалов, у которых центром излучательной рекомбинации являлся ион европия (III). Были получены спектры фотолюминесценции и динамика релаксации возбужденных состояний исследованных соединений, а также был рассчитан их внутренний квантовый выход люминесценции. Высокая эффективность исследованных соединений свидетельствует о возможности создания органических светоизлучающих диодов на их основе.

Ключевые слова: *люминесценция, квантовый выход, европий, координационные соединения*

Введение

В последнее время увеличивается спрос на высокоэффективные оптоэлектронные устройства, что приводит к росту числа публикаций в области исследования новых люминесцентных материалов. Такие вещества могут применяться как в качестве эмиттеров в органических светоизлучающих диодах (ОСИД) [1], так и в качестве активной среды в лазерах [2], при этом материалы должны обладать высоким значением квантового выхода, а также могут использоваться в качестве люминесцентных маркеров в медицине [3] и в массовом производстве банкнот [4]. В настоящей работе представлены результаты исследований новых люминесцентных координационных соединений европия.

Методы

В качестве исследуемых соединений были рассмотрены следующие вещества (BTFA — 4,4,4–трифтор-1-фенил-1,3-бутандион):

- $Eu(BTFA)_2CH_3(CH_2)_3COO$;
- $Eu(BTFA)_2CH_3COO$;
- $EuCl(BTFA)CH_3COO$.

Для измерения спектров фотолюминесценции исследуемых материалов была применена специальная экспериментальная установка, состоящая из спектрометра СДЛ-1, в котором дисперсионными элементами являлись две решетки 600 штрихов/мм. Регистрация сигнала люминесценции производилась с помощью фотоэлектронного умножителя Hamamatsu 8259-1, чувствительного в диапазоне 300...850 нм и работающего в режиме счета одиночных фотонов. Возбуждение образца производилось с помощью светодиода с длиной волны 365 нм. Измерение кинетических зависимостей люминесценции проводилось на той же установке, однако в качестве детектора выступал фотоумножитель ФЭУ–79, чувствительный в диапазоне 300...850 нм, работавший в линейном режиме. Регистрация кинетических зависимостей проводилась с помощью платы Руднев-Шиляев ЛА-10Н6. В качестве источника возбуждения использовался импульсный лазер Lotis TII-2134UTF, настроенный на длину волны возбуждения 355 нм. Длительность импульсов генерации лазера составляла 6 нс, частота следования — 12 Гц. В качестве образцов для указанных измерений выступали кварцевые стекла, между которыми был помещен порошок исследованного вещества.

Результаты и их обсуждение

Спектры люминесценции исследованных веществ представлены на рис. 1. Спектры представляют собой линейчатую структуру, полностью соответствующую спектру люминесценции иона европия (III). Были обнаружены следующие переходы $^5D_0-^7F_1$,$^5D_0-^7F_2$,$^5D_0-^7F_3$

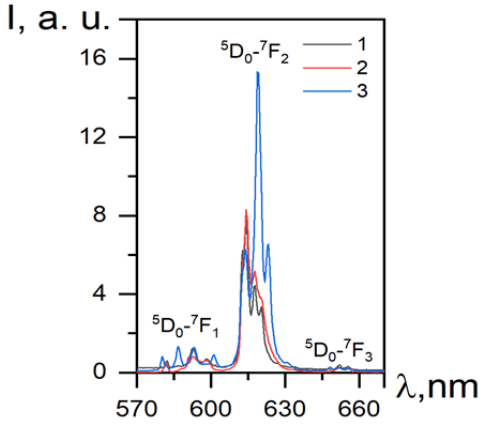


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции

На рис. 2 представлены кинетические зависимости люминесценции исследованных соединений при регистрации на длине волны 615 нм. Выбор указанной полосы

регистрации обусловлен тем, что ион европия (III) обладает максимальной интенсивностью люминесценции при данной длине волны. На рис. 2 представлены кинетические зависимости люминесценции для всех соединений. Аппроксимация полученных кривых проводилась с помощью биэкспоненциальной функции

$$\sum_{i=1}^{2} A_i \cdot e^{-t/\tau_i}.$$

Однако второе (большее) время затухания, отвечающее второму слагаемому, в дальнейших рассуждениях не учитывалось из-за малой относительной величины коэффициента при соответствующей экспоненте. Таким образом, характерные времена релаксации составили $\tau_1 = 0.31$мс, $\tau_2 = 0.33$ мс, $\tau_3 = 0.34$ мс.

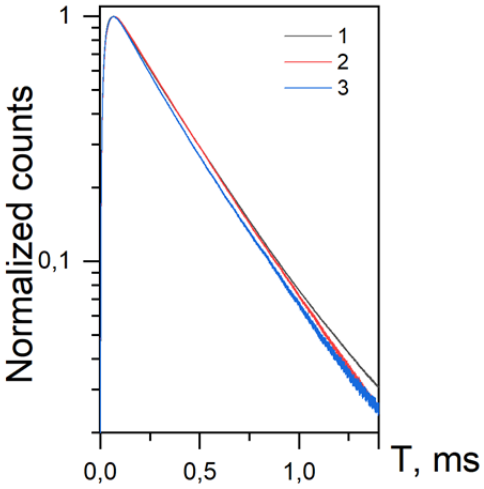


Рис. 2. Кинетические зависимости

По результатам оптических исследований для представленных соединений европия был рассчитан их внутренний квантовый выход люминесценции. С учетом того, что переход ${}^5D_0 - {}^7F_1$ европия (III) является магнитно-дипольным и не зависит от типа окружения иона, то в этом случае константа скорости перехода составляет $14.65c^{-1}$ (обозначена A_{MD}). Итоговое выражение для расчета внутреннего квантового выхода имеет вид

$$\eta = \frac{A_{rad}}{A_{rad} + A_{nrad}},$$

где $A_{rad} = A_{MD} n^3 \frac{I_{TOT}}{I_{MD}}$ — скорость излучательной релаксации, при этом скорость безызлучательной релаксации A_{nrad} можно найти из выражения

$$\tau_{obs} = \frac{1}{A_{rad} + A_{nrad}}.$$

Полученные значения скоростей излучательной A_{rad} и безызлучательной релаксации A_{nrad}, а также внутренний квантовый выход η для исследованных веществ приведены в таблице.

Значения скоростей излучательной и безызлучательной релаксации

Номер соединения	A_{rad}A_{rad}	A_{nrad}A_{nrad}	η\eta
1	2.26	0.97	70%
2	1.24	1.75	42%
3	1.88	1.09	63%

Заключение

Экспериментально было показано, что новые соединения европия являются эффективными эмиттерами при УФ возбуждении, их квантовый выход люминесценции составил $\eta_1 = 70\%$, $\eta_2 = 42\%$, $\eta_3 = 63\%$. Представленные соединения могут использоваться в качестве материала эмиссионных слоев органических светоизлучающих диодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-02-00222 А

Литература

[1] Law G.L., et al. White OLED with a single-component europium complex. Inorganic chemistry, 2009, vol. 48, no. 22, pp. 10492–10494.

[2] Bünzli J.C.G., Piguet C. Taking advantage of luminescent lanthanide ions. Chemical Society Reviews, 2005, vol. 34. no. 12, pp. 1048–1077.

[3] Blomberg K., Ulfstedt A.C. Fluorescent europium chelates as target cell markers in the assessment of natural killer cell cytotoxicity. Journal of immunological methods, 1993, vol. 160, no. 1, pp. 27–34.

[4] Macrino C.J., et al. Synthesis, characterization, and application of europium (III) complexes as luminescent markers of banknotes. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2021, vol. 32, pp. 1070–1081.

УДК 577.32

Терагерцовая динамика воды в гидратных оболочках биомолекул

Пеньков Никита Викторович nvpenkov@rambler.ru
Институт биофизики клетки РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН

Обсуждается вопрос гидратации биологических молекул. Предложен высокочувствительный и информативный подход изучения гидратных оболочек биомолекул на основе анализа спектров комплексных диэлектрических проницаемостей их водных растворов в терагерцовом диапазоне, которые могут быть определены методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения. Получено множество новых данных о гидратации всех основных типов биологических молекул: белков, фосфолипидных липосом, нуклеиновых кислот, сахаров.

Ключевые слова: *гидратные оболочки, биологические молекулы, ТГц спектроскопия, диэлектрическая проницаемость, структура воды*

Хорошо известно, что гидратация играет важную роль для формирования нативной структуры биологических молекул. Биомолекулы, в свою очередь, влияют на структуру воды в ближайшем окружении, формируя гидратные оболочки, что изучено гораздо хуже, несмотря на давнюю историю исследований с использованием различных методов. Среди них особняком стоит относительно новый метод терагерцовой (ТГц) спектроскопии. Его чувствительность к гидратным оболочкам оказалась существенно выше других классических методов. И это неудивительно, поскольку ТГц диапазон по характерным энергиям и временам соответствует межмолекулярной структуре и динамике воды. Показано, что гидратная оболочка как область водной фазы с измененным состоянием не ограничивается одним-двумя слоями сильно связанной воды, а может занимать объем даже больший, чем сама биомолекула. Это означает, что наиболее полную информацию о гидратации биомолекул можно получить при исследовании их водных растворов, а не слабо гидратированных образцов, как это в большинстве случаев делается. Несмотря на большой потенциал ТГц спектроскопии, до сих пор нет надежных разработанных подходов для изучения гидратации биомолекул в растворах. Главным образом, это связано с тем, что спектры растворов в ТГц диапазоне не содержат четко выраженных полос, а выглядят как монотонные не характеристические кривые. Это создает трудности в определении конкретных спектральных параметров, связанных с конкретными структурно-динамическими характеристиками гидратных оболочек.

В наших работах развивался подход исследования гидратации на базе метода ТГц спектроскопии временного разрешения (THz-TDS). Данная разновидность ТГц спектроскопии позволяет измерять спектры комплексной диэлектрической проницаемости (ДП), которые более информативны, чем обычные спектры поглощения. Идея исследования состоит в следующем.

13. Измеряют спектры ДП раствора биомолекул, растворителя (без биомолекул) и дегидратированных (сухого вещества) биомолекул .

14. С использованием моделей эффективной среды из ДП раствора ε_S^* вычитают диэлектрический вклад биомолекул ε_i^* и рассчитывают спектр водной фазы раствора $\varepsilon_W^* = f(\varepsilon_S^*, \varepsilon_i^*)$.

15. Между ε_W^{0*} и ε_W^* наблюдаются отличия, обусловленные присутствием гидратных оболочек в водной фазе ε_W^*. На основании этих отличий извлекают информацию о гидратных оболочках биомолекул.

Отметим, что модели эффективной среды для разделения вкладов биомолекул и водной фазы раствора практически не использовались, за исключением наших работ. Для компактных биомолекул, таких как глобулярные белки, нуклеотиды, моносахариды и др., можно применить известные модели эффективной среды Бруггемана или Максвелла Гарнетта. Однако для фибриллярных биомолекул до недавнего времени не существовало разработанных моделей. В нашей теоретической работе [1] на основе формализма электродинамики сплошных сред была получена такая модель эффективной среды и экспериментально проверена на примере водного раствора ДНК.

ДП водной фазы ε_W^{0*} и ε_W^* могут быть описаны следующей моделью:

$$\varepsilon^* = \frac{\Delta\varepsilon_1}{1-i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1-i\omega\tau_2} + \frac{A}{\omega_0^2-\omega^2-i\omega\gamma} + \varepsilon_\infty + i\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega}, \qquad (*)$$

где τ_1 и $\Delta\varepsilon_1$ — время и амплитуда релаксации связанных молекул воды (Дебаевской релаксации); τ_2 и $\Delta\varepsilon_2$ — время и амплитуда ориентационной релаксации свободных молекул воды; A, ω_0, γ — амплитуда, резонансная частота и параметр затухания межмолекулярных продольных колебаний молекул воды, связанных водородными связями; ε_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость; σ_0 — проводимость в постоянном поле; ε_0 — диэлектрическая постоянная; ω — циклическая частота; i — мнимая единица.

Модель (*) учитывает все основные хорошо известные типы межмолекулярной динамики воды, проявляющиеся в ТГц области, а каждый параметр обладает определенным физическим смыслом. В описанном подходе гидратация изучается на основе сравнения ε_W^{0*} и ε_W^*, поэтому смысловыми характеристиками являются изменения параметров при переходе от чистого растворителя ε_W^{0*} к водной фазе раствора биомолекул ε_W^*. Так уменьшение $\Delta\varepsilon_1$ означает усиление связывания воды в гидратных оболочках. Параметр $\Delta\varepsilon_2$пропорционален количеству свободных молекул воды [2], которое вследствие гидратации меняется. τ_2 – время релаксации свободных молекул воды, которое тоже может отличаться для гидратной и не гидратной воды. Увеличение/уменьшение A (или A/ω_0^2), как правило, означает увеличение/уменьшение числа водородных связей; ω_0 – параметр, пропорциональный средней энергии водородного связывания; γ – параметр, характеризующий ширину энергетического распределения водородных связей. Описанный подход был применен нами для исследования гидратации всех основных типов биомолекул: белков, фосфолипидов, нуклеиновых кислот, сахаров.

Показано, что у белка при изменении конформации происходит изменение параметров релаксации молекул воды в гидратных оболочках. Наименьшие отличия гидратной оболочки от невозмущенной воды наблюдаются для нативной конформации белка [3]. Фосфолипидные липосомы рассматривались при трех температурах в фазовых состояниях гель, риппл-фаза, жидкий кристалл. Показано, что при переходе от фазы гель к риппл-фазе влияние фосфолипида на гидратную оболочку изменяется с ослабляющего водородное связывание на усиливающее. Установлено, что протяженность гидратной оболочки липосом превышает 5 нм [4]. Показано, что комплекс Mg·АТФ формирует особую упорядоченную гидратную оболочку с образованием дополнительных водородных связей, чего не наблюдается ни для АТФ, ни для

Ca·АТФ. Это может иметь биологический смысл, поскольку лишь при связывании с Mg^{2+} АТФ участвует в биологически значимых реакциях [5, 6]. Гидратная оболочка ДНК содержит три области, отличающиеся от невозмущенной воды: более сильно связанные молекулы, область с бóльшим количеством свободных молекул, область с бóльшим количеством водородных связей.

Показано, что ионы K^+ в концентрации близкой к внутриклеточной существенно ослабляют все эффекты гидратации ДНК, что тоже может иметь биологический смысл. ДНК проявляет кооперативные эффекты гидратации по сравнению с отдельными нуклеотидами [7]. Установлен ряд особенностей гидратации сахаров с различной молекулярной структурой. Показана зависимость гидратации от ориентации ОН-групп моносахаридов и от типа гликозидных связей в полисахаридах. В противоположность ДНК, полисахариды проявляют антикооперативные эффекты гидратации [8].

Полученные данные существенно дополняют наши знания о гидратных оболочках биомолекул, а метод THz-TDS, позволяющий оперировать параметрами ДП водной фазы растворов, может стать полноценным структурным методом исследования водных растворов биомолекул, как ЯМР или ИК-спектроскопия.

С учетом того что протяженность гидратных оболочек оказывается сопоставима со средним расстоянием между биомолекулами в живых системах, особенный интерес представляет роль гидратных оболочек в процессах биомолекулярного взаимодействия. Исследования в данном направлении на стыке физической химии и молекулярной биофизики, по моему мнению, имеют большие перспективы.

Литература

[1] Penkov N.V., Penkova N.A. Effective medium model applied to biopolymer solutions. Applied Spectroscopy, 2021, vol. 75, no. 12, pp. 1510–1515. DOI: https://doi.org/10.1177/00037028211042027

[2] Пеньков Н.В., Яшин В.А., Фесенко Е.Е. (мл.), Фесенко Е.Е. Расчет количества свободных молекул воды в водных растворах с помощью спектральных параметров из терагерцовой области с учетом процессов экранировки. Биофизика, 2014, т. 59, № 3, с. 428–431.

[3] Penkov N., Yashin V., Fesenko E. (Jr.), Manokhin A., Fesenko E. A study of the effect of a protein on the structure of water in solution using terahertz time-domain spectroscopy. Applied Spectroscopy, 2018, vol. 72, no. 2, pp. 257–267. DOI: https://doi.org/10.1177/0003702817735551

[4] Penkov N.V., Yashin V.A., Belosludtsev K.N. Hydration shells of DPPC liposomes from the point of view of terahertz time-domain spectroscopy. Applied Spectroscopy, 2021, vol. 75, no. 2, pp. 189–198. DOI: https://doi.org/10.1177/0003702820949285

[5] Penkov N.V., Penkova N.A. Key differences of the hydrate shell structures of ATP and Mg·ATP revealed by terahertz time-domain spectroscopy and dynamic light scattering. Journal of Physical Chemistry. B, 2021, vol. 125, pp. 4375–4382. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.1c02276

[6] Penkov N.V., Penkova N.A., Lobyshev V.I. Special Role of Mg2+ in the Formation of the Hydration Shell of Adenosine Triphosphate. Physics of Wave Phenomena, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 344–350. DOI: https://doi.org/10.3103/S1541308X22050090

[7] Penkova N.A., Sharapov M.G., Penkov N.V. Hydration shells of DNA from the point of view of terahertz time-domain spectroscopy. Int J Mol Sci, 2021, vol. 22, no. 20, pp. 11089–11104. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms222011089

[8] Penkov N.V. Relationships between molecular structure of carbohydrates and their dynamic hydration shells revealed by terahertz time-domain spectroscopy. Int J Mol Sci, 2021, vol. 22, no. 21, pp. 11969–11988. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms222111969

УДК 535.37

Влияние центрального иона на фотолюминесцентные свойства органического лиганда из класса 1,3-дикетонов в составе координационных соединений редкоземельных ионов

Поликовский Трофим Александрович polikovskiy.ta@gmail.com
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Коршунов Владислав Михайлович vladkorshunov@bk.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Тайдаков Илья Викторович taidakov@mail.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Исследованы оптические свойства органического лиганда и его комплексов с трехвалетными ионами Al, Sc, Ga, In, La, Gd и Lu. Получены спектры оптического поглощения и фотолюминесценции. Показано, что координационные соединения имеют больший коэффициент молярной экстинкции по сравнению с чистым лигандом. Спектр люминесценции комплексов сдвинут в синюю область спектра по сравнению с чистым лигандом. Продемонстрировано, что энергии возбужденных состояний возрастают при координировании лиганда ионами.

Ключевые слова: *люминесценция, лантаноиды, лигандное окружение, координационные соединения*

В современном мире существует необходимость в создании новых люминесцентных материалов, излучающих в синей спектральной области. Такие материалы могут быть успешно применены при создании органических светоизлучающих диодов (OLEDs) [1], излучающих белый свет. Принцип работы таких светодиодов основан на полной или частичной конверсии синего света органического люминофора в люминесценцию зеленой и красной спектральной области. Одним из наиболее используемых классов веществ, излучающих в синей спектральной области, являются комплексы элементов платиновой группы – иридия и платины. Однако запасы таких металлов на Земле стремительно сокращаются, кроме того они обладают сравнительно высокой стоимостью. Поэтому в настоящее время идет активный поиск материалов, которые могли бы их заменить [2]. Для органических люминофоров свойственна низкая стоимость сырья и производства, однако эффективность люминесценции таких веществ ограничивается процессами релаксации энергии на колебательно-вращательных состояниях в молекуле [3]. Существует подход, который позволяет подавить эти безызлучательные побочные процессы и, следовательно, значительно увеличить эффективность люминесценции. Для этого необходимо химически присоединить несколько молекул органического лиганда к иону металла, то есть создать координационное соединение. В таких соединениях закрепляется жесткая конформация лиганда, что усиливает флуоресценцию из первого возбужденного синглетного состояния. Однако за счет сильного электрического поля иона, электронная плотность на лиганде перераспределяется, что приводит к изменению энергий возбужденных состояний. На сегодняшний день отсутствует теоретическая модель, способная предсказать как изменятся эти энергии лиганда в составе координационного соединения в зависимости от типа центрального иона [4].

В представленной работе была поставлена цель установить зависимости оптических свойств лигандного окружения координационных соединений ионов редкоземельных элементов, а также энергий их возбужденных состояний от типа центрального иона.

В качестве объекта исследования был выбран лиганд из класса 1,3-дикетонов — циклогексил(5-гидрокси-3-метил-1-фенил-1H-пиразо-4-ил)метанон и его координационные соединения с ионами редкоземельных элементов. Чтобы выяснить, как повлияет замена центрального иона на свойства координационного соединения, было решено использовать ионы из ряда лантаноидов La(III), Gd(III) и Lu(III) и из ряда переходных металлов Al(III), Sc(III), In(III) и Ga(III). Такой выбор обусловлен различной электронной структурой и различным зарядовым числом ионов в каждом ряду.

Спектры оптического поглощения были получены для всех комплексов и чистого лиганда. Как видно на рис. 1, в спектрах поглощения присутствуют две основные спектральные полосы поглощения, расположенные в ультрафиолетовой области спектра. Спектры, полученные для лантаноидов (La, Gd) и комплекса скандия, качественно напоминают спектр чистого лиганда. Молярная экстинкция (ε) монотонно возрастает от $1{,}2 \cdot 10^4$ л · моль$^{-1}$ · см$^{-1}$ у комплекса скандия до $5{,}5 \cdot 10^4$ л · моль$^{-1}$ · см$^{-1}$ у комплекса лантана при замене центрального иона на более тяжелый. Для комплекса гадолиния максимум оптического поглощения составил $3{,}7 \cdot 10^4$ л · моль$^{-1}$ · см$^{-1}$.Ион увеличивает поглощение лиганда в 10 раз и составляет $6{,}6 \cdot 10^4$ л · моль$^{-1}$ · см$^{-1}$. Так же у комплекса алюминия наблюдается сдвиг полос поглощения по сравнению с комплексами ионов лантаноидов и чистого лиганда L. Примечательно, что для этого комплекса обе полосы разрешаются лучше, чем те же полосы в спектре, зарегистрированном для чистого лиганда.

Максимумы оптического поглощения составили: 265 нм для комплекса гадолиния, 269 нм для комплекса лантана, 271 нм для комплексов скандия и 277 нм для комплекса алюминия. Для чистого лиганда максимум был зарегистрирован на длине волны 267 нм.

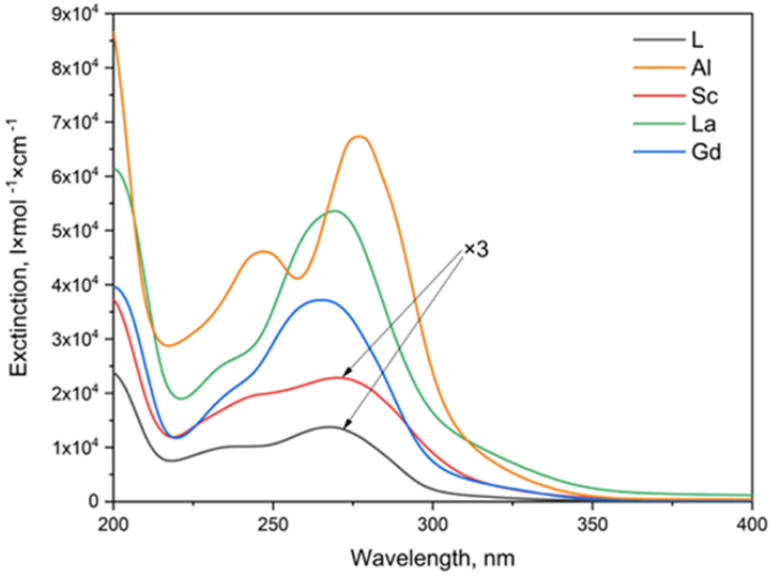


Рис. 1. Спектры оптического поглощения растворов комплексов и чистого лиганда

Спектры фотолюминесценции, измеренные при возбуждении при длине волны 340 нм, показаны на рис. 2. Все спектры нормированы на десять в их максимуме. Спектр чистого лиганда имеет широкую спектральную полосу (FWHM = 92 нм) с максимумом излучения на 530 нм и с широким плечом на больших длинах волн, до 800 нм. Наблюдалось существенное влияние типа центрального иона на спектр фотолюминесценции. Фактически максимум излучения смещается в синюю область оптического спектра. Например, длина волны излучения фотолюминесценции достигает максимума при 430 нм для комплексов редкоземельных элементов (Sc, La). Стоит отметить, что спектр полученный для Gd, демонстрирует широкую спектральную полосу (FWHM = 104 нм) и максимум с центром при 490 нм. Кроме того, имеется низкоинтенсивная спектральная полоса, расположенная в пределах 380...420 нм, совпадающая с максимумами фотолюминесценции комплексов Sc и La. Предположительно, перераспределение интенсивности излучения определяется наличием двойственной природы излучения: фосфоресценция лиганда на больших длинах волн и флуоресценция лиганда на длине волны 425 нм. Для комплекса Al наблюдается практически совпадающий по величине с комплексами Sc и La сдвиг, и его максимум фотолюминесценции составляет 458 нм.

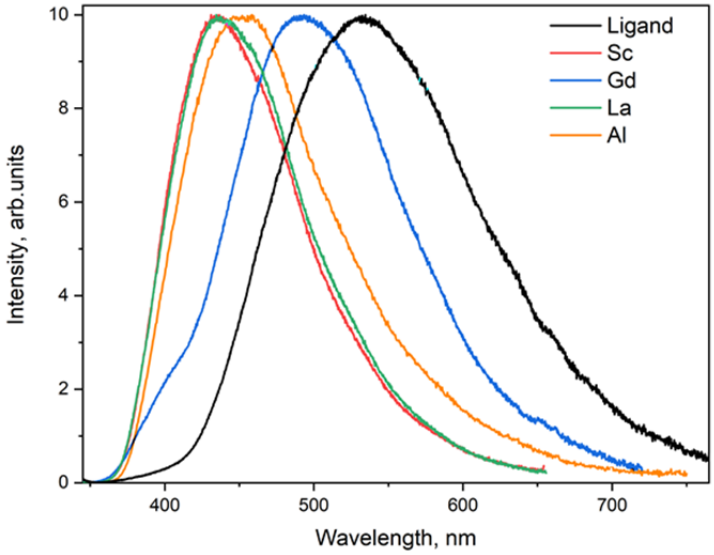


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции комплексов и чистого лиганда

Для определения эффективности люминесценции был измерен квантовый выход фотолюминесценции абсолютным методом. Так, наибольший квантовый выход был получен для комплекса лантана и составил 19,5 %. Для комплекса гадолиния — 19,0 %, для комплекса алюминия — 16,0 %, а для комплекса Sc — 10,6 %. для лиганда было получено значение в 0,5 %, т. е. наблюдается значительный рост квантового выхода до 39 раз при координировании лиганда ионами редкоземельных элементов.

В результате работы было установлено, что первое возбужденное синглетное состояние для комплексов возрастает относительно чистого лиганда и составляет примерно 27 500 $см^{-1}$. В свою очередь, превое возбужденное триплетное состояние воз-

растает с 22 100 см$^{-1}$ для лиганда до 22 700 см$^{-1}$ для комплекса скандия и для остальных комплексов составляет приблизительно 23 600 см$^{-1}$.

Информация о гранте

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-13-00272.

Литература

[1] Hasegawa Y., Kitagawa Y., Nakanishi T. Effective photosensitized, electrosensitized, and mechanosensitized luminescence of lanthanide complexes. NPG Asia Materials, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 52–70.

[2] Bünzli J.-C.G. On the design of highly luminescent lanthanide complexes. Coordination Chemistry Reviews, 2015, vol. 293–294, pp. 19–47.

[3] Ilichev V., Silantyeva L.I., Kukinov A.A., Bochkarev M.N. Photophysical properties of IR luminescent lanthanide complexes with polyfluorinated ligands. INEOS OPEN, 2019, vol. 2, no. 3. DOI: https://doi.org/10.32931/io1912r

[4] Лакович Д. Основы флуоресцентной спектроскопии: пер. с англ. Москва, Мир, 1986, 496 с.

УДК 535.242

Расчетные методики современной визуальной фотометрии

Пясецкий Вячеслав Борисович piasetsky@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены основные положения методик расчета визуальных реакций стандартных наблюдателей Международной комиссии по освещению (МКО) с основными расчетными выражениями. Показано развитие научных представлений о зрении человека в части реакции на яркость излучения. Обоснована необходимость учета реакций фоторецепторов ночного зрения в расчетах визуальных реакций при дневных уровнях яркости. Это позволяет устранить несоответствие между значениями визуальной и расчетной яркости дневного уровня в условиях изменения цветовой температуры излучения при постоянстве светового потока. На основании анализа документов МКО показано направление дальнейшего развития расчетных методик физической фотометрии.

Ключевые слова: *стандартный фотометрический наблюдатель, фотопическое зрение, скотопическое зрение, модифицированная функция видности*

Расчет визуального восприятия яркости пространства предметов — актуальная тема в области светотехники. Примерами практических задач, которые решаются с учетом закономерностей визуальной фотометрии, являются исследование скорости реакций человека в условиях меняющейся освещенности, определение оптимального уровня искусственного освещения общественных и производственных территорий, фасадов зданий, автотрасс, расчет осветительных систем транспортных средств. Актуальность темы подтверждается значительным числом публикаций (см., например, [1–3]).

Расчет уровня визуального восприятия излучения основан на стандартах и рекомендациях Международной комиссии по освещению (МКО). Визуальная яркость источника света зависит не только от количества испускаемого им излучения, но также от спектрального состава этого излучения и функции зрительного отклика наблюдателя. Поскольку зрительная реакция человека варьируется в зависимости от уровня освещенности и от человека к человеку, точная фотометрия требует определения репрезентативных стандартных наблюдателей. Стандарт МКО [4] представляет современную систему физической фотометрии, принятой за основу для измерения света и официально принятую Международным комитетом мер и весов. Физическая фотометрия МКО определяет процедуры количественной оценки оптического излучения с точки зрения функций видности двух стандартных наблюдателей. Первый, характеризующийся функцией $V(\lambda)$, представляет фотопическое (дневное) зрение при яркости пространства предметов свыше 5 кд/м^2, а второй, характеризующийся функцией $V'(\lambda)$, — скотопическое (ночное) зрение при яркости менее $5\cdot10^{-3}$ кд/м^2. В сочетании с базовой фотометрической единицей СИ, канделой, эти функции составляют систему, позволяющую определять значения фотометрических величин для всех типов источников света независимо от спектрального состава излучения. Для фотопического и

скотопического наблюдателей яркость описывается через соответствующие функции световой эффективности:

фотопическая яркость

$$L_p = L_{\lambda max} \int_0^\infty K\,(\lambda)\phi(\lambda)d\lambda; \quad (1)$$

скотопическая яркость

$$L_s(\lambda) = L_{\lambda max} \int_0^\infty K'\,(\lambda)\phi(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

$L_{\lambda\max}$ — максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости; $\varphi(\lambda)$ — нормированная функция спектральной плотности потока излучения. Световая эффективность излучения для фотопического наблюдателя

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) = 683{,}002V(\lambda) \approx 683V(\lambda).$$

Для скотопического наблюдателя

$$K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda) = 1700{,}05V'(\lambda) \approx 1700V'(\lambda).$$

Диапазон яркости от $5\cdot10^{-3}$ до 5 кд/м^2 определен как мезопический (сумеречный) [5]. В этом диапазоне световая эффективность излучения представляется в виде линейной комбинации функций $K(\lambda)$и $K'(\lambda)$:

$$K_{mes}(\lambda) = mK(\lambda) + (1-m)K'(\lambda).$$

Параметр m описывает соотношение фотопической и скотопической реакций и зависит от яркости пространства предметов:

$$m_n = a + blg\big(L_{mes,n}\big),$$

где постоянные a = 0,7670, b = 0,3334. Мезопический уровень яркости рассчитывается по формуле

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + \big(1-m_{(n-1)}\big)L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + \big(1-m_{(n-1)}\big)V'(\lambda_0)},$$

где n = 0, 1, 2, … — номер итерационного шага, $0 \le m \le 1$,$m_0 = 0{,}5$; $V'(\lambda_0) = 683/1700$.

Визуальное восприятие света традиционно объясняется работой двух типов фоторецепторов, находящихся в сетчатке глаза: колбочек и палочек. Приведенные выше методики расчета основаны на предположении, что колбочки (три вида: S-, L- и M-рецепторы) отвечают за фотопическое зрение и цветовые ощущения, палочки, не являясь цветочувствительными, — за скотопическое, а в мезопическом диапазоне на излучение реагируют оба типа рецепторов. Однако это выполняется лишь частично в той или иной степени в зависимости от интенсивности и спектрального состава видимого излучения. В 1963 году было опубликовано сообщение [6] о несовпадении зна-

чений яркости пространства предметов, получаемых расчетным путем и экспериментально. В работе [7] указано, что рекомендации МКО нуждаются во введении особых ограничений, и приведена оценка уровня яркости пространства предметов, при которой можно ожидать полного «отключения» палочек в формировании зрительных ощущений, — примерно 30000 кд/м^2. Это чрезвычайно высокое значение, выходящее за пределы естественных условий наблюдения, превышающее безопасный для глаз уровень. В 2003 году появилось сообщение [8] о наличии неизвестных ранее светочувствительных элементов в сетчатке человеческого глаза. Они получили обозначение ipRGC (Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells — Внутренние фоточувствительные ганглиозные клетки сетчатки), или pRGC (Photosensitive retinal ganglion cells — Фоточувствительные ганглиозные клетки сетчатки), или mRGC (Melanopsin-containing retinal ganglion cells — Меланопсиносодержащие ганглиозные клетки сетчатки). Фотопигмент этих клеток, меланопсин, реагирует главным образом на «синюю» часть видимого света с максимумом чувствительности около 480 нм. В 2007 году было установлено, что ipRGC связаны с формированием визуальных образов в зрительном центре мозга человека [9].

Развитие представлений о механизмах зрительного восприятия обуславливает изменения и дополнения, которые МКО вносит в рекомендуемые методики физической фотометрии. В 1988 году МКО утвердила модифицированную функцию световой эффективности $V_m(\lambda)$ [10], которая отличается от функции $V(\lambda)$ в диапазоне длин волн 380...460 нм (см. рисунок).

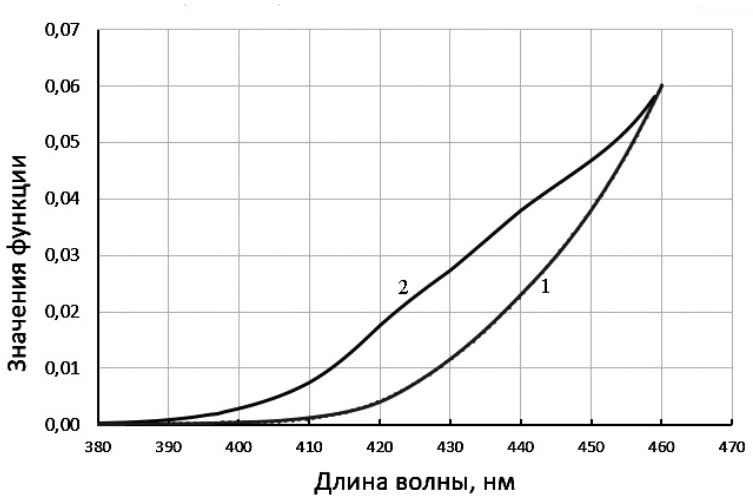


Рис. Функции световой эффективности: 1 — V(λ); 2 — Vm(λ)

ipRGC также представлены в официальных документах МКО [см., например, 11]. Эти документы содержат количественное описание функций спектральной чувствительности глаза и значения показателей для описания способности оптического излучения стимулировать пять типов фоторецепторов, которые могут вносить вклад через ipRGC в опосредованные сетчаткой зрительные эффекты света. Стандарт [11] представлен в статусе проекта, допускающего изменения и дополнения, до настоящего времени в окончательном виде не опубликован. Как сказано в его преамбуле, стандарт

не дает полной информации для конкретных применений освещения или для количественного прогнозирования визуальных реакций на свет, не предназначен для колориметрического контекста, а также не касается вопросов здоровья и относится только к фоторецепции сетчатки. Исследования в этой области продолжаются до настоящего времени (см., например, [12].

Таким образом, для точного описания эффектов дневного зрения только фотопической функции видности $V(\lambda)$ недостаточно, необходим также учет скотопической составляющей. Это может быть реализовано двумя разными методиками. Первая — расчет по (1) с модифицированной функцией световой эффективности $V_m(\lambda)$ вместо $V(\lambda)$. МКО предлагает применять такой расчет для нахождения реакции фотопического наблюдателя на излучение с заметной «синей» составляющей, но конкретные рекомендации для этого варианта не сформулированы. Поэтому эффективность такой замены необходимо исследовать в конкретных задачах с учетом спектров наблюдаемых излучений. Вторая методика основана на определении отношения I_S/I_P– значений соответствующих интегралов в выражениях (2) и (1). Известна оценочная формула, аппроксимирующая экспериментально измеренную зависимость уровня визуального ощущения яркости L_{VISP} как функцию этого отношения [13]:

$$L_{VISP} = L_p \left(\frac{L_S}{L_p}\right)^{0,78}.$$

Учет скотопической составляющей позволяет устранить проблему, которая состоит в изменении уровня видимой яркости «белого» излучения при изменении его цветовой температуры при сохранении постоянным значения L_P, рассчитанного по (1). Следует иметь в виду, что $V(\lambda)$, $V'(\lambda)$ и $V_m(\lambda)$ – это функции наблюдателей МКО с малым угловым полем (2°). Известна функция $V_{10}(\lambda)$ для фотопического наблюдателя МКО с угловым полем 10°. Но функции $V'(\lambda)$ и $V_m(\lambda)$ для углового поля 10° не утверждены. Кроме того, продолжаются исследования ipRGC. Поэтому в перспективе следует ожидать развития расчетных методик физической фотометрии, основные исходные положения которых сформулированы в стандарте МКО [11] на основе фундаментальных характеристик зрения.

Литература

[1] Ylinen A.-M., Tahkamo L., Puolakka M., Halonen L. Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design. LED Street Lighting Case Study. Available at: http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526044101/article5.pdf (accessed October 28, 2022).

[2] Bullough J.D., Radetsky L.C. Analysis of new highway lighting technologies. Available at: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(305)_FR.pdf (accessed October 28, 2022).

[3] Diakite-Kortlever A.K., Knoop M. Non-image forming potential in urban settings – An approach considering orientation-dependent spectral properties of daylight. Energy and Buildings, 2022, vol. 265, art.112080. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112080

[4] Photometry – The CIE system of physical photometry – ISO 23539:2005(F)/CIE S 010/F: 2007.

[5] Recommended system for mesopic photometry based on visual performance (CIE 191:2010). CIE, Vienna, 2010.

[6] Sanders C.L., Wyszecki G. Correlate for brightness in terms of CIE color matching data. Compte-Rendu, 1963, 15e Session CIE, pp. 221–230.

[7] Judd D.B., Wyszecki G.W. Color in business, science, and industry. Wiley, 1975, 553 p.

[8] Et H.S. al. Seeing more clearly: recent advances in understanding retinal circuitry. Science, 2003, vol. 302, pp. 408–411.

[9] Zaidi F.H., Hull J.T., Peirson S.N., Wulff K., Aeschbach D., Gooley J.J., Brainard G.C., Gregory-Evans K., Rizzo J.F. 3rd, Czeisler C.A., Foster R.G., Moseley M.J., Lockley S.W. Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. Curr Biol, 2007, vol. 17 (24), pp. 2122–2128.

[10] CIE 086-1990 — CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency for Photopic Vision.

[11] CIE S 026, Revision E, 2018 — CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light.

[12] Tsujimura Si., Takahashi Y. Melanopsin Contributions to Human Brightness Perception. Shamey, R. (eds.) Encyclopedia of Color Science and Technology. Berlin, Heidelberg, Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_422-1

[13] Berman S.M. Energy efficiency Consequences of scotopic sensitivity. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1992, pp. 3–14.

УДК 662

О хемилюминесценции в газовых взрывах высокого и низкого давлений

Светличный Сергей Иванович svetl.1950@gmail.com
Филиал ФИЦ ХФ РАН

Дроздов Михаил Сергеевич drozdoffms@mail.ru
Филиал ФИЦ ХФ РАН

Проанализированы результаты исследования свечения газовых высокотемпературных взрывов (смеси метан / воздух, сероуглерод / кислород, дициан / кислород и др.), в которых на начальном этапе может иметь место неравновесное излучение, связанное с химической реакций — хемилюминесценция. Анализ расчетных и опытных данных показывает, что во всех случаях при достаточно больших давлениях и температурах свечение имеет преимущественно термический равновесный характер в соответствии с реальной температурой и оптической плотностью продуктов взрыва. Хемилюминесценция, даже с случае такой известной хемилюминесцентной реакцией как окисление сероуглерода, составляет весьма незначительную долю и существенной роли в общем балансе излучаемой энергии не играет. Исключением могут быть так называемые «холодные взрывы» при малых давлениях и с чрезвычайно малым тепловыделением.

Ключевые слова: *хемилюминесценция, равновесное излучение, взрывательное устройство, источники света*

Взрывы газовых смесей в замкнутых объемах, часто, к сожалению, являющиеся причиной разрушения жилых сооружений, имеют и весьма положительные применения — уже полтора века применяются в двигателях внутреннего сгорания и др. устройствах, в частности — нашли применение, в химико-физических лазерах и лампах [1]. В последнем случае газовый взрыв служит источником излучения, причем, чем выше адиабатическая (термодинамическая) температура продуктов взрыва, тем ярче свечение и, соответственно, выше КПД химико-физической лампы. Расчеты показывают, что в типичных случаях КПД таких ламп и лазеров:

$$h = E/Q \sim (T_m)^n,$$

где n = 1,0...1,5; E — энергия, излучаемая продуктами взрыва; Q — энергозапас смеси, пропорциональный начальному давлению; T_m — начальная максимальная (близкая к адиабатической) температура [2].

Адиабатическая температура взрыва рассчитываемся при условиях термодинамического равновесия и, что немаловажно, равномерности параметров взрыва по объему. Исключаются локальные перегревы, которые могут быть связаны с наличием детонационной волны или Махе-эффекта.

Интересная ситуация, однако, возникает, если газовая смесь способна к самовоспламенению в результате разветвленно-цепной реакции. В таком случае, как известно, концентрации активных частиц и, соответственно, излучение реакционной среды мо-

гут существенно превышать термодинамически равновесные величины, что проявляется в явлении хемилюминесценции. Среди таких хемилюминесцентных реакций известна и реакция окисления сероуглерода. С нее, в надежде на сверхравновесное свечение с яркостной температурой, превышающей адиабатическую, началась в свое время эпопея химико-физических лазеров. Имеет смысл, практический и теоретический, проанализировать возможный вклад хемилюминесценции в свечение взрыва при самовоспламенении газовых смесей на примере смеси сероуглерода и кислорода.

Применялись чаще всего смеси состава $CS_2 : O_2 = 1: 4$ при начальном давлении от 0,01 до 1 атм. Самовоспламенение в кюветах диаметром от 3 до 8 см происходило при температурах 120...230 °С с периодами индукции от нескольких до сотен с. Импульсы видимого и ультрафиолетового излучения (300...480 нм), принадлежащего продукту SO_2, имели длительность обычно 4...6 мс. Степень выгорания, судя по масс-спектрометрическим анализам — полная.

При достаточно высокой температуре и умеренном давлении, т. е. внутри полуострова цепного воспламенения, реакция начинается как разветвленно-цепная, сначала сравнительно медленная (секунды и более), по упрощенной схеме так:

- $CS_2 + O_2 = SO_2 + CS$ (зарождение);
- $CS + O_2 = OCS + O$ (очень медленный элементарный акт);
- $O + CS_2 = CS + SO$ (разветвление, лимитируемое предыдущей реакцией);
- $SO + O_2 = SO_2 + O$ (продолжение цепи).

При этом по мере переработки исходного сероуглерода в периоде индукции растут концентрации радикалов и атомов, во много раз превосходящие термодинамически равновесные при данной температуре, которая остается практически постоянной. Имеет место и рекомбинация частиц, в том числе радиационная: $SO+O = SO_2 + hv$ — основной канал хемилюминесценции.

Когда концентрация долгоживущих радикалов CS приближается к величине порядка 0,1 от начальной концентрации CS_2, сменяется механизм реакции — подключается реакция $O + CS = CO + S$, далее $S + O_2 = SO + O$, наступает быстрое разветвление и ускорение реакции с характерным временем мсек, температура и давление начинают резко подниматься. И если в периоде индукции концентрации частиц росли за счет неравновесной химической реакции, то далее ускорение происходит за счет роста температуры, взрыв из режима разветвленно-цепного переходит в тепло-цепочечный и очень быстро в обычный тепловой — с ускорением за счет роста температуры, а не количества активных частиц. И если свечение в видимой и УФ области определялось ранее рекомбинацией неравновесных частиц SO+O, то при высоких температурах и давлении, концентрации частиц являются термодинамически равновесными, таковым становится и излучение среды взрыва. Конечные продукты реакции CO_2 и SO_2 при высоких температурах диссоциируют на CO, SO и O. Так, при 3600 К — адиабатической (максимальной) температуре взрыва смеси $CS_2 : O_2 = 1: 4$ начального давления 1 атм — конечные продукты SO_2 и CO_2 диссоциированы приблизительно на 30 и 60 %, соответственно.

Попытаемся оценить вклад хемилюминесценции в излучение (ВС и УФ) взрыва. По предложенной кинетической схеме нетрудно оценить неравновесные концентрации частиц SO и O к моменту нелинейного ускорения реакции, т. е. к концу практически изотермического периода хемилюминесцентного свечения, ибо далее очень быстро наступает тепловое равновесие. Так, для типичных условий (смесь с соотношением компонентов 1:4, начальная температура 400...420 К, давление 0,1...0,2 атм) концентрации O и SO перед тепловым взрывом порядка $10^{14}...10^{15}$ 1/см^3. При термодинами-

ческом равновесии SO и O как результат диссоциации SO_2 достигают таких же концентраций при температуре среды взрыва около 1100...1300 К, т. е. разогреве порядка 700...800 К, что соответствует глубине реакции (доле превращения CS_2) приблизительно 20 %. Далее, после небольшого переходного периода, при интенсивном росте температуры, наступает равновесная диссоциация SO_2 на SO и O в гораздо больших количествах, а равновесное температурное свечение SO_2 в результате как рекомбинации, так и прямого термического возбуждения электронного уровня (эти процессы термодинамически связаны) значительно превышает по интенсивности предыдущее хемилюминесцентное неравновесное излучение.

Таким образом, вклад хемилюминесценции никак не может превышать 20...25 % всего излучения на стадии превращения (передний фронт импульса излучения), а скорее всего — заметно меньше этой величины. Учитывая же, что основное излучение относится к заднему фронту (стадия остывания продуктов взрыва), который примерно в 3–4 раза длиннее переднего фронта), оценка дает никак не более 5...6 % от всего видимого и УФ-излучения взрыва. Последнее, однако, по нашим данным составляет только небольшую часть от очень интенсивного ИК-свечения взрыва смесей CS_2/O_2. Доля хемилюминесценции мала и незаметна на фоне мощного свечения газового горячего взрыва. Именно поэтому не оправдались в свое время надежды на использование смесей сероуглерода с кислородом для накачки активного элемента из рубина.

Противоположная ситуация в смысле хемилюминесценции имеет место в так называемых холодных взрывах, в известной мере — аналогах холодных пламен [3, 4]. Холодные («медленные») взрывы в смесях CS_2/O_2 реализуются вблизи мыса полуострова воспламенения, т. е. при относительно низких температурах и относительно высоком давлении, чаще всего, при значительном разбавлении смеси инертным газом. Например, в смеси $CS_2 : O_2 : Ar = 1: 4: 30$ в сосуде диаметром 29 мм при температурах 130...170° и общем давлении 40...80 тор имеет место холодный взрыв с характерной «двугорбой» кинетикой свечения. Это фактически тление с неполной, но значительной, степенью выгорания, длительностью порядка 10 с. Температура в таких режимах поднимается всего на 10...15 градусов, что слабо влияет на механизм реакции. Спектр свечения холодного взрыва существенно отличается от видимого свечения горячих взрывов, где оно связано почти исключительно с рекомбинацией и кинетическим возбуждением (в равновесии эти процессы не разделить) молекул SO_2. В холодном взрыве кроме SO_2 (континуум 320...480 нм) светятся также S_2 (первый «горб») и SO (второй «горб» кинетических кривых). Причем, в силу низкой температуры среды, электронное возбуждение их происходит исключительно в результате соответствующих реакций рекомбинации.

Интенсивность слабого белесого свечения, оцененная нами, примерно на 10 порядков превосходит равновесное свечение при температуре 400...450 К и соответствует яркостной температуре 800...900 К, что гораздо выше температуры в кювете. Такая или близкая степень неравновесности — на протяжении всей затянувшейся вспышки, т. е. в подобных взрывах свечение исключительно хемилюминесцентное. Реакция прекращается, скорее всего, из-за наработки продуктов, обрывающих цепи, а также значительного, хоть и не полного, израсходования CS_2.

Таким образом, не смотря на существование в ряде случае режимов хемилюминесценции, в обычных взрывах достаточно высокого давления (тем более, не с разветвленно-цепными реакциями) свечение всегда практически равновесное. Более то-

го, оно часто не превышает по яркостной температуре термодинамическую температуру взрыва из-за недостаточной оптической плотности среды горячих продуктов взрыва.

Разобравшись с физикой процесса, можно строить математическую модель «превращения» неравновесного свечения в равновесное с непрерывным вычислением степени неравновесности по мере протекания взрыва. Попытки таких расчетов уже были нами сделаны, но на компьютерах с устаревшим матобеспечением. Счет срывался из-за слишком быстрого роста параметров с разогревом среды. Сейчас мы предпринимаем усилия по расчету с более совершенной программой.

Информация о гранте

Работа была поддержана Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013– 2020 гг. (тема № 122040500060-4)

Литература

[1] Дроздов М.С., Светличный С.И. Исследования ХФЛ в ФИНЭПХФ РАН. История науки и техники, 2017, № 3, с. 63–77.

[2] Дроздов М.С., Светличный С.И. Импульсные химические источники света. Известия РАН. Энергетика, 2017, № 1, с. 93–106.

[3] Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. Москва, Наука, 1974, с. 483–485.

[4] Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. Москва, Наука, 1979, 480 с.

УДК 535.37

Влияние микробиологического поражения на спектральные характеристики плодов винограда в оптическом диапазоне

Скрабатун Александр Владимирович alskrabatun@mail.ru
ФИАН; МГТУ им. Н.Э. Баумана

Маслов Артемий Глебович maslov_art@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Шарандин Евгений Анатольевич shar@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гладышев Владимир Олегович gladyshev@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Николаев Павел Петрович ppn@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Исследованы спектры комбинационного рассеяния и фотолюминесценции плодов зеленого винограда при возбуждении зеленым непрерывным лазером. Обнаружена высокоинтенсивная фотолюминесценция в спектральной области, соответствующей красному цвету. В спектре рассеянного излучения зарегистрированы две комбинационные линии, которые соответствуют колебаниям связей C–C и C=C. При образовании плесени на поверхности плода винограда интенсивность фотолюминесценции значительно уменьшается, и происходит смещение максимума вторичного излучения в коротковолновую область. В спектре комбинационного рассеяния при этом появляется два дополнительных комбинационных спутника смещенных относительно первоначальных в длинноволновую область.

Ключевые слова: *люминесценция, комбинационное рассеяние, виноград, плесень, внутримолекулярные колебания, длина волны, интенсивность фотолюминесценции*

Введение

Изучение различных агрокультур актуально с применением не только химических, но и физических методов. Преимуществом последних является неразрушающий характер и оперативность проведения исследования. В настоящее время заметно повысилась интенсивность исследований спектральных характеристик биологических объектов. Например, в [1] применяется микроволновая спектроскопия для изучения качества фруктов. В [2] представлены результаты по контролю грануляции помело с использованием оптической спектроскопии и машинного обучения. Машинное обучение также применяется для исследования болезней винограда [3]. Последняя задача является особенно актуальной в связи с обозначившейся тенденцией на увеличение пораженных площадей виноградников. Поскольку возбудителями основных болезней винограда являются различные грибки, целью этой работы является исследование влияния микробиологических объектов на спектр вторичного излучения плодов винограда. Для того чтобы дополнить существующую научную информацию в работе проведено изучение спектров комбинационного рассеяния (КР) плодов зеленого винограда и влияния микробиологического поражения на спектры рассеянного излучения и фотолюминисценции (ФЛ).

Методика эксперимента

Объектами исследования были плоды зеленого винограда и плоды, содержащие на поверхности слои черной, серой или белой плесени. Спонтанное КР и ФЛ в плодах зеленого винограда возбуждались непрерывным полупроводниковым лазером мощностью 30 мВт и длиной волны излучения λ = 532 нм. Вторичное излучение через двухжильный световод попадало на щель спектрометра BWS465-532S с многоэлементным приемником, позволяющим регистрировать спектр КР в диапазоне 50...4000 см$^{-1}$ со спектральным разрешением ≈ 4,5 см$^{-1}$. Схема эксперимента была аналогичной той, что применялась в [4]. Измерения осуществлялись при комнатной температуре.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлены результаты измеренного вторичного излучения не подверженного плесени плода зеленого винограда.

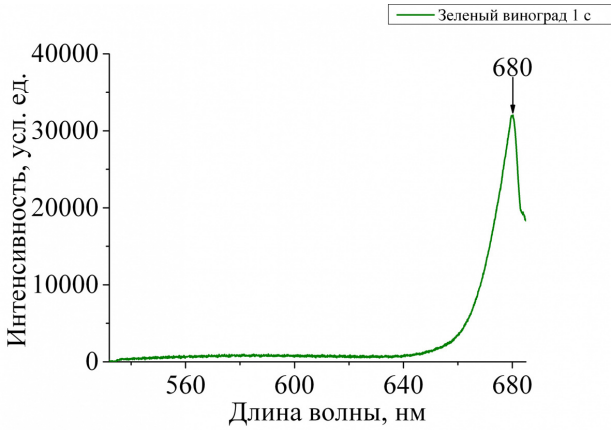


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции плода винограда в зависимости от длины волны

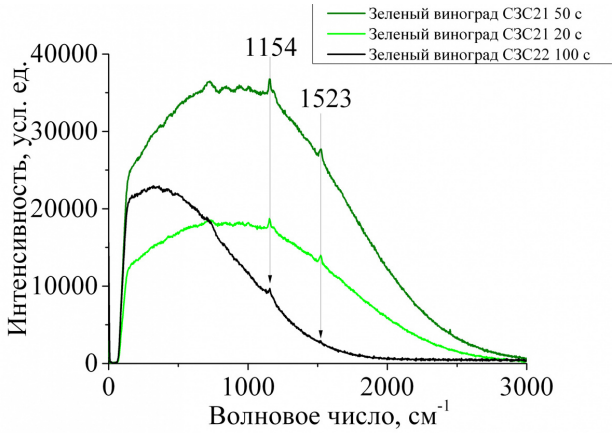


Рис. 2. Спектр комбинационного рассеяния плода винограда в зависимости от волного числа

На рис. 1 представлен спектр ФЛ поверхности плода винограда. Длина волны, на которую приходится максимум ФЛ у здорового зеленого винограда составляет 680 нм. Поскольку интенсивность линий КР значительно слабее излучения ФЛ, в направлении регистрации рассеянного излучения были установлены светофильтры СЗС21 или СЗС22 для подавления сигнала ФЛ.

На рис. 2 видно, что в отсутствии высокоинтенсивной ФЛ и увеличении времени экспозиции, становится возможным зарегистрировать дополнительные линии в спектре. Два относительно слабых пика интенсивности с волновыми числами ν = 1154 и 1523 см$^{-1}$ относительно длины волны возбуждающего излучения λ = 532 нм видно с применением обоих фильтров. Приведенные сдвиги частот соответствуют колебаниям растяжения — сжатия связи C–C и осцилляциям связи C=C соответственно [5].

На рис. 3 представлен спектр КР винограда подверженному длительному микробиологическому воздействию. Плесень, плотно покрывавшая поверхность зеленого плода винограда, имела черный цвет.

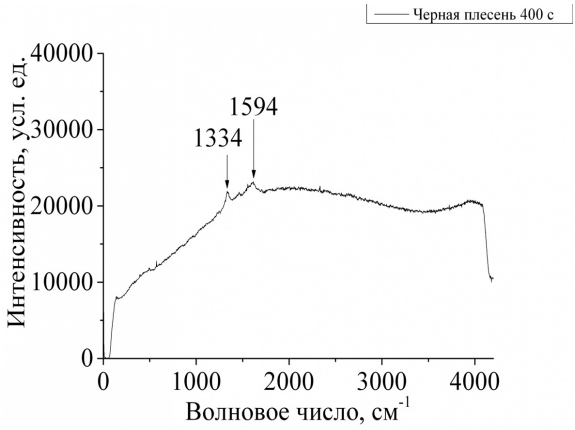


Рис. 3. Спектр комбинационного рассеяния плода винограда покрытого слоем черной плесени

В отличие от чистого винограда спектр КР и ФЛ плесневелого плода имеет несколько различий. На рис. 3 видно проявление двух дополнительных спутников КР с волновыми числами 1334 и 1594 см$^{-1}$, которые, по-видимому, соответствуют внутренним осцилляциям присущих плесени. При этом по высокочастотной области спектра видно, что излучение ФЛ поверхности винограда значительно подавлено.

Заключение

Таким образом, были проанализированы спектры ФЛ и КР здоровых плодов зеленого винограда и подверженных плесени. Зарегистрированы существенные различия в спектрах как в появлении различных линий КР, так и различия в интенсивности и спектральном положении излучения ФЛ.

Литература

[1] Jawad H., Lanteri J., Migliaccio C., Pichot C., Platt I.G., Tan A.E.-C., Eccleston K.W., Woodhead I.M. Microwave modeling and experiments for non destructive control improved quality of

fruit. 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). IEEE, 2017, pp. 124–127. DOI: https://doi.org/10.1109/CAMA.2017.8273375

[2] Sun X., Xu S., Lu H. Non-destructive identification and estimation of granulation in honey pomelo using visible and near-infrared transmittance spectroscopy combined with machine vision technology. Applied Sciences, 2020, vol. 10, no. 16, art. no. 5399. DOI: https://doi.org/10.3390/app10165399

[3] Rançon F., Bombrun L., Keresztes B., Germain C. Comparison of SIFT Encoded and Deep Learning Features for the Classification and Detection of Esca Disease in Bordeaux Vineyards. Remote Sens. 2019, vol. 11, no. 1. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11010001

[4] Горелик В.С., Скрабатун А.В., Орлович В.А., Войнов Ю.П., Водчиц А.И., Пятышев А.Ю. Параметрическое вынужденное комбинационное рассеяние света в кристаллах нитрата бария. Квантовая электроника, 2019, т. 49, № 3, с. 231–236.

[5] Chung P.J., Singh G.P., Huang C.-H., Koyyappurath S., Seo J.S., Mao H.-Z., Diloknawarit P., Ram R.J., Sarojam R., Chua N.-H. Rapid detection and quantification of plant Innate immunity response using raman spectroscopy. Frontiers in Plant Science, 2021, vol. 12.
DOI: https://doi.org/ 10.3389/fpls.2021.746586

УДК 535.375.5

Комбинационное рассеяние в кристаллах хлористого аммония, легированных ионами меди и кобальта

Скрабатун Александр Владимирович alskrabatun@mail.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН МГТУ им. Н.Э. Баумана

Пятышев Александр Юрьевич jb_valensia@mail.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Исследованы спектры спонтанного комбинационного рассеяния в кристаллах хлористого аммония, легированного ионами двухвалентной меди и кобальта. Используемые примеси представляли собой дефекты внедрения, которые проявлялись в виде нескольких дополнительных полос в области решеточных колебаний в спектре рассеянного излучения. Обнаружены две дополнительные линии комбинационного рассеяния с частотными сдвигами 432, 461 см–1 при легировании кристалла NH4Cl ионами кобальта. Добавление ионов двухвалентной меди в кристалл хлористого аммония приводит к появлению одного пика с комбинационной частотой 443 см–1. Увеличение содержания примеси внедрения в исследуемом кристалле приводит к возрастанию интенсивности дополнительных решеточных колебательных мод.

Ключевые слова: *рамановское рассеяние, хлористый аммоний, кобальт, медь, спектр, примеси, решеточные моды*

ВВЕДЕНИЕ

Семейство кристаллов галогенидов аммония NH_4Hal (Hal — Cl, Br, I или F) является одними из простейших квазимолекулярных кристаллов, содержащих в своем составе ион NH_4^+. При комнатной температуре галогениды аммония имеют пространственную группу симметрии O_h^1, при этомкристаллическая фаза этих кристаллов является неупорядоченной. Образующаяся неупорядоченность приводит к появлению в спектрах комбинационного рассеяния (КР) и инфракрасного (ИК) поглощения дополнительных линий в виде диффузных перекрывающихся полос [1, 2]. Спектральный диапазон внутренних мод кристалла NH_4Cl изучался методами КР при различных геометриях рассеяния [3]. Наблюдался частотный сдвиг фундаментальных и составных КР-компонент солей аммония при приложении к кристаллам внешнего давления. По рассчитанным постоянным Грюнайзена был сделан вывод о существенном вкладе водородных связей на частоты колебаний хлористого аммония [4].

Кристаллы хлорида аммония, легированные различными ионами металлов активно изучались методами ЭПР, оптического поглощения и др. [5, 6]. Примеси Cu^{2+} и Co^{2+} в NH_4Cl представляют собой дефекты внедрения, находящиеся на оси [100] между двумя ионами NH_4^+ [5]. Добавление двухвалетных атомов меди или кобальта в кристалл хлорида аммония приводит к появлению дополнительных полос поглощения в оптическом диапазоне спектра [6]. К настоящему времени изучены спектры КР легированного медью хлористого аммония в небольшом спектральном диапазоне до 500 $см^{-1}$ при фиксированной концентрации. Таким образом, целью данной работы было изучение полных спектров КР как легированного медью хлористого аммония, так и легированного кобальтом, с различной концентрацией примеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спонтанное КР в исследуемых кристаллах возбуждалось непрерывным полупроводниковым лазером мощностью 30 мВт и длиной волны излучения λ = 532 нм. Сигнал КР попадал на щель спектрометра BWS465-532S с многоэлементным приемником, позволяющим регистрировать спектр КР в диапазоне 50...4000 см$^{-1}$ со спектральным разрешением ≈ 4,5 см$^{-1}$.

На рис. 1 представлен спектр КР хлористого аммония с массовым содержанием кобальта 0,4 %.

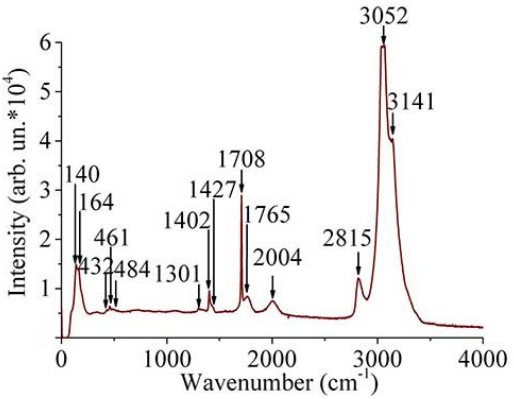


Рис. 1. Спектр КР кристалла NH4Cl:Co с содержанием кобальта 0,4 %

Для кристалла NH_4Cl:Co в области внешних колебаний наблюдается две дополнительные слабые линии с частотами 432, 461 см$^{-1}$ при содержании кобальта 0,4 %. Эти линии являются характерными для легированного кобальтом хлористого аммония. Компонента спектра КР с частотой 461 см$^{-1}$ связана с дыхательными осцилляциями иона Co^{2+} вдоль связи с NH_3.

На рис. 2 приведен спектр спонтанного КР кристалла NH_4Cl легированного медью, с массовым содержанием примеси 0,4 %.

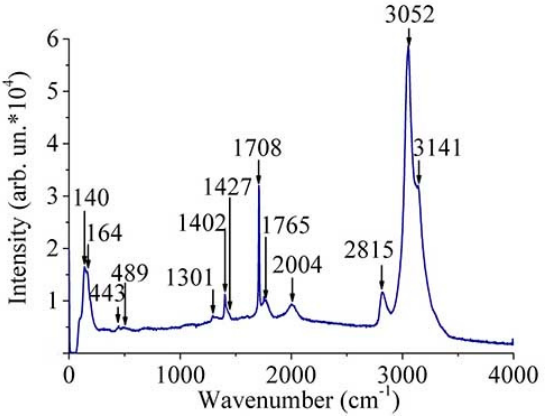


Рис. 2. Спектр КР кристалла NH4Cl:Cu с содержанием меди 0,4 %

В области решеточных оптических колебаний, соответствующих трансляции аммония относительно хлора, присутствуют две дополнительные близкие по частотам компоненты. В области характерных для легированных кристаллов линий КР 400...500 $см^{-1}$ наблюдается существенное различие. Так, для кристалла NH_4Cl:Cu в этой области наблюдается характерная линия, соответствующая колебанию растяжения Cu^{2+}-NH_3 типа A_{1g}, частота которой составляет 443 $см^{-1}$. При увеличении концентрации меди от 0,26 до 0,4 % увеличивается интегральная интенсивность мод, связанных с колебаниями примесных атомов меди, относительно остальных внутренних и внешних колебаний кристалла.

Информация о гранте

Работа выполнена при поддержке РФФИ и БРФФИ (грант № 20-52-04001 Бел_мол_а).

Литература

[1] Горелик В.С., Митин Г.Г., Сущинский М.М. Комбинационное рассеяние света на колебательном биэкситоне в кристаллах NH4Cl. ФТТ, 1974, т. 16, № 5, с. 1562–1564.

[2] Wang C.H., Wright R.B. Raman scattering study of the disorder order phase transition in NH4Cl. II. The Journal of Chemical Physics, 1973, vol. 58, no. 4, pp. 1411–1419.

[3] Decius J.C., Fredrickson L.R. Polarized Raman spectrum of ordered NH4Cl in the NH stretch region. J Chem Phys, 1974, vol. 60, pp. 4630–4631.

[4] Ebisuzaki Y. Raman spectra of NH4Cl and NH4Br: Dependence of the librational and the internal modes of the ion on volume and on nitrogen-halogen distance. J Chem Phys, 1974, vol. 61, pp. 3170–3180.

[5] Narayana P.A., Venkateswarlu P. Optical absorption of Co2+ doped NH4C1: phase transformation studies. Proceedings of the Indian Academy of Sciences. Section A, 1970, vol. 72, no. 6, pp. 249–260.

[6] Rambabu B., Ramasastry C., Chowdari B.V.R. Cobalt centres in ammonium chloride: optical absorption studies. Physica Status Solidi (B), 1983, vol. 118, no. 1, pp. 541–549.

УДК 53.043

Адсорбция метиленового синего на поверхности полимерной мембраны при разном изотопном составе водного раствора

Тимченко Светлана Леонидовна svtimchenko@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Бункин Николай Федорович nbunkin@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козлов Валерий Анатольевич vkozlov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гладышева Яна Владимировна yanagladysheva@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Болоцкова Полина Николаевна bolotskova@inbox.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Представлены результаты исследования динамики адсорбции и десорбции метиленового синего (МС) на поверхности полимерной мембраны Нафиона для растворов МС на основе природной воды (содержание дейтерия 157 ppm) и на основе воды, обедненной дейтерием (deuterium depleted water, DDW, содержание дейтерия 3 ppm). Исследования показали, что в растворах на основе природной воды скорость адсорбции и десорбции воды МС выше, чем в растворах МС на основе DDW. Установлено, что коэффициент поглощения видимого излучения высушенной на воздухе мембраны при равной концентрации исходных растворов МС имеет большее значение для раствора на основе природной воды, чем для раствора на основе DDW. Следовательно, концентрация адсорбента в мембране после адсорбции и последующей десорбции воды больше при вымачивании мембраны в растворах МС, приготовленных на природной воде. Десорбция воды при высушивании мембраны сопровождается изменением спектра поглощения МС на поверхности Нафиона, причем это изменение происходит раньше по времени в случае раствора МС на основе DDW. Таким образом, с помощью бесконечно малых изменений содержания дейтерия (от 3 до 157 ppm) в водном растворе, в котором происходит набухание полимерной мембраны, можно управлять динамикой процессов адсорбции и десорбции. Авторы полагают, что процессы адсорбции МС сопровождаются набуханием полимерной мембраны Нафиона в воде и полимерные волокна раскручиваются в объем окружающей жидкости, причем эффект разматывания волокон контролируется содержанием дейтерия.

Ключевые слова: *адсорбция, десорбция, диффузия, метиленовый синий, Нафион, спектрометрия, спектр поглощения, видимый диапазон*

В экспериментах по спектрометрии в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах была исследована скорость адсорбции и десорбции метиленового синего (Mc^+) на поверхности полимерной мембраны Нафион. Интерес к представленным ниже исследованиям обусловлен широким спектром использования метиленового синего в медицинских и промышленных целях, в частности при лечении коронавирусных ин-

фекций вида SARS-CoV-2 (COVID-19, SARS) [1–6]. С одной стороны, МС обладает достаточно сильной биохимической активностью, участвует в окислительно-восстановительных реакциях, принимая один или более электронов либо принимая или отдавая протон и в результате меняет свои формы. С другой стороны, известна катионная активность полимерной мембраны Нафион [7, 8]. По этой причине физически логичным является использование пары «Нафион — водный раствор МС», которая будет проявлять совместную электрохимическую активность [9]. Когда Нафион набухает в воде, полимерные волокна разматываются в основную массу окружающей жидкости. При эффекте разматывания волокна не отделяются от поверхности полимера, а образуют структуру, подобную гибкой мицеллообразной щетке вблизи ее поверхности. Также полимерная мембрана содержит сквозные каналы, внутренняя поверхность которых заряжена отрицательно.

Принимая во внимание разницу в масштабе, следует полагать, что поры в объеме полимерной мембраны подобны порам клеточной мембраны, в то время как размотанные полимерные волокна подобны гликокаликсу (внеклеточному матриксу). По этой причине изучение особенностей адсорбции метиленового синего на поверхности Нафиона является актуальным с точки зрения возможного медицинского применения при лечении вирусных болезней и при отравлении. Ранее мы также обнаружили, что разматывание полимерных волокон контролируется изотопным составом воды; например, когда содержание дейтерия составляет не более трех частей на миллион, эффект разматывания отсутствует. В данной работе показано, что скорость адсорбции метиленового синего определяется изотопным составом воды; в случае размотанных полимерных волокон скорость адсорбции метиленового синего примерно на 28 % меньше, чем при отсутствии эффекта размотки.

Для исследования процесса адсорбции использовали пластинки полимера «Нафион» N117 (Sigma Aldrich, USA) толщиной L_0 = 175 мкм и площадью 2,0×3,0 см. Растворы были приготовлены на дистиллированной воде (MQ) и на без дейтериевой воде (DDW). Концентрация раствора по порошку МС составила 0,0165 мг/мл. Исходные растворы МС на MQ и DDW представляли собой окисленную форму Mc^+ — раствор синего цвета. Вымачивание мембраны осуществляли в чашке Петри. В процессе вымачивания мембраны снимали спектр раствора МС, и таким образом определяли скорость адсорбции полимерной мембраной Нафион водного раствора Mc^+.

Измерение спектра поглощения растворов и мембраны производили на двулучевом спектрофотометре Cintra-4040 GBS в диапазоне длин волн 190...900 нм. В итоге было проведено исследование скорости адсорбции полимерной мембраной Нафион водного раствора метиленового синего. Процесс замачивания мембраны в указанных растворах Mc^+ осуществляли при поддержании температурного режима (25 °C) и герметизации раствора с мембраной. Объем раствора, в котором вымачивали Нафион, составил 12 мл. Динамику процесса адсорбции раствора Mc^+ изучали по спектрам поглощения раствора, в котором вымачивалась мембрана, полученными в разные моменты времени. Для этого формировали забор раствора МС, в котором находился Нафион, и заполняли кварцевую кювету. Объем раствора в кварцевой кювете, используемого для измерения его спектра, составлял 2 мл. Динамику процесса высушивания мембраны (десорбции) проводили посредством измерения спектра поглощения самой мембраны в различные моменты времени. В процессе вымачивания мембраны изменялся ее цвет, она приобретала цвет исходного раствора и становилась синей, а раствор становился светлым.

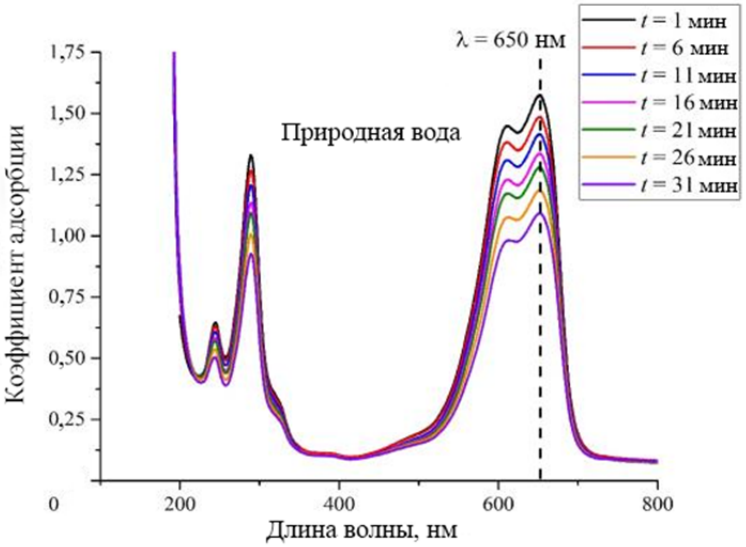


Рис. 1. Спектр поглощения раствора Mc+ на природной воде в процессе адсорбции. На вставке указано время t, в течение которого пластинка Нафиона вымачивалась в растворе МВ

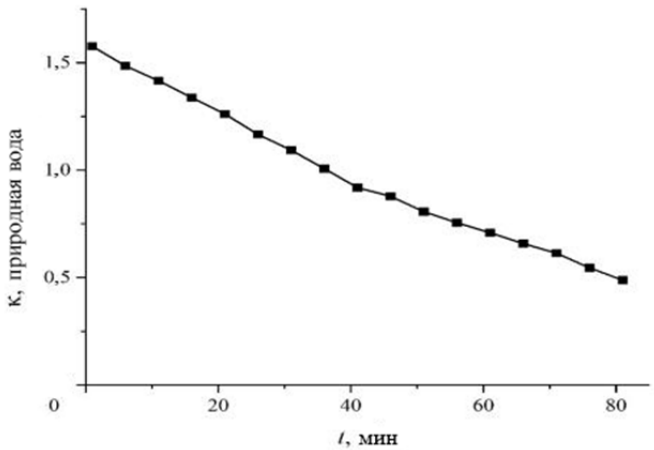


Рис. 2. Временная зависимость коэффициента поглощения раствора Mc+ на природной воде для длины волны 650 нм, полученная в процессе адсорбции мембраной раствора Mc

На рис. 1 показаны спектры поглощения раствора Mc^+, приготовленного на MQ (0,0165 mg/ml), снятые в процессе вымачивания Нафиона. Все характерные для водного раствора Mc^+ спектральные линии, соответствующие поглощению излучения, в процессе вымачивания мембраны уменьшались по интенсивности. Это связано с диффузией Mc^+ через поверхность мембраны. На рис. 2 показана временная зависимость коэффициента поглощения раствора Mc^+, приготовленного с использованием MQ на длине волны 650 нм. Данная зависимость отражает динамику процесса осветления раствора МС и позволяет определить скорость процесса адсорбции раствора

Mc^+ мембраной. Показатель экспоненты, который определяет скорость адсорбции мембраной Нафион водного раствора MC на MQ, составляет 58,49 мин, а постоянная скорости реакции соответственно 0,017 $мин^{-1}$.

Аналогичные измерения были проведены при адсорбции раствора Mc^+, приготовленного на без дейтериевой воде – DDW (3 ppm).

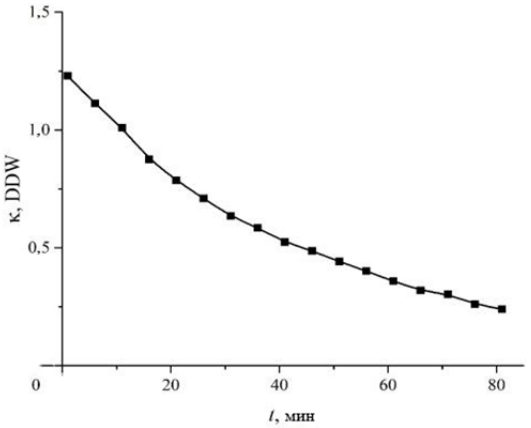


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения на длине волны 650 нм от времени вымачивания Нафиона в водном растворе MB (раствор на основе DDW)

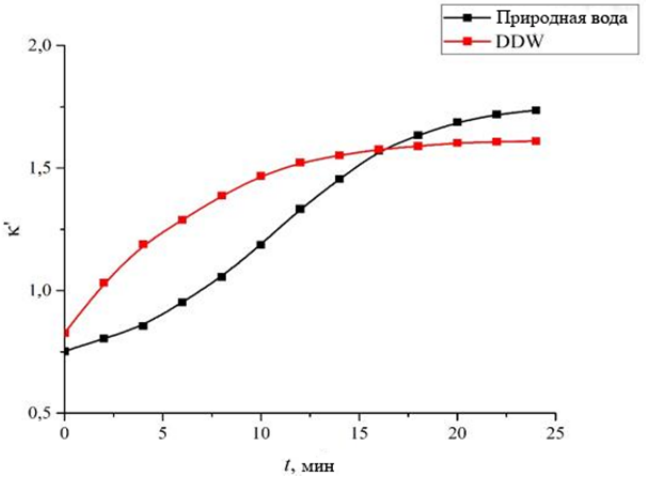


Рис. 4. Временная зависимость коэффициента поглощения мембраны при высушивании

На рис. 3 показана временная зависимость коэффициента поглощения раствора Mc^+, приготовленного с использованием DDW на длине волны 650 нм, полученная в процессе адсорбции мембраной раствора Mc^+.

Показатель экспоненты, который определяет скорость адсорбции мембраной Нафион водного раствора Mc^+ на DDW, составляет 42,3 мин, а постоянная скорости реакции соответственно 0,024 $мин^{-1}$. Получается, что постоянная скорости реакции адсорбции мембраной раствора Mc^+ данной концентрации в 1,39 раза больше для раствора, приготовленного на DDW.

На рис. 4 показаны кинетические кривые — временная зависимость коэффициента поглощения мембраны, полученные в процессе ее высушивания после вымачивания в растворах Mc^{+}, приготовленных на природной воде и на DDW.

Полученные результаты можно объяснить проявлением эффекта разматывания волокон полимерной мембраны. Из анализа графиков на рис. 1–3 можно сделать вывод, что эффект разматывания полимерных волокон замедляет адсорбцию МС на поверхность полимерной мембраны, а также замедляет скорость десорбции молекул воды (рис. 4) с поверхности мембраны. Поскольку мы получили различие в скорости адсорбции МС и десорбции воды в случае разматывания волокон и в отсутствии этого эффекта, а также исходя из того, что адсорбция и десорбция контролируются диффузией, можно в качестве нулевого приближения принять, что наблюдаемые эффекты обусловлены именно уменьшением коэффициента диффузии внутри слоя размотанных полимерных волокон.

Поскольку протяженность этого слоя достигает нескольких сотен микрометров, при рассмотрении диффузионных процессов внутри этого слоя можно не учитывать эффекты дебаевской экранировки; однако данная гипотеза нуждается в дополнительном анализе.

Литература

[1] Bojadzic D., Alcazar O., Buchwald P. Methylene Blue inhibits In vitro the SARS-CoV-2 spike–ACE2 protein-protein interaction – a mechanism that can contribute to its antiviral activity against COVID-19. Front Pharmacol, 2021, Jan 13, vol. 11, DOI: https://doi.org/10.3389/fphar.2020.600372

[2] Henry M., Summa M., Patrick L., Schwartz L. A cohort of cancer patients with no reported cases of SARS-CoV-2 infection: the possible preventive role of Methylene Blue. Subssntia, 2020, vol. 4, no. 1, suppl. 1 - Open Stream on Covid-19 Emergency. DOI: https://doi.org/10.13128/ Substantia-888

[3] Aoki K.J., Liu L., Marken F., Chen J.Y. Rectification effects of Nafion-backed micropor e-voltammograms by difference in migrational modes. Electrochim Acta, 2020, vol. 358, art. 136839. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136839

[4] Dumortier L., Mossa S. From ionic surfactants to Nafion through convolutional neural networks. J Phys Chem. B, 2020, vol. 124 (40), pp. 8918–8927. DOI: https://doi.org/10.1021/ acs.jpcb.0c06172

[5] Ayabe T., Chen A.C., Sagara T. Electrochemical and spectroelectrochemical probing of the ionic channel in. Nafion films using the redox of perfluoroalkyl viologen. J Electroanal Chem, 2020, vol. 873, art. 114442.

[6] Nishiyama H., Takamuku S., Iiyama A., Inukai J. Dynamic distribution of chemical states of water inside a Nafion membrane in a running fuel cell monitored by operando time-resolved cars spectroscopy. J Phys Chem. C, 2020, vol. 124 (36), pp. 19508–19513.
DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c06499

[7] Gebel G. Structural evolution of water swollen perfluorosulfonated ionomers from dry membrane to solution. Polymer, 2000, vol. 41 (15), pp. 5829–5838. DOI: https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00770-3

[8] Ninham B.W., Bolotskova P.N., Gudkov S.V., Juraev Y., Kiryanova M.S., Kozlov V.A., Safronenkov R.S., Shkirin A.V., Uspenskaya E.V., Bunkin N.F. Formation of water-free cavity in the process of Nafion swelling in a cell of limited volume; effect. of polymer fibers unwinding. Polymers, 2020, vol. 12, art. 2888. DOI: https://doi.org/10.3390/polym12122888

[9] Морозов А.Н., Фадеев Г.Н., Богатов Н.А. и др. Влияние низкочастотных колебаний на процесс восстановления метиленового синего. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2022, № 1 (100), с. 141-156. DOI: https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-1-141-156

УДК 539.12.01

Расчет достижимости предела Швингера в абсолютно черном теле на основе твердотельной микрополости с зеркальными стенками

Филатов Владимир Викторович vvfilatov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Крупская Александра Евгеньевна krupskayalexandra@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Предложена оригинальная методика генерирования электрон-позитронных пар за счет суперлинзирования монохроматического излучения в зеркальной резонансной твердотельной микрополости — сферической фотонной ловушке. Изложен принцип действия устройства и проведены необходимые расчеты. Показано, что на основе коммерчески доступных источников интенсивного монохроматического излучения возможно получение в лабораторных условиях электромагнитных полей, соответствующих пороговым значениям для наблюдения эффектов нелинейности вакуума. Полученные результаты открывают возможности создания оптического источника позитронов.

Ключевые слова: *предел Швингера, сверхсильные поля, нелинейность вакуума, электрон-позитронные пары, абсолютно черное тело, резонансная микрополость, суперлинзирование, фотонная ловушка*

Введение

В настоящее время принципиальной задачей физики высоких плотностей энергии является достижение предела Швингера — критической плотности энергии, при которой физический вакуум начинает проявлять нелинейные свойства. Впервые нелинейность вакуума была предсказана американским физиком Джулианом Швингером (1918-1994), удостоенным совместно с Ричардом Фейнманом и Синъитиро Томонагой в 1965 г. Нобелевской премии по физике «за фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц» [1].

Так, Швингером было установлено, что распространяющиеся в вакууме фотоны способны порождать виртуальные частицы, преодолевающие от места своего возникновения расстояние, равное их комптоновской длине волны [2]. При этом условие сохранения зарядовой четности [3] накладывает важное ограничение на возникающие частицы: рождаться они могут только в виде пары «частица — античастица». Последнее позволяет оценить величину критического электромагнитного поля, соответствующего швингеровскому пределу, следующим образом: работа поля на комптоновской длине волны электрона (самой легкой элементарной частицы) должна равняться удвоенной (электрон + позитрон) энергии покоя электрона

$$(q_0 E)\lambda_C = m_e c^2 + m_e c^2, \qquad (1)$$

где $q_0 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд; $\lambda_c = h/m_e c = 2{,}4 \cdot 10^{-12}$м — комптоновская длина волны электрона; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг — его масса; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме; $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$Дж·с — постоянная Планка [4].

Подстановкой численных значений получаем

$$E = \frac{2m_e^2c^3}{q_0h} \approx 10^{18}\frac{V}{m}, \qquad (2)$$

что до настоящего времени являлось недостижимой величиной. В настоящей статье представлена новая твердотельная методика на основе абсолютно черного тела, с помощью которой, как можно надеяться, удастся достичь необходимого значения (2), реализовав тем самым возможность рождения электрон-позитронных пар в лаборатории.

Теоретический анализ

Доступные на сегодняшний день технологии позволяют получать сверхсильные электромагнитные поля, приближающиеся к (2), путем фокусировки большого числа лазерных пучков высокой интенсивности. Рекорд принадлежит Национальному комплексу лазерных термоядерных реакций (США), использующем 192 интенсивных лазерных источника, генерирующих наносекундные мегаджоулевые импульсы. При этом сама установка размещается в десятиэтажном здании, занимающем площадь нескольких футбольных полей [5].

Заметим, что аналогичная многолучевая схема может быть компактно реализована в зеркальной твердотельной микрополости — «фотонной ловушке» [6], представляющей собой тонкостенную металлическую сферическую полость с малым входным отверстием (рисунок). Подобная микрополость хорошо известна как пример абсолютно черного тела [7] — объекта, поглощающего все поступающее в него электромагнитное излучение.

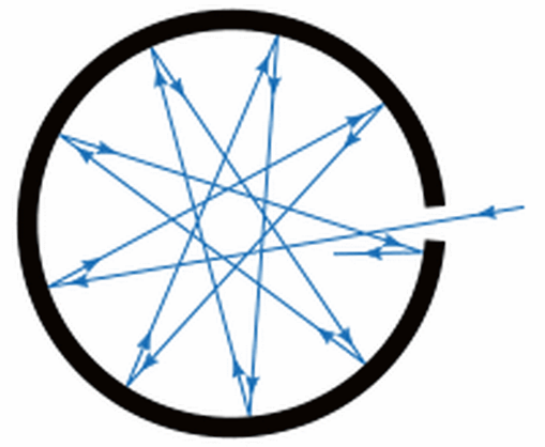


Рис. Сферическая фотонная ловушка — абсолютно черное тело на основе зеркальной тонкостенной твердотельной микрополости [8]

При этом, если диаметр сферической фотонной ловушки в полуцелое число раз превосходит длину волны лазерного излучения, поступающего в микрополость, в последней формируется стоячая электромагнитная волна, а сама микрополость выступает в качестве микрорезонатора, суперлинзирующего излучение в геометрическом центре сферы.

Как известно, основной задачей «суперлинз» считается преодоление дифракционного предела, не позволяющего рассмотреть детали изображения [9]. Этот классический физический эффект устанавливает максимальное разрешение на уровне, примерно соответствующем половине длины волны падающего света. «Суперлинзы» обходят ограничение за счет сбора так называемых исчезающих волн, которые несут подробную информацию об исследуемом объекте, но, в полном соответствии с названием, «исчезают» на небольшом расстоянии от него и традиционными линзами не обнаруживаются. Чаще всего «суперлинзы» выполняют из метаматериала, однако предлагаемая фотонная ловушка может быть выполнена из металла, плазменная частота которого превосходит частоту генерации используемого в эксперименте лазера. При этом интенсивность исходного лазерного излучения может быть сколь угодно высока, поскольку вследствие «резонансной» геометрии на стенки полости приходятся узлы стоячей волны, что позволяет избежать абляции материала. Подавление паразитного теплового излучения предлагается осуществлять внешним охлаждением стенок фотонной ловушки. Так, криостатирование жидким гелием (T = 4 К) в соответствии с законом Стефана — Больцмана позволит снизить тепловые потери до уровня

$$R = \sigma T^4 \approx 10^{-5}\frac{W}{m^2}, \tag{3}$$

где $\sigma = 5{,}7\cdot10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4) — постоянная Стефана — Больцмана [4].

В этом случае интегральные тепловые потери для микронной микрополости составят пренебрежимо малую величину в несколько десятков фемтоватт.

Покажем, что рассматриваемая система позволяет достичь швингеровской напряженности электромагнитного поля (2). В качестве примера возьмем коммерчески доступный [10] сверхяркий светодиод мощностью P_{LED} = 100 Вт, генерирующий непрерывное излучение на длине волны λ_{LED} = 385 нм. В этом случае оптимальный диаметр микрополости должен быть полунечетное (1/2, 3/2, 5/2 и т. д.) число раз кратен λ_{LED}. Тогда поступающее извне светодиодное излучение фокусируется в центре микрополости, что позволяет достичь порогового значения (2) за время

$$\tau = \frac{W}{P_{LED}} = \frac{\int wdV}{P_{LED}} = \frac{\int \varepsilon_0 E^2 dV}{P_{LED}} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \cdot \frac{4}{3}\pi r^3}{P_{LED}} \approx 10^5 s \approx 1day, \tag{4}$$

что является вполне приемлемым с точки зрения расхода жидкого гелия с учетом микронного размера криостатируемой области.

Заключение

На основании полученного результата (4) можно сделать вывод, что предложенная твердотельная методика достижения швингеровского предела вполне реализуема с помощью современных технологий. Отметим, что предлагаемая схема может быть использована в качестве оптического позитронного генератора для коллайдеров.

Литература

[1] The Nobel Prize in Physics 1965. The Nobel Prize. URL: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/summary/ (дата обращения 11.11.2022).

[2] Комптоновская длина волны. Ядерная физика в интернете. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e078.htm (дата обращения 10.10.2022).

[3] Зарядовое сопряжение. Ядерная физика в интернете. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e056.htm (дата обращения 10.10.2022).

[4] Fundamental Physical Constants — Complete Listing (2018 CODATA adjustment). URL: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt (дата обращения 11.11.2022).

[5] Hogan W.J., Moses E.I., Warner B.E., Sorem M.S., Soures J.M. The National Ignition Facility. Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, no. 5, pp. 567–573. DOI: https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/5/309

[6] Фотонная ловушка для термояда. Портал журнала «Наука и жизнь». URL: https://www.nkj.ru/news/ 28275/ (дата обращения 10.10.2022).

[7] Ельяшевич М.А. Абсолютно черное тело. Физическая энциклопедия. URL: http://femto.com.ua/articles/part_1/0012.html (дата обращения 11.11.2022).

[8] An approximate realization of a black body: light entering the hole is unlikely to come back out. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body_realization.svg (дата обращения 11.11.2022).

[9] Задача об идеальной линзе. Портал журнала «Наука и жизнь». URL: https://www.nkj.ru/news/19875/ (дата обращения 10.10.2022).

УДК 539.1.07

Резонансная фотонная ловушка для контроля изотопного состава тяжелой воды

Филатов Владимир Викторович vvfilatov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Волкова Вероника Валерьевна veronika.volkova2003@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Тяжелая (тяжеловодородная) вода – прозрачная жидкость, химически идентичная «обычной» (легкой) воде H_2 O, молекулы которой содержат один (дейтериевая) или два (тритиевая вода) избыточных нейтрона, локализованных в ядрах водорода. Использование тяжелой воды в ядерных реакторах позволяет существенно улучшить их нейтронный баланс, обеспечив возможность функционирования на необогащенном топливе. В этом случае «лишние» нейтроны, генерируемые делящимся материалом и не поглощенные водородом, могут быть направлены на получение различной изотопной продукции, при этом саму тяжелую воду можно использовать в качестве изотопного индикатора. В настоящей работе предложен новый оптический прибор, в котором используется принцип резонансного усиления локального электромагнитного поля, – резонансную фотонную ловушку проточного типа – для экспресс-анализа и оперативной коррекции изотопного состава тяжеловодородной воды.

Ключевые слова: *тяжелая вода, изотопный состав, гиперкомбинационное рассеяние, фотонная ловушка*

Тяжелая (тяжеловодородная) вода — прозрачная жидкость, химически идентичная «обычной» (легкой) воде H_2O, молекулы которой содержат один (дейтериевая) или два (тритиевая вода) избыточных нейтрона, локализованных в ядрах водорода. Использование тяжелой воды в ядерных реакторах позволяет существенно улучшить их нейтронный баланс, обеспечив возможность функционирования на необогащенном топливе. В этом случае «лишние» нейтроны, генерируемые делящимся материалом и не поглощенные водородом, могут быть направлены на получение различной изотопной продукции, при этом саму тяжелую воду можно использовать в качестве изотопного индикатора.

Ввиду изложенного задача контроля (мониторинга и/или поддержания) изотопного состава тяжелой воды представляет большую практическую важность. В настоящей работе мы предлагаем новый оптический прибор, использующий принцип резонансного усиления локального электромагнитного поля, — резонансную фотонную ловушку проточного типа — для экспресс-анализа и оперативной коррекции изотопного состава тяжеловодородной воды.

Как следует из химических данных, вода является сильнополярным растворителем, поэтому ковалентная связь O-H в молекуле H_2O электрически-полярна, то есть, чувствительна ко внешним электромагнитным полям. Рассматривая собственные колебания диполя O-H в присутствии внешнего оптического поля как движение полярного физического маятника под действием кулоновской вынуждающей силы, заклю-

чаем, что существенное различие в массах протия ^{1}H (1 а.е.м), дейтерия ^{2}D (2 а.е.м.) и трития ^{3}T (3 а.е.м.) позволяет отчетливо различить эти изотопы по положению пика в спектрах вторичного излучения тяжеловодородной пробы. Особенно удобным в этом отношении является метод спектроскопии вынужденного комбинационного рассеяния света, поскольку позволяет непосредственно установить количественное содержание различных изотопов водорода в пробе (интенсивность комбинационных спутников непосредственно определяется числом соответствующих осцилляторов).

На рис. 1 представлены результаты спектрального анализа проб очищенной тяжелой (100 % D_2O) и легкой (100 % H_2O) воды. Как видно из спектров, протиевая вода дает комбинационный пик на частоте около 3300 см$^{-1}$, дейтериевая вода проявляет себя в более низкочастотной области — 2400 см$^{-1}$. Обратим внимание на присутствие в спектре пробы тяжеловодородной воды слабого протиевого, а также едва заметного тритиевого пика (на частоте около 1200 см$^{-1}$), что свидетельствует о наличии в пробе D_2O незначительных количеств как H_2O, так и T_2O. Данное обстоятельство позволяет использовать комбинационные спектры тяжелой воды в качестве изотопного индикатора для реактора на тяжелой воде под давлением (Pressurised Heavy Water Reactor, PHWR).

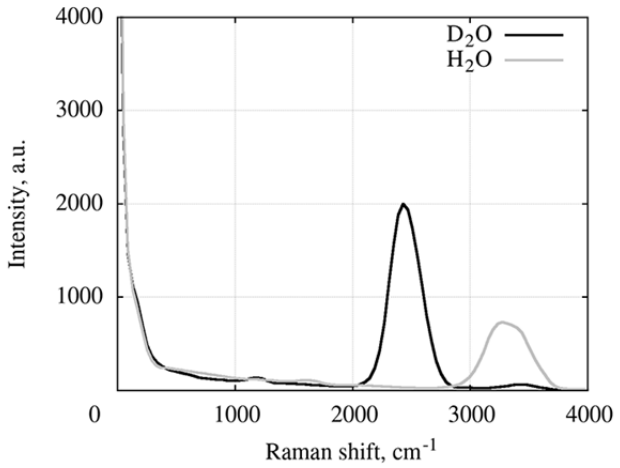


Рис. 1. Спектры вынужденного комбинационного рассеяния света в пробах протиевой и дейтериевой воды (обработка фильтром Безье)

Мониторинг PHWR требует высокоточного определения процентного изотопного состава циркулирующей тяжелой воды, поэтому для усиления сигнала комбинационного рассеяния мы предлагаем использовать резонансную фотонную ловушку проточного типа — оптический прибор, работающий по принципу резонатора Фабри — Перо. Для усиления разрешающей способности ловушки в ее стенках предлагается размещать оптически-активные подложки на основе фотонного кристалла. В этом случае локальное электромагнитное поле ловушки усиливается поверхностным плазмонным резонансом подложек, что приводит к формированию оптических таммов-

ских состояний, гиперусиливающих комбинационный сигнал, что позволяет «разглядеть» спектр в мельчайших подробностях. При этом работа ловушки в активном режиме на частоте резонанса O-H, O-D или O-T позволяет разрушать связи и отщеплять катионы протия (H^+), дейтерия (D^+) или трития (T^+) для дальнейшего выделения на внешнем катоде, что открывает возможности регулирования изотопного состава тяжеловодородной воды оптическим способом.

Литература

[1] Киршенбаум И. Тяжелая вода. Физические свойства и методы анализа. Москва, Изд-во иностр. лит., 1953, 437 с.

[2] Шатенштейн А.И. и др. Изотопный анализ воды. Москва, Изд-во АН СССР, 1957, 236 с.

[3] Казавчинский Я.З. и др. Тяжелая вода. Теплофизические свойства. Москва, Госэнергоиздат, 1963, 255 с.

[4] Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. Москва, Энергоатомиздат, 1987, 456 с.

[5] Горелик В.С. и др. Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние света в протиевой и дейтериевой воде. Оптика и спектроскопия, 2019, т. 126, № 6, с. 765–770. DOI: https://doi.org/10.21883/OS.2019.06.47771.51-19

УДК 535.224

Одноосцилляторная модель распространения оптического поля в метаматериале с одномерной пространственно-периодической сверхструктурой

Филатов Владимир Викторович vvfilatov@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Корец Дарья Анатольевна dashakorets2003@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Дащинский Александр Андреевич sasha.dashchinskiy@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены одномерные фотонные кристаллы, сверхструктура которых представлена правильной одномерной сверхрешеткой, сформированной однотипными узлами. Установлен одноосцилляторный закон дисперсии волнового поля в одномерном фотонном кристалле. Сделан вывод, что полученный результат качественно согласуется с наблюдаемыми в эксперименте особенностями спектров вторичного излучения одномерных фотонных кристаллов.

Ключевые слова: *фотонный кристалл, дисперсия, нелинейная оптика, диэлектрическая функция, фотонные композиты*

Одномерные фотонные кристаллы — оптические метаматериалы, сверхструктура которых представлена правильной одномерной сверхрешеткой, сформированной однотипными узлами [1–4]. В настоящей статье устанавливается одноосцилляторный закон дисперсии волнового поля в одномерном фотонном кристалле.

Для получения искомого дисперсионного соотношения представим сверхрешетку одномерного фотоннокристаллического образца одномерной цепочкой N одинаковых узлов массы m, связанных упругими силами. В этом случае внешняя сила f_j, действуя на -й узел, смещает последний из положения равновесия $x_j = ja$ (a — период сверхструктуры) на некоторую величину ξ_j, вызывая упругую реакцию со стороны соседей:

$$\frac{d^2\xi_j}{dt^2} = \chi\left(\xi_{j+1} - \xi_j\right) - \chi\left(\xi_j - \xi_{j-1}\right) + f_j, \qquad (1)$$

где χ — коэффициент упругости связи соседних узлов сверхрешетки.

Для получения амплитудно-частотной характеристики колебаний (1) разложим внешнюю силу f_j по Фурье-гармоникам и рассмотрим одну из них:

$$f_j = f exp[i(kx - \omega t)].$$

Для данной гармоники формула (1) записывается явным образом как

$$\frac{d^2\xi_j}{\mathrm{dt}^2} = \frac{\chi}{m}\left(\xi_{j+1} - 2\xi_j + \xi_{j-1}\right) + \frac{f}{m}\exp[\mathrm{i}(\mathrm{kx} - \omega\mathrm{t})], \qquad (2)$$

что позволяет искать решение дифференциального уравнения колебаний в гармоническом виде

$$\xi_j = Aexp\left[i\left(kx_j - \omega t\right)\right], \tag{3}$$

где амплитуда колебаний A неизвестна, однако может быть легко найдена непосредственной подстановкой (3) в дифференциальное уравнение (2):

$$-\omega^2 A = \frac{\chi}{m}\left(Ae^{ika} - 2A + Ae^{-ika}\right) + \frac{f}{m},$$

что дает

$$A = \frac{\frac{\mathrm{f}}{\mathrm{m}}}{\left(\frac{\chi}{\mathrm{m}}\right)\times(2-2\mathrm{coska})-\omega^2}. \tag{4}$$

Выражение (4) есть амплитудно-частотная характеристика колебаний узлов сверхрешетки фотонного кристалла.

Для сокращения записи введем обозначение:

$$\omega_0(k) \equiv \left[\frac{\chi}{m}(2-2\mathrm{coska})\right]^{\frac{1}{2}} = \left(2\sqrt{\frac{\chi}{\mathrm{m}}}\right)\times \sin\left(\frac{\mathrm{ka}}{2}\right), \tag{5}$$

позволяющее получить кинематику ((3) с учетом (4)) узлов сверхрешетки фотонного кристалла во внешнем поле:

$$\xi_j = \frac{\frac{f}{m}}{\omega_0^2(k)-\omega^2} exp\left[i\left(kx_j - \omega t\right)\right] = \frac{\frac{f_j}{m}}{\omega_0^2(k)-\omega^2}. \tag{6}$$

Как видно из полученного результата, в итоговый ответ не входят какие-либо частные характеристики конкретной Фурье-гармоники f, поэтому выражение (6) справедливо для всех Фурье-гармоник, действующих на узел j, т. е. и для всего произвольного поля внешних сил f_j.

Определив кинематику сверхрешетки, перейдем к ее энергетике. Для этого найдем кинетическую энергию одиночного (j-го) узла:

$$W_{kj} = \frac{1}{2}m\left(\frac{d\xi_j}{dt}\right)^2,$$

а также его потенциальную энергию:

$$W_{pj} = \frac{1}{2}\left\{\frac{\chi\left(\xi_{j+1}-\xi_j\right)^2}{2} + \frac{\chi\left(\xi_j-\xi_{j-1}\right)^2}{2}\right\} \simeq \frac{1}{2}\cdot 2\cdot\frac{\chi\left(\xi_{j+1}-\xi_j\right)^2}{2} =$$

$$= \frac{\chi}{2}\xi_j^2\left|e^{ika}-1\right|^2 = \frac{\chi}{2}\xi_j^2\cdot 4sin^2\left(\frac{ka}{2}\right) = \frac{\chi}{2}\xi_j^2\cdot\frac{m\omega_0^2}{\chi} = \frac{m\omega_0^2\xi_j^2}{2}.$$

Таким образом, полная механическая энергия одиночного узла есть

$$W_j = W_{kj} + W_{pj} = \frac{m\left(a\frac{\xi_j}{dt}\right)^2}{2} + \frac{m\omega_0^2\xi_j^2}{2},$$

поэтому полная механическая энергия колебаний всего кристалла суть

$$W = \sum_j W_j = \sum_{\mathrm{j}} \left\{ \frac{\mathrm{m}\left(\mathrm{d}\frac{\xi_{\mathrm{j}}}{\mathrm{dt}}\right)^2}{2} + \frac{\mathrm{m}\omega_0^2\xi_{\mathrm{j}}^2}{2} \right\}. \quad (7)$$

Результат (7) имеет важное значение: с энергетической точки зрения одномерный фотонный кристалл представляет собой набор однотипных (с одинаковой собственной частотой ω_0) независимых осцилляторов. Таким образом, особенности распространения оптических полей в метаматериалах с одномерной пространственно-периодической сверхструктурой могут быть выявлены в рамках осцилляторной модели (эйнштейновская модель твердого тела).

Используем этот факт для получения уравнения дисперсии оптического поля в фотонном кристалле. С этой целью вычислим величину поляризации P:

$$P = \frac{1}{V}\sum_j q\xi_j \equiv (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E,$$

где q — эффективный заряд узла сверхрешетки; $E = f_j/q$ — напряженность электрической компоненты оптического поля; V— объем кристалла.

Следовательно, диэлектрическая проницаемость ε метаматериала равна

$$\varepsilon = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0}\cdot\frac{q}{V}\sum_j \frac{\frac{q}{m}}{\omega_0^2(k)-\omega^2} = 1 + \frac{N}{V}\cdot\frac{q^2}{m\varepsilon_0}\left(\frac{1}{\omega_0^2(k)-\omega^2}\right) \equiv 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2(k)-\omega^2},$$

где смысл введенной постоянной ω_p ясен из формулы.

Таким образом, диэлектрическая функция одномерной фотоннокристаллической среды, вообще говоря, обладает как частотной, так и пространственной дисперсией $\varepsilon = \varepsilon(\omega, k)$. Вблизи центра зоны Бриллюэна $(k = 0)$ в силу (5) имеем плазмоподобный закон дисперсии

$$\varepsilon(k = 0) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2},$$

приводящий к «плазмоноподобной» запрещенной фотонной зоне в области малых волновых чисел $(k \approx 0)$. На краю зоны Бриллюэна $(k = \pi/a)$вследствие (5) получаем

$$\varepsilon\left(k = \frac{\pi}{a}\right) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2-\omega^2}$$

классический поляритонный одноосцилляторный закон дисперсии электромагнитного поля в материальной среде, в котором также присутствуют запрещенные «поляритонные» фотонные зоны в области аномальной дисперсии.

Подводя итог, констатируем, что закон дисперсии оптического поля в одномерном фотонном кристалле имеет нелинейный вид

$$\frac{c^2k^2}{\omega^2} = \varepsilon(\omega, k)\mu = \left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2(k)-\omega^2}\right]\mu, \quad (8)$$

соответствующий колебаниям нелинейного осциллятора с диспергирующей собственной частотой (5), и позволяет описать наблюдающиеся в экспериментах особен-

ности оптических спектров образцов одномерных фотонных кристаллов. Формула (8) также может быть использована при моделировании дву- и трехмерных фотонных композитов: для этого в (5) достаточно произвести очевидную замену $k \to \vec{k}, a \to \vec{a}$

Литература

[1] Pichkurenko S.V. Dispersion of light in the 1D photonic crystal. Proceedings of the 5th International Conference on Manufacturing, Material and Metallurgical Engineering (ICMMME 2020). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd., 2020, vol. 859, iss. 1, art. no. 012003. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/859/1/012003

[2] Filatov V.V., Gorelik V.S., Pichkurenko S.V. Iodine plasmonic crystal as the visible-range spectral filter. Proceedings of the 5th International Conference on Manufacturing, Material and Metallurgical Engineering (ICMMME 2020). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing Ltd., 2020, vol. 859, iss. 1, art. no. 012001. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/859/1/012001

[3] Gorelik V.S., Pichkurenko S.V., Filatov V.V. Optical characteristics of the aluminium mesoporous photonic crystal. Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1348, iss. 1, art. no. 012059. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1348/1/012059

[4] Filatov V.V., Gorelik V.S., Pichkurenko S.V. Stimulated axion-like bipolariton generation in the globular photonic crystal. Materials Science Forum, 2021, vol. 1047 MSF, pp. 134–139. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1047.134

УДК 535.37

Влияния тяжелых гетероатомов на процессы переноса энергии в координационных соединениях иона Eu(III)

Цориева Алисия Валерьевна tsorieva-av@1502.moscow
МГУ имени М.В. Ломоносова

Коршунов Владислав Михайлович vladkorshunov@bk.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Тайдаков Илья Викторович taidakov@mail.ru
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Цель данной работы — изучение влияния гетероатома в 1,3-дикетонном лиганде на вероятность интеркомбинационной конверсии в органических лигандах в составе координационных соединений с ионом Eu3+. Установлено, что добавление гетероатомов брома и хлора ведет к увеличению квантовых выходов на 8 и 10 % соответственно по сравнению с квантовым выходом аналогичного соединения без тяжелого гетероатома. При этом время жизни значительно возрастает. Показано, что понижение квантового выхода соединения, содержащего йод, связано с уменьшением энергии первого возбужденного триплетного состояния лиганда с 20 500 см-1 до 19 800 см-1.

Ключевые слова: *европий, координационные соединения, β-дикетоны, люминесценция, гетероатом, интеркомбинационная конверсия*

Существует ряд практических задач, связанных с разработкой новых органических светоизлучающих диодов, биовизуализацией в лабораторных исследованиях и в медицине, а также с приложением люминесцентной сенсорики [1].

Одним из классов соединений, которые могут быть применены для решения всех поставленных задач, являются координационные соединения трехвалентного иона европия с молекулами органического лиганда. Люминесценция иона обусловлена излучательными электронными переходами внутри электронной 4*f*-оболочки этого иона [2]. Лигандное окружение поглощает энергию падающего света и передает энергию электронного возбуждения на центральный ион через триплетное состояние лиганда. Таким образом, регулируя скорость переходов внутри лигандного окружения, можно добиться повышения эффективности люминесценции. В рамках данной работы исследована зависимость между скоростью интеркомбинационной конверсии в органических лигандах в составе координационных соединений с ионом Eu^{3+} и квантовым выходом люминесценции исследуемых соединений. Интеркомбинационная конверсия представляет собой безызлучательный переход между двумя энергетическими уровнями с разной мультиплетностью [3]. Он запрещен по спину, однако в результате спин-орбитального перекрывания запрет частично снимается. Одним из способов увеличения степени спин-орбитального перекрывания (а следовательно, повышения вероятности интеркомбинационной конверсии) служит введение тяжелых атомов с большим зарядовым числом в молекулу органического лиганда [4].

Целью работы являетсяизучение влияния гетероатома в 1,3-дикетонном лиганде на вероятность интеркомбинационной конверсии в органических лигандах в составе координационных соединений с ионом Eu^{3+}. Для достижения поставленной цели были

исследованы новые комплексы иона Eu^{3+} с лигандным окружением из класса β-дикетонатов. В качестве заместителя в лигандах были выбраны фенильные фрагменты, в которых два водорода замещены на два тяжелых атома йода (I), брома (Br), хлора (Cl) либо фтора (F). Для исключения влияния молекул воды, которые выступают в роли тушителя люминесценции, в комплексы был введен дополнительный лиганд 1,10-фенантролин.

На рисунке представлены кинетики люминесценций исследуемых соединений на длине волны 612 нм при резонансном возбуждении.

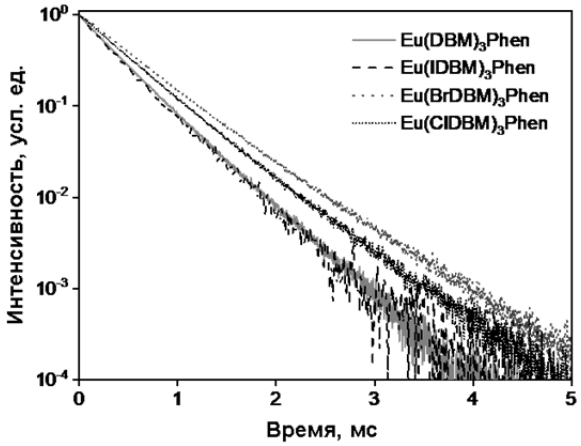


Рис. Кинетики люминесценции соединений на длине волны 612 нм

Времена жизни возбужденных состояний τ_{obs} исследуемых соединений, а также квантовые выходы *Q* представлены в таблице.

Времена жизни и квантовые выходы исследуемых соединений

Соединение	τ_{obs}, мкс	*Q*, %
$Eu(DBM)_3Phen$	392	49,5
$Eu(IDBM)_3Phen$	371	42,4
$Eu(BrDBM)_3Phen$	523	57,8
$Eu(ClDBM)_3Phen$	472	60,2

Установлено, что добавление гетероатомов брома и хлора ведет к увеличению квантовых выходов на 8 и 10 % соответственно по сравнению с квантовым выходом $Eu(DBM)_3Phen$. При этом время жизни увеличивается с 392 до 523 мкс. Понижение квантового выхода соединения, содержащего йод, связано с уменьшением энергии первого возбужденного триплетного состояния лиганда с 20 500 до 19 800 $см^{-1}$.

Информация о гранте

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, грант № 19-13-00272.

Литература

[1] Weissman S. I. Intramolecular energy transfer the fluorescence of complexes of Europium. J Chem Phys, 1942, vol. 10 (4), pp. 214–218. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1723709

[2] B¨unzli J.-C.G., Piguet C. Taking advantage of luminescent lanthanide ions. Chemical Society Reviews, 2005, vol. 34 (12), art. 1048. DOI: https://doi.org/10.1039/b406082m

[3] Varaksina E.A., Vitukhnovsky A.G., Datskevich N.P., Taidakov I.V., Ambrozevich S.A. Experimental determination of energy transfer in Eu(III) complexes based on Pyrazole-substituted 1, 3-diketones. Journal of Russian Laser Research, 2015, vol. 36 (6), pp. 602–607. DOI: https://doi.org/10.1007/s10946-015-9538-4

[4] Marian Ch.M. Spin-orbit coupling and intersystem crossing in molecules. WIREs Computational Molecular Science, 2012, vol. 2, pp. 187–203. DOI: https://doi.org/10.1002/wcms.83

УДК 537.632

Особенности магнитооптических спектров экваториального эффекта Керра гранулированного сплава на основе CoPt

Яшин Максим Михайлович ihkamax@mail.ru
РТУ МИРЭА, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Юрасов Алексей Николаевич alexey_yurasov@mail.ru
РТУ МИРЭА

Телегин Андрей Владимирович yashin@mirea.ru
ИФМ УрО РАН

Лобов Иван Дмитриевич stepanov1234567g@gmail.com
ИФМ УрО РАН

Самардак Александр Сергеевич spartasan00@yandex.ru
ДВФУ

Сайфулина Диана Алексеевна marina.simdyanova3103@mail.ru
РТУ МИРЭА

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования магнитооптических свойств гранулированного магнитного сплава на основе CoPt. В рамках метода эффективной среды симметризованного приближения Максвелла-Гарнетта с учетом размерного эффекта были рассчитаны спектральные зависимости экваториального эффекта Керра при заданном угле падения электромагнитного излучения. В процессе моделирования достигнуто хорошее согласие экспериментальных и теоретических данных, а также установлен средний размер гранул, форма частиц и параметр аномального эффекта Холла. Полученные результаты представляют как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения.

Ключевые слова: *экваториальный эффект Керра, методы эффективной среды, размерный эффект, гранулированный сплав, магнитооптика*

В настоящее время весьма актуальны исследования магнитооптических свойств наноструктур перспективных для спинтроники [1–3]. Одним из примеров подобных структур является амфорный сплав на основе $Co_{50}Pt_{50}$. Подобные структуры имеют широкую область применений и перспектив в современной электронике в целом, в них возможно наблюдать такие эффекты, как: магнитосопротивление, аномальный эффект Холла, магнитооптический эффект Керра и др. [4–6].

В данной работе решается актуальная задача: моделирование спектральных зависимостей магнитооптического эффекта Керра в рамках перспективного метода эффективной среды – симметризованного приближения Максвелла — Гарнетта и сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

В результате эксперимента, были получены спектральные зависимости экваториального эффекта Керра тонкой пленки на основе $Co_{50}Pt_{50}$ (рис. 1). При этом измеря-

лось относительное изменение интенсивности отраженного от образца p — поляризованного электромагнитного излучения при различных углах падения излучения:

$$\rho_\omega(\lambda) = \frac{I(H)-I(0)}{I(0)}, \quad (1)$$

где $I(H)$ — интенсивность отраженного излучения при наличии магнитного поля; $I(0)$ — интенсивность отраженного излучения при отсутствии магнитного поля.

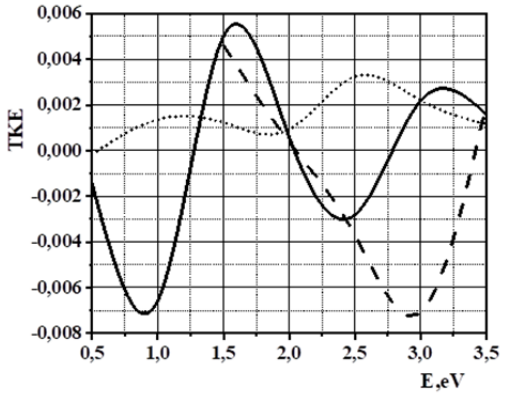


Рис. 1. Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра гранулированного сплава на основе Co50Pt50 при различных углах падения излучения:
500 — точки; 700 — сплошная линия; 720 — штриховая линия

Для описания подобных магнитооптических спектров используют вероятностную модель для нахождения эффективного тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) — симметризованное приближение Максвелла — Гарнетта (СМГ) [7].

Также для более точной оценки спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра необходимо учитывать квазиклассический размерный эффект. При этом предполагается, что исследуемая структуру состоит из одинаковых по размерам r_0 гранул. Таким образом, с учетом размерного эффекта диагональные компоненты ТДП ε_{mod} рассчитываются следующим образом:

$$\varepsilon_{mod} = \varepsilon_0 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i/\tau_{bulk})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i/\tau_{part})} \quad (2)$$

где τ_{part}— время свободного пробега электронов в грануле кобальта; τ_{bulk}— временя свободного пробега электронов в массивном образце.

С учетом закона Друде — Лоренца недиагональные $\varepsilon_{xy} = -i\gamma$ компоненты ТДП γ_{mod} определяются из следующих выражений:

$$\gamma_{mod} = \gamma_0 + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{bulk}/\tau_{bulk}^2}{\omega\left(\omega+i/\tau_{bulk}\right)^2} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{gr}/\tau_{part}^2}{\omega\left(\omega+i/\tau_{part}\right)^2} \quad (3)$$

$$R_{gr} = R_{bulk} + 0.2R_s\frac{l}{r_0}\left(1+\frac{l}{r_0}\right) \quad (4)$$

где ω — частота света; ω_p — плазменная частота; R_{gr} — коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ); ρ_{bulk} — удельное сопротивление массивного образца;

ρ_{gr} — удельное сопротивление гранулы; R_s — значение коэффициента АЭХ материала поверхности гранул; σ — проводимость.

При этом $\varepsilon_{mod} = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ и $\gamma_{mod} = \gamma_1 - \gamma_2$, а величина ЭЭК на p-компоненте определяется выражением [8]:

$$\rho_\omega = (A\gamma_1 + B\gamma_2)\frac{2sin2\phi}{A^2+B^2} \quad (5)$$

где $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1\cos^2\phi - 1)$, $B = \cos^2\phi\ (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$, ϕ — угол падения света.

Таким образом, с использованием формул (2)–(5), были рассчитаны спектральные зависимости экваториального эффекта Керра гранулированного сплава на основе $Co_{50}Pt_{50}$ при заданном угле падения излучения 70°. Полученные зависимости в сравнении с экспериментом представлены на рис. 2.

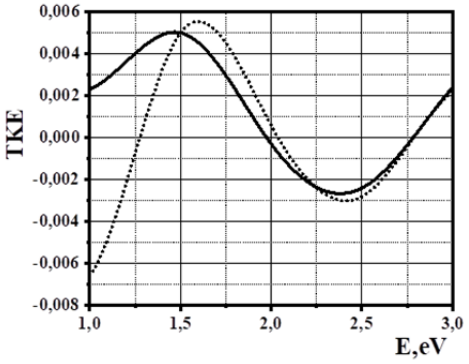


Рис. 2. Рассчитанные спектральные зависимости экваториального эффекта Керра с учетом размерного эффекта (сплошная линия в сравнении с экспериментальными данными (точки) при φ = 70°)

Также в процессе моделирования благодаря перспективному методу исследования СМГ было установлено, что средний размерам гранул составляет 2 нм, частицы сплава имеют сферическую форму, а параметр аномального эффекта Холла . Также исходя из рисунка 2 стоит отметить, наблюдается хорошее согласие экспериментальных и теоретических данных экваториального эффекта Керра, а расхождение в амплитудных значениях обусловлено явлением интерференции от кремниевой подложки (что согласуется с условие Вульфа — Брэгга). Для наглядной демонстрации влияния оптических эффектов было проведено моделирование спектров ЭЭК для данного образца при различных углах падения излучения: 69° и 71°. Полученные модельные спектры в сравнении с экспериментом представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, для более точного описания данного гранулированного сплава необходимо учитывать влияние интерференционных эффектов. Отметим, проведенный в данной работе анализ позволяет прогнозировать оптические и магнитооптические свойства различных перспективных магнитных наноразмерных структур, что важно для выбора материалов с заданными свойствами.

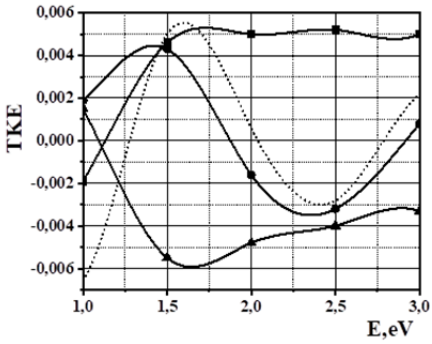


Рис. 3. Рассчитанные спектральные зависимости экваториального эффекта Керра с учетом размерного эффекта (сплошная линия) в сравнении с экспериментальными данными (точки) при φ = 70°: при φ = 69° — квадратики; при φ = 70° — кружочки; при φ = 71° — треугольники)

Таким образом, полученные результаты представляют как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения [9–10].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-20160) проекта Минобразования РФ № 0657-2020-0013.

Литература

[1] Ганьшина Е.А., Вашук М.В., Виноградов А.Н., Грановский А.Б., Гущин В.С., Щербак П.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Ким Ч.О., Ким Ч.Г. Эволюция оптических и магнитооптических свойств в нанокомпозитах аморфный металл-диэлектрик. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2004, т. 125, № 5, с. 1172–1183.

[2] Kumar S.K., Benicewicz B.C., Vaia R.A., Winey K.I. 50th Anniversary Perspective: Are Polymer Nanocomposites Practical for Applications. Macromolecules, 2017, vol. 50, no. 3, pp. 714–731.

[3] Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., et al. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites CoFeZr−Al2O3. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences, 2019, no. 5, pp. 63–72.

[4] Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical Properties and Solar Selectivity of Coevaporated Co-Al2O3 Composite Films. Journal of Applied Physics, 1984, vol. 55, pp. 3382–3410. DOI: https://doi.org/10.1063/1.333386

[5] Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syrev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites multilayers. Solid State Phenomena, 2011, vol. 168–169, pp. 533–536.

[6] Кревчик В.Д. Квантовый размерный эффект и квантовое туннелирование с диссипацией как основа представлений современной наноэлектроники. Часть I. Классические и квантовые размерные эффекты. Инжиниринг и технологии, 2016, т. 1, № 1. DOI: https://doi.org/10.21685/2587-7704-2016-1-1-1

[7] Юрасов А.Н., Яшин М.М. Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур. Российский технологический журнал. 2020, т. 8, № 5, с. 68–77.

[8] Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В., Семенова Д.В., Ганьшина Е.А., Каназакова Е.С. Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокомпозитов. Российский технологический журнал, 2021, т. 9, № 3, с. 49–57.

[9] Davydov S.Yu., Kryukov A.Yu., Izvolskii I.M., Rakov E.G. Preparation of carbon nanomaterials through CH4 pyrolysis on (Co + Mo)/MgO catalysts with different metal contents. Inorganic Materials, 2013, vol .49, pp. 252–256.

[10] Троянчук И.О., Бушинский М.В., Хомченко В.А., Сиколенко В.В., Риттер К., Шорр С. Причины возникновения ферромагнитного состояния и колоссального магнитосопротивления в кобальтитах. Физика металлов и металловедение, 2019, т. 120, № 4, с. 352–359.

СЕКЦИЯ 5

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН

Руководитель секции —
канд. физ.-мат. наук,
доцент

Еркович Ольга Станиславовна

УДК 378

Коллективное взаимообучение студентов основам естествознания в дистанционном формате

Бабаева Марина Алексеевна maalba@list.ru
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Предложено и опробовано методическое решение проблемы дистанционного совместного обучения студентов естествознанию в цифровом пространстве университета. Описаны основные элементы организации педагогического эксперимента. Проведен анализ результатов изучения студентами-первокурсниками материалов онлайн курса «Концепции современного естествознания» по модифицированной технологии коллективного взаимного обучения

Ключевые слова: *естествознание, цифровые технологии, дистанционное обучение, метод коллективного взаимообучения*

Введение

Дистанционный формат обучения в последнее время стал невероятно популярен. Во-первых, в связи с непрерывным обновлением цифровых инструментов и сервисов, стимулирующих быстрое развитие цифровой среды образовательных учреждений, во-вторых, в связи с вынужденными специфическими условиями обучения в недавнюю пандемию.

Такой стремительный переход к дистанту скорее можно назвать технологическим, но не методологическим переходом. В современном цифровом образовательном пространстве остро ощущается дефицит именно методических разработок. Об их отсутствии свидетельствует, например, распространенная организация дистанционного обучения в пандемию. Это был фактический перенос элементов традиционной лекционно-семинарской системы в дистанционный формат: «говорящие головы» по расписанию, система оценивания и пр. Вместе с тем понятно, что для того, чтобы не утратить качество образования, использование богатейших цифровых возможностей должно обязательно реализовываться через новые педагогические методические решения.

В настоящей работе предложено и опробовано одно из таких актуальных методических решений. Это решение позволяет использовать инструментарий, сервисы цифровой среды для повышения качества обучения.

Методология, методы и методики

Основа методического решения — идеи коллективного взаимного обучения (КВО). Этот метод первым предложил и реализовал российский педагог А.Г. Ривин (1878–1944) почти сто лет назад — в 20-х гг. XX в. [1–3].

А.Г. Ривин ввел в учебный процесс целенаправленное общение в парах учащихся и упорядоченную сменяемость этих пар (т.н. «организованное переменное диалогическое общение»). По мысли Ривина, интенсивное применение такого диалогического

общения «решительно содействует кристаллизации в любом коллективе максимального количества талантов и гениев» [2, с. 403]. Именно поэтому автор называл свой метод «талгенизмом» — от слов «талант» и «гений». Метод коллективного взаимного обучения (КВО) делает, например, возможным: совместное обучение людей разного уровня подготовки, индивидуальный темп учебы каждого ученика, выбор каждым своей последовательности изучаемых тем и предметов.

Модифицированный нами метод КВО применялся в дистанционном обучении основам естествознания студентов-первокурсников Санкт-Петербургского политехнического университета. Со всеми многочисленными материалами дисциплины студенты могли знакомиться в любое выбранное ими время на онлайн курсе, размещенном на Российской национальной платформе открытого образования. Проводилась статистическая обработка и сравнительный анализ результатов обучения студентов экспериментальных и контрольных групп.

Результаты, обсуждение

Метод коллективного взаимного обучения был модифицирован и опробован в обучении студентов-первокурсников Санкт-Петербургского политехнического университета. Для педагогического эксперимента были отобраны студенты-гуманитарии первого курса, изучающие материалы непрофильной для них дисциплины «Концепции современного естествознания». Изначальная мотивация большинства студентов была достаточно низкой и требовала корректировки.

Основными элементами организации педагогического эксперимента по обучению студентов с использованием идей талгенизма стали следующие:

- онлайн-курс с подробными разноформатными материалами дисциплины;
- вебинарные комнаты на платформе MS Teams с возможностью организовывать и записывать виртуальные встречи, проводить обмен материалами.

Методически и содержательно обеспеченный онлайн курс — это МООК (массовый открытый онлайн курс) «Концепции современного естествознания», представленный от Политеха на Российской национальной платформе открытого образования [4]. Разнообразные материалы дисциплины, разбитые на 15 тем-модулей, доступны всем слушателям онлайн курса. Они включают видео-лекции, конспекты, материалы для самостоятельной работы, тестовые задания.

Кроме онлайн курса, в условиях пандемии открылись и новые, дополнительные «цифровые» возможности в организации обучения студентов. В числе прочего, было обеспечено создание специальных вебинарных комнат на платформе MS Teams. Именно там каждый студент в рамках эксперимента по договоренности мог провести виртуальную встречу с партнером-студентом, обменяться материалами, записать и сохранить видео совместного занятия.

Каждому студенту в процессе изучения очередной темы курса обязательно пришлось побывать не только в роли студента, ученика, но и в роли преподавателя, учителя, тренера, оставив цифровой след своей работы и в вебинарной комнате, и на онлайн курсе. Такое ролевое общение происходило в парах, состав которых регулярно изменялся — в соответствии с выбором студентами очередных партнеров-собеседников.

Преподаватель дисциплины организует, координирует и контролирует парную работу студентов. Обязательно отсматривает видео парных встреч студентов, дает комментарии к увиденному, а также реализует право зачесть студентам работу в паре,

или предложить еще раз проработать тему. Цифровой инструментарий позволяет это сделать оперативно.

Как оценить результативность нового метода в обучении студентов? Нами была проведена элементарная статистическая обработка итоговых результатов освоения курса естествознания студентами-первокурсниками Политеха. Сравнительный анализ учебной работы и итогов обучения студентов, занимавшихся по методике КВО и контрольных групп, показал безусловную эффективность применения новой методики.

Заключение

Исследование показало, что качество обучения не только не снижается, а наоборот, — его можно заметно повысить, если дополнить самостоятельную работу студентов на курсе занятиями по описанной методике. Методика, апробированная в настоящем исследовании, позволяет обучаемым не просто хорошо освоить подготовленную для них информацию, но и создать нечто новое, проявив и усилив собственные творческие навыки. Организация работы по методике КВО превращает студентов из наблюдателей в полноценных участников учебного процесса. Совместная работа над учебным материалом, возможность каждому побывать в роли ученика и учителя, наставника, позволяет каждому студенту не только качественно усвоить учебную информацию, но и развить в себе лучшие личностные качества, делясь идеями и опытом со сверстниками. Все это отмечают в своих отзывах сами студенты. Предложенное методическое решение, анализ результатов его применения позволяют говорить о заметном повышении качества обучения в описанном новаторском режиме.

Литература

[1] Ривин А. Содиалог как орудие ликбеза. Революция и культура, 1930, № 15-16, с. 64–66.

[2] Век талгенизма: начало. Дидактический метод и жизнь А.Г. Ривина в документальных свидетельствах. Архивы, пресса и литература 1914-2021 гг. Антология. Голубев Е.Б., сост.; Галактионова Т.Г., ред. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГУ, 2021, 736 с.

[3] Бабаева М.А., Голубев Е.Б. «Талгенизм» в эпоху цифровизации: отечественная история cMOOC. Высшее образование в России, 2020, т. 29, № 8-9, с. 71-84. DOI: https://doi.org/l0.31992/0869-3617-2020-29-8-9-71-84

[4] Бабаева М.А. Концепции современного естествознания. 2-е изд., доп. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 436 с.

УДК 378

«Вуз без профессоров» успешно работал по программам Московского высшего технического училища

Бабаева Марина Алексеевна maalba@list.ru
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Голубев Евгений Борисович egolubev@list.ru
Санкт-Петербургский государственный университет

Собран и проанализирован массив исторических документов. Установлено, что в Москве в 1928 г. был создан и успешно работал по программам механического факультета МВТУ «вуз без профессоров» («дикий» вуз). Приведены подробности деятельности нового вуза. Рассмотрены применявшаяся технология обучения и лежащий в ее основе метод коллективного взаимного обучения А.Г. Ривина. Показана ценность метода в наши дни.

Ключевые слова: *педагог А.Г. Ривин, высшее образование, «дикий» вуз, метод коллективного взаимного обучения*

Введение

В образовательном пространстве традиционный жесткий треугольник обучения «учитель — ученик — учебный контент» оставался незыблемым в течение сотен лет. От эпохи к эпохе педагоги-новаторы в основном работали с вершинами треугольника, уточняли наполняемость и интенсивность связей между ними. В редких случаях добавляли новые вершины к старым, заменяя треугольник многоугольником. А можно ли разрушить треугольную схему, не добавляя, а наоборот, убрав одну из вершин? Могут ли, например, студенты успешно учиться сами, без преподавателей? Каковы должны быть особенности учебных материалов при такой форме? И какой метод может скрепить две оставшиеся вершины?

В настоящей работе авторы приводят обсуждение обнаруженной ими одной из исторических реализаций такой учебной схемы «ученик — учебный контент», а также ее особенности и продуктивность.

Методология, методы и методики

Авторами настоящей работы был проведен масштабный поиск ответов на поставленные вопросы в исторических документах — газетах, журналах и брошюрах, региональных и ведомственных изданиях, хранящихся в государственных и частных архивах. Обнаружены и проанализированы материалы, свидетельствующие о том, что схема обучения «ученик — учебный контент» не только является вполне работоспособной, но и послужила когда-то основой успешного педагогического эксперимента в масштабах вуза. Эти тексты собраны в антологии «Век талгенизма: начало» [1], где объединены с другими материалами, описывающими метод коллективного взаимного обучения А.Г. Ривина. Все цитируемые здесь статьи включены в антологию.

Результаты, обсуждение

В процессе исследования выяснилось, что практический ответ на вопрос «возможен ли вуз без профессоров?» был дан в России более 90 лет назад. В «диком» вузе (как его тогда называли) в 1928-1930 гг. в Москве сотни студентов овладели профессией инженера — самостоятельно, без преподавателей. Уровень их подготовки соответствовал уровню студентов механического факультета МВТУ. Как это произошло?

В 1928 г. в Москве группа молодых энтузиастов 18–19 лет — ученики педагога А.Г. Ривина — организовали Объединение групп по высшему техническому образованию [1, с. 221-320; 2]. Набирая первых студентов, они расклеивали объявления «Жизни нужны не дипломы, а знания», проводили собеседования. В ОГВТО принимали без экзаменов. Наплыв абитуриентов был огромен. «Из 300 желающих, — говорит нам тов. Вихман, организатор этих групп, — мы приняли около 100 человек» [1, с. 222].

Основой учебных материалов в новом вузе стали программы механического факультета Московского высшего технического училища (МВТУ). Организаторы занятий в ОГВТО сами пока не успели получить высшее образование. Они решили: «Будем учиться без профессоров, преподавателей, без денег, стипендий, учебного штата. Мы сами — штат, учащиеся, профессора, преподаватели, деньги...» [1, с. 228; 2].В этом «вузе без профессоров» необходимый порядок в занятиях достигался исключительно методом организации занятия и системой построения учебного материала [1, с. 237].

Как же были организованы занятия сотни студентов — без преподавателей? Что за чудо-метод они нашли для изучения всех учебных дисциплин технического вуза? Секрет оказался в применяемом ими методе коллективного взаимного обучения А.Г. Ривина, который ввел в учебный процесс целенаправленное общение в парах учащихся и упорядоченную сменяемость этих пар. Подчеркивая сверхвысокую результативность метода в воспитании учеников, педагог назвал его «талгенизмом» — от слов «талант» и «гений».

Один из организаторов ОГВТО так объяснял новую технологию обучения: «Занятия по этому методу проходят следующим образом: коллектив в 30–40 человек разбивается на пары и в каждой паре происходит беседа на ту или иную тему изучаемой дисциплины. Людские составы беседующих пар не постоянны, а меняются после каждых 7–10 минут» [1, с. 267]. Принципов всего два, но оба важных, и оба прежде, до Ривина, не использовались с такой целью: «Парные сочетания учащихся и смена партнеров пар — вот основные принципы метода преподавания Ривина» [1, с. 267].

Один из учеников А.Г. Ривина писал: «В основе этого метода лежит идея: изученный материал наилучшим образом усваивается, закрепляется и запоминается, когда обучающийся, ознакомившись с изучаемым материалом (положением, правилом, теоремой, формулой, задачей), рассказывает о нем и разъясняет его своему парному собеседнику, пока тот не убедится, что он досконально разобрался в вопросе и чувствует готовность внятно сообщить и втолковать его другому собеседнику, следующему партнеру» [1, с. 237].

Именно метод А.Г. Ривина позволил в ОГВТО сократить число преподавателей до нуля. Конечно, были сложности из-за того, что никогда прежде метод коллективного взаимообучения не применялся для массового обучения инженеров. Организаторы обучения специально готовили учебный материал (карточки, по которым шло обучение) со специальными пропусками, разрывами в изложении, чтобы каждый учащийся по-своему толковал их. А в беседе, в споре каждый должен был искать аргументы в защиту своей точки зрения — в результате студенты не просто заучивали то или иное положение, но и сами выводили, доказывали их. Такие знания усваивались надолго.

Успехам энтузиастов многие радовались. Но высказывались и сомнения, что затея несерьезна, что у таких учащихся не может быть твердых знаний, что все это авантюризм. Были созданы государственные комиссии для проверки знаний студентов ОГВТО. «Проверке подверглись учащиеся ОГВТО первого набора — 150 человек. Этот своеобразный экзамен шел с пристрастием, искали неуспевающих… Был составлен протокол, в котором констатировалось, что знания учащихся ОГВТО не уступают знаниям студентов МВТУ» [1, с. 239]. «Комиссия признала, что метод работы, применяемый в объединении, может дать образование за три курса технического вуза» [1, с. 226].

Вуз стал известным. Один из организаторов вспоминает: «Благополучно закончился первый учебный год. Осенью 1929 г. в наше ОГВТО записалось 1500 человек. Пошли запросы из других городов Союза» [1, с. 239]. География расширялась: «Из ряда промышленных центров (Ленинград. Свердловск, Лысьва, Иваново) к нам обращались и выясняли возможность организации подобных занятий у них на местах» [1, с. 252]. Отметим, что ОГВТО через два года превратили в государственную Высшую инженерную школу и этот вуз, преобразованный десяток раз, дожил до наших дней, разумеется, уже с профессорами.

Заключение

Опыт «дикого» вуза, безусловно, ценен и сегодня, поскольку позволяет по-новому взглянуть на процесс обучения студентов в вузе, заметить точки возможного роста качества обучения. В процессе исследования выяснилось, что традиционно устойчивую триаду обучения «ученик – учитель – учебный материал» можно успешно изменить, совместив две вершины треугольника. Традиционно роль, отведенная обучающемуся, пассивна: он выступает как реципиент, который просто должен «впитать» учебный материал. В «вузе без преподавателей» ОГВТО одну часть этой триады исключили, а функции учителя доверили ученикам, создав «коллективного преподавателя». И таким образом сделали каждого студента активным действующим лицом. Метод Ривина помог создать новую технологию взаимного обучения, когда все учили каждого и каждый учил всех. И такая активная позиция студентов в соответствии с новой формулой «ученик (учитель) — учебный материал» позволяет им не просто глубоко усваивать новые, готовые знания, но и формировать, добывать их собственными усилиями. Безусловно, на метод талгенизма, обеспечивший успех организации «вуза без профессоров» 90 лет назад, стоит обратить внимание и современным университетам, стремящимся повысить планку качества образования своих выпускников [3, 4].

Литература

[1] Век талгенизма: начало. Дидактический метод и жизнь А.Г. Ривина в документальных свидетельствах. Архивы, пресса и литература 1914-2021 гг. Антология. Голубев Е.Б., сост.; Галактионова Т.Г., ред. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГУ, 2021, 736 с.

[2] Чаган З. «Дикий» вуз. Революция и культура, 1929, № 11, с. 47-54.

[3] Бабаева М.А., Голубев Е.Б. «Талгенизм» в эпоху цифровизации: отечественная история cMOOC. Высшее образование в России, 2020, т. 29, № 8-9, с. 71-84. DOI: https://doi.org/l0.31992/0869-3617-2020-29-8-9-71-84

[4] Лебединцев В.Б. Концептуальные представления о системе коллективного обучения по индивидуальным образовательным программам. Педагогические технологии, 2021, № 1, с. 11-19.

УДК 530.12:378

Специальная теория относительности и ее представление в современном высшем техническом образовании

Бадаев Юрий Леонидович 9057551299@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Парадоксальным феноменом состояния современных программ и методик изучения теории относительности в высших технических учебных заведениях и во многих изданиях технической литературы является ошибочное представление существования различных масс одного и того же тела — массы покоя и релятивистской массы и представления об увеличении массы с ростом скорости тела. Такое представление вредно для понимания сути дисциплины, поскольку вносит путаницу в сознание студента. В теоретической, ядерной физике и астрофизике понятия релятивистской массы нет. Масса введена как величина, инвариантная при переходе из одной системы координат в другую.

Ключевые слова: *масса, современное представление, теория относительности, импульс, высшее образование*

Специальная теория относительности являет собой один из важнейших разделов физики, ставшим особенно актуальным в наше время, когда научно-технический прогресс достиг таких вершин, при которых стало необходимо учитывать релятивистские эффекты не только в фундаментальных исследованиях но и в прикладных и инженерных науках. Так, американская система GPS, в первоначальных расчетах которой не были учтены релятивистские поправки, давала на практике огромные погрешности позиционирования, которые не позволяли использовать ее по прямому назначению. Только после корректировки расчетов, которая учитывала релятивистские и гравитационные эффекты система позиционирования заработала с нужной точностью. Учет подобных эффектов необходим и в системах наведения современного оружия.

Однако парадоксальным феноменом состояния современных программ и методик изучения теории относительности в высших технических учебных заведениях и во многих изданиях технической литературы является ошибочное представление существования различных масс одного и того же тела — массы покоя и релятивистской массы и представления об увеличении массы с ростом скорости тела.

Сам А. Эйнштейн как автор специальной теории относительности был противником введения понятия релятивистской массы и рассматривал массу как инвариантную величину [1–4]. Подобное рассмотрение применяется и в теоретической физике. Однако в учебной литературе и научно-популярных изданиях практически повсеместно используется понятие массы покоя и массы релятивистской.

$$m_p = m_0/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}, \quad (1)$$

где m_0 — масса покоя.

Такое представление вредно для понимания сути дисциплины, поскольку вносит путаницу в сознание студента. В теоретической физике, ядерной физике, астрофизике понятия релятивистской массы нет. Масса введена как величина инвариантная при переходе из одной системы координат в другую. Основные уравнения СТО гласят:

$$m^2 = (\varepsilon^2 - p^2c^2)/c^4; \quad (2)$$

$$p = v\varepsilon/c^2. \quad (3)$$

При смене системы отсчета изменятся энергия и импульс тела а масса останется неизменной:

$$m^2 = (\varepsilon^2 - p^2c^2)/c^4. \quad (4)$$

Но между уравнением (2) и уравнением (4) стоит знак равенства, поскольку все физические законы не должны зависеть от выбора системы координат. Отсюда можно сделать вывод о инвариантности массы.

При $V = 0$ и $P = 0$ уравнение (2) примет вид $E_0 = mc^2$, где E_0 — энергия покоя.

Классическая механика интерпретирует массу как меру инертности тела. Теория относительности связывает энергию тела и его массу. Мерой инертности в СТО становится уже не масса а энергия тела. Эксперименты на ускорителях полностью подтверждают правоту теории относительности.

С точки зрения математического аппарата понятие релятивистской массы дает правильные расчеты нужных величин, но с точи зрения физического смысла приводит к абсурду.

Приведем некоторые примеры учебников и учебных пособий, оперирующих понятиями релятивистской массы и массы покоя:

1. Санкт-Петербургский государственный университет. Е.И. Бутиков. Релятивистские представления в курсе обшей физики.

Глава 2. Релятивистская динамика

2.1. Импульс частицы в релятивистской механике

«…В классической физике масса m частицы – постоянная величина, не зависящая от состояния ее движения. Импульс определяется, как произведение массы частицы на ее скорость P = mv…»

2.1.1. Принцип соответствия и релятивистский импульс «…В релятивистской механике импульс частицы также определяется ее скоростью… Релятивистское выражение для импульса должно иметь вид P = mvv, где величина mv может зависеть только от абсолютной величины скорости частицы…»

2.2. Релятивистская энергия

2.2.2. Масса покоя и энергия покоя «…Отсюда можно сделать фундаментальное заключение о том, что полная энергия тела пропорциональна его массе независимо от того из каких видов она состоит…»

2.2.3. Пропорциональность массы и энергии «…Поэтому можно говорить об эквивалентности массы и энергии. Всякое изменение энергии системы сопровождается эквивалентным изменением ее массы… Экспериментальное подтверждение релятивистского закона пропорциональности энергии и массы следует искать в ядерной физике и физике элементарных частиц…» [5].

2. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Основная литература, учебное пособие. С.И. Кузнецов, Г.Н. Дудкин, В.Н. Забаев Ускорители заряженных частиц.

«…Циклотрон-циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц. Циклотрон позволяет ускорять протоны до энергии примерно 20 МэВ. Дальнейшее их ускорение в циклотроне ограничивается релятивистским возрастанием массы со скоростью, что приводит к увеличению периода обращения (он пропорционален массе) и синхронизм нарушается…»

«…Синхрофазотрон. Это наиболее современный циклический ускоритель протонов, позволяющий получить энергии в несколько ГэВ. В фазотронах, микротронах, синхротронах и синхрофазотронах частицы ускоряются до релятивистских скоростей. Масса частицы зависит от скорости».

«…Большой адронный коллайдер. Протонный синхротрон-протоны разгоняются до 99,6 % скорости света. В результате такого воздействия увеличивается масса протонов, если говорить кратко, то протоны не могут ускоряться, а становятся тяжелее. На этой стадии энергия каждой частицы равняется 25 млрд. электронвольт, при этом протоны становятся в 25 раз тяжелее, чем в состоянии покоя. …Затем пучки протонов перемещаются в большой адронный коллайдер… масса протона становится в 7000 раз больше нормальной…» [6].

В вышеперечисленных примерах процесс ускорения частиц объясняется с использованием понятия массы покоя и релятивистской массы. Однако на самом деле увеличивается не масса а энергия частиц, изменяется импульс, как величина зависящая от энергии. Поэтому изменяется и период обращения частиц, что в свою очередь ведет к необходимости корректировки синхронизации ускоряющего поля.

Термин «релятивистская масса», являющийся по сути некой абстракцией, введенной для облегчения понимания сути СТО чисто в педагогических целях, на самом деле наносит непоправимый вред истинному пониманию предмета. Да, гораздо проще ввести ничем не обоснованное, однако более удобоваримое в умах студентов утверждение об увеличении массы с ростом скорости и на этом построить дальнейшие объяснения теории относительности, чем проводить математические выкладки, требующие отказаться от попыток созерцательного представления сути явления и так часто использующихся в классической физике, где наглядное представление играет огромную роль в понимании процесса.

В теоретической физике есть понятие эффективной массы, которая являет собой нечто похожее на релятивистскую массу, но понятие это чисто математическое, вводится для удобства, и в самом названии термин «эффективная» отражает ее «виртуальность», аналогично термину «приведенная масса», используемого в механике. В обоих этих случаях у учащихся нет сомнений, что реальных тел с такими массами не существует. Эти массы ничто иное как некая математическая модель, которая облегчает понимание и сокращает записи. И вполне можно обойтись и без них, используя в расчетах реальные массы тел. И в отношении данных понятий у студента формируется правильное их понимание. Понятие же релятивистской массы по своей сути провозглашает ее как совершенно реальную массу тела, существующую в данный момент в природе, а не как «виртуальную», введенную для сокращения записей и облегчения понимания. При этом релятивистская масса представляется как лоренц-вектор, а не как лоренц-скаляр. И в этом кроется искажение ее сущности. Но согласно формуле (4) масса представляет собой лоренц-скаляр. Тут-то и получается физическое противоречие.

Таким образом при изучении СТО складывается парадоксальная ситуация. С одной стороны налицо искажение сути понятия массы, а с другой стороны полученные уравнения позволяют делать верные математические расчеты при решении релятивистских задач. Изучение и анализ изложенных проблем и оценок позволит избежать

очередного провала качества высшего образования в стране. [7]. Все это ведет к необходимости в XXI веке, веке научных достижений и высоких технологий, начинать правильно освещать этот раздел фундаментальных знаний.

Литература

[1] Эйнштейн А. Физика и реальность Москва, Наука, 1965.

[2] Окунь Л.Б. Понятие массы (масса, энергия, относительность). Москва, ЦНИИатоминформ, 1989, 42 с.

[3] Strassler M. Theoretical physicist. The Harvard University.Mass and Energy. Available at: https://profmattstrassler.com/ (accessed October 14, 2022)/

[4] Эйнштейн А. Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии? Annalen der Physik, 1905, vol. 18, p. 639.

[5] Бутиков Е.И. Релятивистские представления в курсе общей физики. Санкт-Петербург, ; Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2007, 95 с.

[6] Кузнецов С.И., Дудкин Г.Н., Забаев В.Н. Ускорители заряженных частиц. Курс физики с примерами решения задач. Томск, ТПУ, 2011, 45 с. URL: https://e.lanbook.com/book/10273 (дата обращения 19.09.2022).

[7] Бадаев Ю. Л. Преимущества и недостатки дистанционной формы обучения и ее влияние на качество образования естественнонаучного направления. Проблемы современного образования, 2021, № 2, с. 187–191.

УДК 378.14

Роль учетной недели в лабораторном практикуме по физике

Веретимус Диана Константиновна dkvrgu@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Веретимус Надежда Константиновна nkvmhts@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Успешное освоение курса общей физики обеспечивает возможность осознанного изучения студентами технических вузов специальных дисциплин. Цикл лабораторных работ, выполняемых студентами, сопровождает каждый раздел курса. В работе показана целесообразность включения в маршрут лабораторных работ по физике двух учетных недель, в середине и в конце семестра для повышения доли защищенных лабораторных работ и сданных рубежных контролей. Сравнением с опытом предыдущих лет установлено: это способствует повышению успеваемости по предмету и эффективности восприятия студентами курса физики, что является залогом грамотности инженера.

Ключевые слова: *учетная неделя, лабораторная работа, рубежный контроль, студенты, знания, занятия*

Курс общей физики МГТУ им. Баумана, кроме лекций и семинаров [1, 2], включает прохождение студентами лабораторного практикума и выполнение лабораторных работ по всем разделам курса общей физики. Каждую выполненную лабораторную работу необходимо защитить. На 9–10-й и на 15–16-й учебных неделях в часы лабораторных занятий проводится рубежный контроль.

Мы говорим о необходимости учетных недель, в середине и в финале лабораторного цикла. Особенно это актуально для лабораторных работ первого курса. Необходимость обосновывается тем, что лабораторные работы курса «Механика» проходят на первом курсе и длятся 1,5 астрономических (2 академических) часа. Их длительность не позволяет на одном лабораторном занятии выполнить лабораторную работу, обработать результаты эксперимента и защитить ее, поэтому студентам необходимо выделять отдельное время для защиты выполненных лабораторных работ, причем это время должно быть освобождено от выполнения следующей лабораторной работы [3, 4].

В истории организации учебного процесса на кафедре физики МГТУ им. Н.Э. Баумана так и было очень длительное время, с прошлого века и до включения нашей страны в Болонский процесс, после чего одну из учетных недель просто вычеркнули. И если на втором курсе, при длительности лабораторных работ, равной 3 астрономическим (4 академическим) часам, это еще как-то возможно компенсировать более интенсивной работой в течение занятия, то с учетом того, что группы на первом курсе больше, чем на втором, времени меньше, исключение первой учетной недели фактически заложило ухудшение академической успеваемости за счет того, что студенты объективно не могут, не успевают защитить хотя бы одну лабораторную работу, последнюю перед рубежным контролем к модулям 1 и 2.

Студент должен именно на занятии защищать лабораторные работы, а у преподавателя тоже должна быть возможность (достаточное время) защиту принять, с учетом того, что необходимо еще и выполнить лабораторную работу.

В период, когда в маршруте лабораторных работ присутствовали обе учетные недели, было, когда учетную неделю ставили на 7–8-й неделе, а рубежный контроль — на 9–10-й неделях. Были года, когда их меняли местами, и здесь с успевающими студентами была возможность углубленно проработать материал, побеседовать по материалу уже пройденному, по материалу, который они еще будут проходить. Такая необходимость существует, поскольку материал лабораторных работ не всегда строго следует за лекциями. Если рубежный контроль стоит перед учетной неделей, то на ней кроме защиты выполненных лабораторных работ была реальная возможность для конкретной группы, в случае неуспеваемости, проработав материал рубежного контроля, пересдать рубежный контроль на «своем» учетном занятии. В это время преподаватель имел возможность неспешно побеседовать со студентами, провести некоторые выкладки и выводы физических зависимостей, провести защиты, посмотреть, насколько материал предмета освоен студентом, работать с акцентом на понимании студентом материала, а не на запоминании формул и определений.

Наличие учетных недель повышает реальную успеваемость студентов.

Литература

[1] Фокин Ю.Г. Психодидактика высшей школы. Психолого-дидактические основы преподавания. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 423 с.

[2] Фокин Ю.Г. Технология обучения в высшей школе. От теории к технологическим процедурам. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 326 с.

[3] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. О мотивации аудитории и целесообразности изучения физики в техническом вузе. Успехи современной науки и образования. Педагогические науки, 2016, № 7, с. 102–104.

[4] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. Некоторые особенности организации семинарских и практических занятий по физике в современных условиях. Успехи современной науки и образования. Педагогические науки, 2016, № 8, с. 45–47.

УДК 378.14

О влиянии контролируемой самостоятельной работы студента на его успеваемость

Веретимус Надежда Константиновна nkvmhts@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Веретимус Диана Константиновна dkvrgu@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

В современных условиях роль высококвалифицированных инженерных кадров в нашей стране существенно повышается. Для подготовки специалистов, отвечающих требованиям времени, необходимо обеспечить высокий уровень их фундаментальной, базовой подготовки. В статье рассмотрены вопросы, связанные с целесообразностью использования и сохранения в учебном процессе технического вуза контролируемой самостоятельной работы по физике, которая позволяет повысить интенсивность процесса обучения и качество знаний студентов.

Ключевые слова: *студенты, знания, занятия, контролируемая самостоятельная работа*

Процесс обучения в вузе должен быть построен таким образом, чтобы обучить и воспитать специалиста, основным профессиональным качеством которого является компетентность [1, 2]; для этого необходимо организовать и обеспечить эффективное взаимодействие преподавателя и студента. В этой связи особенную актуальность приобретает самостоятельная работа студента под контролем преподавателя.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана около десятилетия назад в расписании занятий появился такой вид работы со студентом, как контролируемая самостоятельная работа (КСР) студента. Однако спустя несколько лет, в 2016 г., данный вид занятий был выведен из расписания [3].

Встает вопрос: нужен ли такой вид занятий, почему он появился в учебной нагрузке как студентов, так и преподавателей?

Известно, что студенты, при поступлении в ВУЗ, имеют существенно различный уровень знаний по школьным предметам. Для МГТУ им. Н.Э. Баумана базовыми являются такие предметы, как физика, математика и химия [4].

Входное тестирование, регулярно проводимое на кафедре «Физика» показывает, что студенты имеют, в среднем, очень слабую школьную подготовку. Остаточные знания, как правило, соответствуют 2,5–3,5 баллам по пятибалльной шкале. Результаты передаются лектору тестируемого потока.

При анализе «стартового» уровня усвоения предмета в группах, возникает вопрос о том, какой вид занятий позволяет адресно повысить знания отстающих студентов. На лекционных занятиях такой возможности практически нет, так как план лекций сформирован так, что лектор находится в жестком регламенте при чтении каждого лекционного раздела. На каждом из практических занятий преподавателю за два академических часа, необходимо показать решение не менее четырех задач на заданную тему для лучшего закрепления теоретического материала. Лабораторные занятия проводятся для того, чтобы студент мог экспериментально проверить и подтвердить тео-

ретические зависимости, полученные на лекциях. Только во время защиты лабораторных работ и домашних заданий преподаватель имеет возможность индивидуальной работы со студентом, однако наиболее продуктивна работа со студентами на КСР. Именно на КСР возможно выявить пробелы в базовой подготовке каждого студента группы и предпринять реальные шаги для ликвидации этих пробелов.

При проведении КСР целесообразно на каждом занятии проводить контрольные-летучки по конкретному пройденному на лекции и на практическом занятии разделу физики с целью определения пробелов в базовых знаниях по предмету, с дальнейшей их ликвидацией или индивидуальной, или групповой работой над данной темой занятия. Также в процессе объяснений материала в рамках данного занятия необходимо показывать, что теоретическая часть курса — грамотное, логически и математически обоснованное изложение материала, пройденного ранее в курсе средней школы в упрощенном варианте и, подчас, без математических выкладок.

При необходимости на КСР можно более подробно рассмотреть наиболее сложные моменты лекционных тем, вывести ряд зависимостей. Причем делать это может не только ведущий преподаватель, но, что более ценно, и студент, направляемый и контролируемый преподавателем.

При наличии КСР в учебном расписании, предмет становится понятнее студентам. На экзамене средний студент демонстрирует уровень знания и понимания изучаемой дисциплины значительно выше, чем студенческие группы, у которых были только лекционные, практические и лабораторные занятия. Кроме того, проведение КСР позволяет студентам иметь достаточно хорошие остаточные знания, которые помогают в освоении специальных дисциплин.

В данный момент существует проблема ухудшения успеваемости студентов. Понятно, что на статистику студенческой успеваемости влияют много факторов, например, в каком формате происходило обучение: в очном или дистанционном. При этом отсутствие такого формата обучения, как КСР, несомненно, приводит к ослаблению знаний студентов.

Таким образом, для повышения уровня знаний и успеваемости студентов КСР необходимо иметь в плане учебных занятий, особенно на младших курсах института, при изучении базовых дисциплин: «Физика», «Математический анализ», «Химия» и т. д. Это обеспечит последующее успешное освоение студентами базовых, а далее и общетехнических дисциплин.

Литература

[1] Фокин Ю.Г. Психодидактика высшей школы. Психолого-дидактические основы преподавания. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 423 с.

[2] Фокин Ю.Г. Технология обучения в высшей школе. От теории к технологическим процедурам. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 326 с.

[3] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. О целесообразности сохранения в учебном процессе технического ВУЗа контролируемой самостоятельной работы студента. Успехи современной науки и образования. Педагогические науки, 2016, № 9, с. 128–129.

[4] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. О мотивации аудитории и целесообразности изучения физики в техническом вузе. Успехи современной науки и образования. Педагогические науки, 2016, № 7, с. 102–104.

УДК 378.046.4

Программа дополнительного образования в рамках сотрудничества МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «Газпром»

Гладышева Яна Владимировна yanagladysheva@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Комкова Татьяна Юрьевна tkomkova@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Задорожный Евгений Николаевич eugenezador@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены аспекты сотрудничества корпорации МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «Газпром» при подготовке специалистов по программе дополнительного образования на базе кафедры физики «Спектрометрический анализ состава и характеристик природного газа». Программа дополнительного образования направлена на формирование общепрофессиональных и профессиональных компетенций обучающихся. Показано, что дополнительное образование позволяет ориентировать слушателей на научно-исследовательский характер профессиональной деятельности и позволяет освоить экспериментально-исследовательскую и проектную профессиональную деятельность в области газодобычи и газопереработки.

Ключевые слова: *профессиональные компетенции, дополнительное образование, спектрометрия, образовательные программы*

Концепция развития дополнительного образования является плодотворной на всех этапах образовательной траектории слушателей, начиная от школьников и заканчивая людьми с имеющейся профессиональной подготовкой. В высших учебных заведениях именно через систему дополнительного образования формируется элитный потенциал инженеров [1–3]. Квалифицированные инженерные кадры являются важной базой для ритмичного функционирования общества в целом. В этой связи актуальным является использование тесной функциональной связи технических вузов и промышленных корпораций для реализации научно-образовательных программ в целях формирования и повышения квалификации инженеров [4].

В рамках утвержденной Программы повышения качества образования и подготовки кадров на 2020–2021, 2021–2022 учебные года ПАО «Газпром» — федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» в МГТУ им. Н.Э. Баумана ведется работа в различных областях.

Одним из направлений научных исследований в интересах ПАО «Газпром» является «Спектрометрический анализ состава и характеристик природного газа». Научная деятельность лабораторий, в которых проводятся указанные исследования, сопровождается процессом обучения студентов университета работе на оборудовании и проведении исследовательских работ. Разработаны образовательные программы для дополнительного образования бакалавров, магистров, специалистов и аспирантов.

Вызывает интерес работа научно-исследовательской лаборатории спектрального анализа сплошных сред. В лаборатории проводятся учебные занятия, реализуются программы повышения квалификации, мастер-классы для школьников и студентов, а также научные исследования со студентами и аспирантами в рамках программ, разработанных в интересах ПАО Газпром.

В качестве основного оборудования используется лабораторный стенд — ИК-Фурье-спектрометр ФСМ 2201, спектрофотометр РВ 2201, установка по флюоресценции. Объектами исследований являются жидкости, растворенные газы, мембраны.

В ходе проведенных работ по Фурье ИК-спектроскопии были получены основные экспериментальные результаты [5]:

- исследование спектра пластинки Нафиона в жидкостной кювете ограниченной толщины является эффективной неразрушающей методикой для изучения различных режимов разматывания полимерных волокон в объем воды с разным изотопным составом и разным содержанием ионов в жидкостях;
- малые изменения концентрации ионов приводят к существенным изменениям в динамике разматывания полимерных волокон;
- в воде, обедненной по дейтерию (DDW), динамика разматывания полимерных волокон существенно отличается от динамики разматывания в обычной природной воде;
- зависимости концентрации воды от времени набухания полимерной мембраны Нафиона в кювете ограниченного объема имеют характерные особенности, которые обусловлены скачкообразными изменениями внутренней структуры в объеме полимерной матрицы;
- изменения внутренней структуры в объеме полимера проявляются не только в процессе набухания мембраны в кювете ограниченного объема, но и при высыхании этой мембраны, что позволяет изучать эти изменения с использованием корреляционного анализа зависимостей, полученных в процессах набухания / высыхания.

В результате за период с 2020 г. по 2022 г. экспериментально-исследовательской и проектной деятельности по программе «Спектрометрический анализ состава и характеристик природного газа» работали и успешно защитили выпускные квалификационные работы бакалавра 6 человек и выпускные квалификационные работы магистра — 5 человек. По итогам исследований подготовлено и опубликовано более 10 научных работ. Разработана образовательная программа дополнительного образования на базе кафедры ФН 4 «Спектрометрический анализ состава и характеристик природного газа» в рамках подготовки кадров в интересах ПАО «Газпром». Программа является элементом дополнительного образования и ориентирована на научно-исследовательский характер профессиональной деятельности, позволяет освоить на практике экспериментально-исследовательскую и проектную профессиональную деятельность в области газодобычи и газопереработки. Программа, направлена на формирование общепрофессиональных и профессиональных компетенций обучающихся. Программа включает лекции, семинарские занятия, лабораторные занятия в объеме 40 академических часов по курсу «Основы ИК-спектрометрии». В рамках реализации программы разработана лабораторная работа «Изучение принципа работы ИК-Фурье спектрометра». Лабораторная работа позволяет изучить физические принципы работы ИК-Фурье спектрометра, освоить методику проведения измерений коэффициента пропускания / поглощения ИК-излучения в растворах жидкостей, а также углеродосодержащих растворах. Пройти подготовку по данной программе могут бакалавры, ма-

гистры, специалисты, аспиранты, сотрудники предприятий ПАО «Газпром». Целью программы являетсяосвоение профессиональных компетенций в области проведения работ, связанных с изучением свойств газов, газовых смесей на месторождениях, определения их химического состава и возможности дальнейшего использования компонент газа и газовых смесей, то есть их экономичной и экологически безопасной переработки.

Использование системы дополнительного образования, сформированной на базе научных центров, университетов и предприятий, позволяет активизировать процесс усвоения фундаментальных знаний, расширяет профессиональные возможности и навыки обучающихся. В период активного внедрения информационных технологий в технику имеющиеся знания и технологии достаточно быстро вырабатывают свой ресурс, грубо говоря «устаревают» или становятся не актуальными. В этой связи целесообразно непрерывно реставрировать и формировать обновленный портфолио своих профессиональных знаний. В этом случае свою инновационную роль может сыграть система дополнительного образования, векторы возможностей которой связаны с потенциалом технических вузов и крупных промышленных корпораций таких, как ПАО «Газпром».

Литература

[1] Tsibizova Y.Yu., Poyarkov N.G., Mamaeva S.V., Rubtsov A.V., Plekhanova E.M., Kolchina V.V., Tonkavich I.N. Forming a pedagogue′s research competences in innovative educational environment. International Journal of Engineering and Technology (UAE), 2018, vol. 7, no. 4.38, pp. 1243–1246. DOI: https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.38.27797

[2] Цибизова Т.Ю., Постников В.М., Спиридонов С.Б. Анализ влияния технологий лекций-визуализаций на результаты контрольных мероприятий по учебным дисциплинам. Перспективы науки и образования, 2018, № 3 (33), с. 358–363.

[3] Тимченко С.Л., Семиколенов А.В., Чуев А.С., Задорожный Н.А. Онлайн-курс физики на платформе цифрового образования технического университета. Международный форум «Цифровые технологии в инженерном образовании: новые тренды и опыт внедрения»: сб. трудов. Москва, 2020, с. 118–122.

[4] Еркович О.С., Задорожный Н.А., Морозов А.Н., Поздышев М.Л., Тимченко С.Л. Русский метод обучения при подготовке инженеров на кафедре физики. Физическое образование в вузах, 2016, т. 22, № 4, с. 5–19.

[5] Bunkin NF, Bolotskova PN, Gladysheva YV, Kozlov VA, Timchenko SL. Adsorption of Methylene Blue on the Surface of Polymer Membrane; Dependence on the Isotopic Composition of Liquid Matrix. Polymers, 2022, vol. 14 (19), art. no. 4007. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14194007

УДК 378.1

Дистанционное обучение в вузе: за и против

Двуличанская Наталья Николаевна nnikdv@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены характерные особенности дистанционного обучения в вузе. Проанализированы и представлены преимущества и недостатки данной формы обучения. Сделан вывод о том, что на современном этапе дистанционное обучение может применяться в составе смешанного (дистанционного и традиционного очного) и является эффективным в случае необходимости закрепления или углубления знаний, повышения квалификации.

Ключевые слова: *дистанционное обучение, вуз, особенности дистанционного обучения, смешанное обучение*

Дистанционное обучение — обучение на расстоянии – не является абсолютно новым в образовательной практике нашей страны, являясь альтернативой стандартной системе образования в виде заочной или вечерней форм. Однако интенсивное развитие дистанционные образовательные технологии получили в последнем десятилетии, особенно в период пандемии. Министерство науки и высшего образования России достаточно быстро отреагировало на сложившуюся ситуацию и в 2020 году рекомендовало всем учреждениям высшего образования перейти на дистанционную форму ведения образовательного процесса. При этом традиционная форма обучения планировалась только по индивидуальному графику при проведении практик, для производственного обучения и лабораторных занятий.

Несмотря на вынужденный в последние годы переход на дистанционное обучение (ДО) всех уровней образования, в том числе высшего, его можно считать одной из инновационных форм достижения результатов современного образования, которая вносит в него значительные изменения характера познавательной деятельности и стиля мышления обучающихся за счет введения нового в содержание, методы, формы обучения [1, с. 104]. Существенным отличием дистанционного от заочного обучения является обеспечение интерактивности, при которой преподаватели и обучающиеся имеют постоянную возможность поддерживать друг с другом диалог в виртуальном пространстве. Необходимо отметить, что спецификой ДО является способность удовлетворить потребности обучающегося благодаря мобильной, виртуальной форме обучения (онлайн-лекции, вебинары, презентации, видеоконференции и т. п.), с одной стороны, а с другой – потребности общества в системе непрерывного образования и самообучения в связи с необходимостью постоянной динамики знаний, умений и навыков. ДО позволяет получать образование жителям отдаленных районов, где нет иных возможностей для профессиональной подготовки или получения качественного высшего образования, обучающимся с ограниченными возможностями здоровья; дает возможность всеобщего обмена информацией вне зависимости от пространственных и временных поясов.

Анализ научных публикаций за последние несколько лет позволяет констатировать значительный рост количества работ, посвященных вопросам применения ДО, особенностей организации учебного процесса с использованием дистанционных обра-

зовательных технологий [см., например, 2–4]. Для реализации образовательного процесса требуется принципиально иные презентации лекций, семинаров, создание электронных учебников, методических пособий, разработка педагогических технологий организации процесса обучения в соцсетях. Кроме того, необходимо наличие специального оборудования для эффективной реализации ДО. Однако к полномасштабному внедрению дистанционного варианта ведения занятий наши вузы оказались не вполне готовы. Среди причин создавшейся ситуации авторы статьи [2] выделяют следующие. Во-первых, недостаточна степень информатизации многих наших университетов, в частности, связанная с ограниченным доступом в Интернет (что, возможно, связано с недостаточным финансированием). Во-вторых, у некоторых представителей профессорско-преподавательского состава не сформированы навыки применения компьютерных технологий, — прежде всего у старшего поколения, или преподавателей, предпочитающих использовать традиционную форму «с мелом и доской», считая ее более привычной и приемлемой с точки зрения сохранения здоровья, более эффективной для основательного усвоения учебных дисциплин.

Необходимо отметить, что дистанционные формы обучения не являются универсальными, так как не могут быть в полной мере применимы для освоения ряда дисциплин. Например, при изучении конструкций технических объектов необходима учебная работа на реальных образцах или макетах, как и невозможно стать врачом без клинической практики. Даже создание качественного виртуального лабораторного практикума не может заменить реальную практическую работу.

Результаты проведенного исследования среди *положительных аспектов ДО* позволяют выделить следующее.

- Доступность образования не только в любой точке нашей страны, но и за рубежом при наличии доступа в Интернет.
- Сохранение безопасной дистанции для здоровья участников образовательного процесса.
- Возможность выстраивать собственную образовательную траекторию в соответствии с личностными особенностями и образом жизни.
- Увеличение числа обучающихся с ограниченными возможностями здоровья, людей, желающих совмещать работу и учебу, работающих по сменам и т. п.
- Стоимость дистанционного обучения намного ниже, в интернете есть множество бесплатных курсов и видеоуроков..
- Доступность и быстрый сбор информации и ее обработка.
- Уменьшение временны́х затрат на получение образования или повышение квалификации, так как онлайн-обучение обычно занимает меньше времени, чем очное.

Необходимо отметить и *недостатки ДО*.

1. Недостаточное наличие или отсутствие материально-технической базы в вузах для организации полноценного дистанционного обучения.
2. Нарушение стабильности образовательного процесса в результате имеющейся большой вероятности технических неполадок.
3. Снижение уровня контроля за студентами, так как в случае ДО при приеме экзамена и/или зачета трудно, а иногда и невозможно установить контроль за использованием студентами разрешенных преподавателем источников информации при подготовке ответов.
4. Ухудшение качества образования за счет уменьшения времени «живого» общения преподавателя и студентов, в результате чего на многие вопросы обучающимся

приходится искать ответы самостоятельно. Кроме того, не формируются такие социально-личностные качества личности студентов, как коммуникативность, толерантность, умение работать в группе.

5. Недостаточность практических занятий, необходимых для освоения ряда профессий.
6. Для некоторых преподавателей, а также и современных студентов, имеющих проблемы со зрением, длительная работа с компьютером создает определенные трудности, а иногда и противопоказана.
7. Приемлемость обучения только для дисциплинированных и мотивированных студентов, так как ответственность за усвоение информации лежит полностью на самих обучающихся.
8. Трудоемкость процесса подготовки преподавателей к занятиям и оцениванию приобретенных студентами знаний и умений, исходящая из специфики работы.

Как видно из вышеизложенного, «минусов» в ДО немало. В соответствии с этим ДО в настоящее время не может полностью заменить традиционную очную форму обучения. Конечно, с широким внедрением информационных технологий в различные области жизнедеятельности в ДО с каждым годом будет вовлечено все большее количество студентов, так как Интернет и компьютерные технологии позволяют сделать обучение более разнообразным и интересным.

Таким образом, оптимальным вариантом обучения студентов в вузах, в том числе в период пандемии или в других подобных ситуациях, представляется применение *смешанного обучения*: сочетание дистанционного и традиционного очного обучения (сначала традиционное и дистанционное, в период, например, пандемии — только дистанционное, по окончании чрезвычайной ситуации — переход на дистанционное и традиционное). Дистанционное обучение — вероятно, хороший вариант для совершенствования существующих знаний или углубленного изучения материала, повышения квалификации, но не для начального приобретения знаний и умений, получения профессиональных навыков.

Литература

[1] Вишнякова С.М. Профессиональное образование: Словарь: Ключевые понятия, термины, актуальная лексика. Москва, НМЦ СПО, 1999, 538 с.

[2] Михайлов О.В., Денисова Я.В. Дистанционное обучение в российских университетах: «шаг вперед, два шага назад»? Высшее образование в России, 2020, т. 29, № 10, с. 65–76. DOI: https://doi.org/10.31992/0869-3617-2020-29-10-65-76

[3] Соловов А.В., Меньшикова А.А. Коронавирусные зигзаги электронного дистанционного обучения. Высшее образование в России, 2021, т. 30, № 6, с. 60–69. DOI: https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-6-60-69

[4] Степанова А.С. Дистанционное обучение в высших учебных заведениях на современном этапе как психолого-педагогическая проблема. Современные проблемы науки и образования, 2022, № 3. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=31718 (дата обращения 01.11.2022)

УДК 378.146

Тестирование остаточных знаний студентов первого курса технического университета как инструмент менеджмента качества высшего образования: физика

Еркович Ольга Станиславовна erkovitch@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поздышев Михаил Леонидович pte59@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрена проблема входного контроля остаточных знаний студентов первого курса технического университета как необходимый элемент образовательного процесса. Показано, что оценка готовности студентов к освоению курса физики, опирающаяся на совокупность результатов ЕГЭ как критериев конкурсного отбора, не является эффективной при проектировании учебного процесса. Сделан вывод о том, что результаты входного контроля обусловливают необходимость организаций консультационных занятий в формах, учитывающих индивидуальные образовательные потребности студентов, для обеспечения высокого качества подготовки выпускников технического университета.

Ключевые слова: *остаточные знания, учебный процесс, менеджмент качества в образовании, курс физики*

Современные тенденции развития промышленного производства, опирающегося на внедрение в практику новейших научных разработок, привели к возрастанию потребности в инженерных кадрах высокой квалификации. Учебный процесс в технических университетах в связи с необходимостью удовлетворения этой потребности приобрел черты, ранее характерные для массовых высокотехнологичных производств. Соответственно, в организации учебного процесса начали использоваться методы, хорошо зарекомендовавшие себя в менеджменте промышленных предприятий.

Переход к компетентностному подходу в построении образовательных стандартов как высшего, так и — в особенности — среднего образования привел к необходимости использования методов менеджмента качества в осуществлении учебного процесса на всех организационных уровнях. Это вызвано в первую очередь тем, что, обеспечивая образовательным учреждениям высокую степень самостоятельности при определении непосредственного содержания учебных программ и методов их реализации, компетентностный подход перестал обеспечивать единство образовательного пространства средней школы, что неизбежно привело к существенным проблемам в реализации программ уже высшего профессионального образования.

Как показывает опыт работы факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, особенно значимым этот фактор оказывается при преподавании дисциплин естественнонаучного цикла на 1–2-м курсах бакалавриата и специалитета.

Важно иметь в виду, что естественные науки, в особенности физика, играют важную роль в формировании широкой группы компетенций, включающих как общекультурные и общепрофессиональные, так и профессиональные компетенции, являясь основой для формирования системного мышления. Формирование дисциплинарных

компетенций («знаний, умений и навыков») должно быть связано с формированием блоков компетенций, определяемых ФГОС ВО по конкретному направлению подготовки [1].

В то же самое время реализация компетентностного подхода сталкивается с объективными трудностями, связанными с особенностями формирования студенческого контингента. При проектировании образовательного процесса в соответствии с современными требованиями менеджмента качества [2] одним из существенных условий успешной реализации обучения в высшей школе признается наличие входного контроля. Абитуриент, успешно преодолевший входной контроль, должен обладать основами естественнонаучных и математических знаний, позволяющими продолжить обучение в высшей школе в соответствии с требованиями к результатам обучения, заложенными в ФГОС ВПО (или образовательных стандартах Университетов).

В настоящее время зачисление студентов в подавляющее большинство технических университетов Российской Федерации осуществляется на основании результатов Единого государственного экзамена (ЕГЭ) по дисциплинам, перечень которых определен университетом, а также по результатам олимпиад разного уровня. Несмотря на ряд недостатков [3, 4], ЕГЭ обеспечивает достаточно высокий уровень объективности при оценке уровня подготовки выпускников средней школы.

Тем не менее следует признать, что существующая система проверки знаний абитуриентов не обеспечивает полноценного входного контроля для обучения в техническом университете. С одной стороны, это отчасти связано с тем, что при поступлении на ряд инженерных специальностей учитываются результаты ЕГЭ по математике, русскому языку и информатике, но не по физике. С другой стороны, материалы ЕГЭ составлены таким образом, что выпускник средней школы может получить на ЕГЭ по физике достаточно высокую оценку (60–75 баллов), обладая неудовлетворительными знаниями по разделам курса, принципиально важным для дальнейшего успешного обучения в техническом университете. Учитывая, что полноценное освоение школьного курса физики требует серьезного знания математики, основ системного мышления, умения осмысливать сложные тексты, при построении стратегий поступления в вуз школьники часто делают акцент на освоении дисциплин, по отношению к физике являющихся базовыми: математики и русского языка, изучая курс физики по «остаточному принципу», что подтверждается проверкой остаточных знаний первокурсников.

Контроль остаточных знаний по физике, проведенный в феврале 2021 года при начале изучения курса, показал, что 21 % первокурсников МГТУ им. Н.Э. Баумана имеет недостаточные для начала обучения в вузе знания по кинематике равноускоренного движения, 18 % — по динамике материальной точки, более 70 % — по законам сохранения энергии и импульса, и т. д. Это показатели незначительно варьируются в течение последних пяти лет. Кроме того, было установлено, что внутри большинства студенческих групп существует значительный разброс оценок контроля, что не позволяет при реализации учебного процесса ориентироваться на «среднестатистического студента», что требует от преподавателей дополнительных усилий для удовлетворения образовательных потребностей студентов с различным уровнем предварительной подготовки. Аналогичная ситуация наблюдается и в других естественнонаучных дисциплинах. Помимо неоднородности, важной особенностью студенческого контингента является несформированность социально-личностных компетенций, связанных со способностью самостоятельно приобретать новые знания, навыки и умения, самостоятельно организовывать свое рабочее время.

Полноценное освоение образовательной программы, без снижения требований к конечному результату, требует учета этих особенностей студенческого контингента.

Одним из способов решения этой задачи следует считать изменение характера консультационной работы, превращая традиционные консультации в несколько иной вид занятий — контролируемую самостоятельной работу студентов (КСР). Во время этих занятий преподаватель может более подробно осветить вопросы, оказавшиеся из-за низкого уровня предварительной подготовки сложными для студентов; выдать дополнительное задание каждому студенту группы и проконтролировать его выполнение, обеспечив необходимое консультирование; провести мастер-класс по выполнению определенных видов работы и т. д. Эксперимент по введению КСР как обязательного для посещения вида занятий, в течение пяти лет проводившийся на кафедре физики, показал, что участие студентов в этом виде учебных занятий приводит к существенному росту показателей успеваемости. Работа в условиях эпидемии COVID-19 показала, что реализация такого вида работы может успешно осуществляться в дистанционной форме, что позволяет еще более полно удовлетворить индивидуальным запросам студенческого контингента и обеспечить высокий уровень их профессиональной подготовки.

Литература

[1] Татур Ю.Г. Образовательный процесс в вузе: методология и опыт проектирования. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 262 с.

[2] ГОСТ Р 52614.2–2006. Системы менеджмента качества. Руководящие указания по применению ГОСТ Р ИСО 9001—2001 в сфере образования. Москва, Стандартинформ, 2007, 64 с.

[3] Болотов В.А. Прошлое, настоящее и возможное будущее российской системы оценки качества образования. Вопросы образования, 2018, № 3, с. 287–295. DOI: https://doi.org/10.17323/1814-9545-2018-3-287-297

[4] Власов В.Г. Проект «Входной контроль» в вузе: цель, технология, результат. Высшее образование сегодня, 2022, вып. 7, с. 37–42. DOI: https://doi.org/10.18137/RNU.HET.22.07.P.037

УДК 378:537

Образовательная манга – японский учебный ресурс по курсу общей физики для студентов

Заблоцкий Владимир Ростиславович V.R.Zablotskii@Yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены переводные брошюры японского учебного ресурса, предназначенного для студентов университетов, изучающих разные разделы общей физики: термодинамику, электромагнетизм, квантовую механику и т. д. Новаторский прием образовательной манги заключается в замене текстовой информации рисунками, что позволяет читателю получать информацию в виде зрительных образов быстрее и с меньшими усилиями. Такой подход является естественным продолжением японского способа получения информации при помощи иероглифического письма. На примере двух брошюр «Занимательная физика. Электромагнетизм» и «Занимательная физика. Квантовая механика» представлены два удачных примера манги: иллюстрация вопроса появления силы Лоренца в случае, когда заряженная частица и наблюдатель неподвижны и движутся относительно проводника с током, а также иллюстрация к вопросу о схлопывании волновой функции, на примере обнаружения электрона в атоме. Однако некоторые брошюры образовательной манги не лишены и недостатков. К ним можно отнести некачественный технический перевод с японского на русский язык.

Ключевые слова: *занимательная физика, обучение студентов вузов, японская обучающая манга по физике, обучающий материал по курсу общей физики*

Сейчас в книжных магазинах продаются пестрые, небольшого формата брошюры из серии образовательная манга [1–3], иначе занимательная физика для студентов. Несколько экземпляров таких брошюр попались мне в руки, выводы и результаты анализа учебной ценности данных учебных материалов представлены в данном сообщении.

Сюжет большинства этих книг развивается вокруг незамысловатого сценария: студенту или студентке необходимо выучить университетский курс, например квантовую механику или теорию электромагнетизма и сдать экзамен по этому предмету. И вот когда у обучающегося все становится совсем плохо, появляется наставник в образе сэнсэя или сотрудницы физической лаборатории, которые берутся помочь отстающему. Далее на страницах таких брошюр в краткой форме излагаются основные положения учебного курса, сам процесс обучения разбит на отдельные сцены — рисунки, в которых действующие лица — ученик и учитель ведут диалог, рассматривая вопросы изучаемой дисциплины.

Занимательные черно-белые рисунки вносят в учебный процесс наглядность и время от времени переключают внимание с теории на виртуальных участников учебного процесса, создавая кратковременную разрядку обучающегося. Вместе с героями манги, читатель изучает основные понятия и законы учебного курса. Вообще то использование диалога между учителем и учеником, хорошо известный способ подачи материала в образовательной литературе, можно например, вспомнить брошюры из серии «Это очень просто!». Новаторским приемом образовательной манги является замена текстов рисунками, что позволяет получать информацию в виде зрительных образов. Такой подход является как бы продолжением японского способа получения информации при помощи иероглифического письма.

В качестве примера рассмотрим брошюру «Занимательная физика. Электромагнетизм» [1]. Ниже представлено название серии и название брошюры на японском языке.



В первой строке название серии представлено словосочетанием «манга» на катакане и «дэвакару» на хирагане, последнее означает «можно понять». Написанное словосочетание имеет смысл: «учись с мангой». Четыре иероглифа во второй ке слева направо означают следующее: первый иероглиф — электричество, второй — магнетизм, третий — воздух и четвертый — обучение. Вместе четыре иероглифа переводятся на русский язык как электромагнетизм.

Среди многих обучающих рисунков, связанных с электрическим и магнитным полями, которыми наполнена эта брошюра, хочется отметить следующий пример о действии силы Лоренца на заряженную частицу. Объяснение и иллюстрации, приведенные ниже, взяты из брошюры [1]. Рассмотрим неподвижную заряженную частицу $+q$, расположенную поблизости от проводника, по которому течет постоянный электрический ток. Как известно на такую частицу сила Лоренца не действует. Однако на ту же частицу, которая движется относительно проводника с током, сила Лоренца действует. Как наблюдатель, движущийся вместе с частицей и неподвижный относительно ее, объяснит появление силы. В первом и во втором случае заряженная частица и наблюдатель неподвижны относительно друг друга.

Объяснение заключается в следующем. Все заряды в проводнике действуют на заряд вне проводника, но поскольку количество положительных и отрицательных зарядов в проводнике с током одинаковое, их взаимодействие приводит к тому, что результирующая сила, действующая на частицу вне проводника, равна нулю. Следовательно, на неподвижный заряд снаружи проводника с током сила Лоренца не действует. Эта ситуация иллюстрируется на рис. 1 слева.

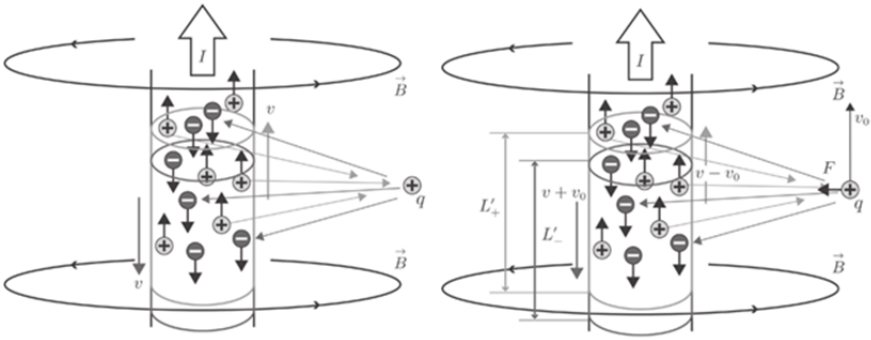


Рис. 1. Заряженная частица рядом с проводом, по которому течет постоянный ток:

слева — частица, провод с током и наблюдатель неподвижны; справа — частица и наблюдатель неподвижны, но движутся относительно провода с током со скоростью υ0

Для того чтобы объяснить появление силы в случае движущейся заряженной частицы привлекается специальная теория относительности и в частности такой эффект, как лоренцево сокращение длины. Наблюдатель, движущийся рядом с зарядом, смотрит на провод с током и заметит, что одни заряды (отрицательные) в проводнике движутся быстрее, а другие заряды (положительные) — медленнее. Поскольку лоренцево сокращение тем сильнее, чем выше относительная скорость, для положительного и отрицательного зарядов лоренцево сокращение различно и определяется формулами:

- для положительных зарядов

$$L_+ = L\sqrt{1-\left(\frac{v-v_0}{c}\right)^2};$$

- для отрицательных зарядов

$$L'_- = L\sqrt{1-\left(\frac{v+v_0}{c}\right)^2}.$$

Величина $v \pm v_0$ хоть и очень мала, но не равна нулю. В результате степень сжатия отрицательных зарядов оказывается больше, чем положительных. Наблюдатель, который двигается вместе с заряженной частицей по направлению электрического тока, видит, что плотность отрицательных зарядов в проводе больше, чем положительных. Следовательно, на движущуюся вне проводника заряженную частицу действует сила притяжения. На рис. 1 в правой части эта сила обозначена как *F*. Таким образом, положительный заряд при движении в направлении тока в проводнике будет притягиваться к проводу с током.

Однако некоторые брошюры образовательной манги не лишены и недостатков, которые уменьшают их полезность. Основные недостатки данного учебного ресурса заключаются в сложности качественного перевода с японского на русский язык и в выборе обучающей важности иллюстративного материала. И хотя в сопутствующей рекламе серии образовательной манги отмечено, что все книги проверены преподавателями и профессорами ведущих профильных вузов для точного перевода и адаптации, реальность может существенно отличаться от рекламных слоганов.

Например, рассматриваемая брошюра имеет большое количество рисунков, которые в большинстве случаев понятны с первого взгляда. Это явно положительная сторона данного издания, чего не скажешь о качестве перевода на русский язык, особенно во второй части книги. На рис. 2 показан пример неудачного перевода. Давайте попытаемся разобраться в тексте, размещенном над известной формулой. Как видно дословный перевод «спираль магнитного поля равна временным изменениям» — и звучит странно, и мало что объясняет.

Очевидно, над этой фразой надо было поработать специалисту, возможно, что перевод был бы таким: «вихрь электрического поля равен со знаком минус производной магнитной индукции по времени». Если не использоваться термином «производная по времени», то фраза могла бы быть такой, «вихрь электрического поля определяется скоростью изменения магнитной индукции».

Рассмотрим другой пример, в котором рисунок поясняет суть проблемы нагляднее, чем текст, который принадлежит обучающему персонажу, сотруднице физической лаборатории Шиэру.

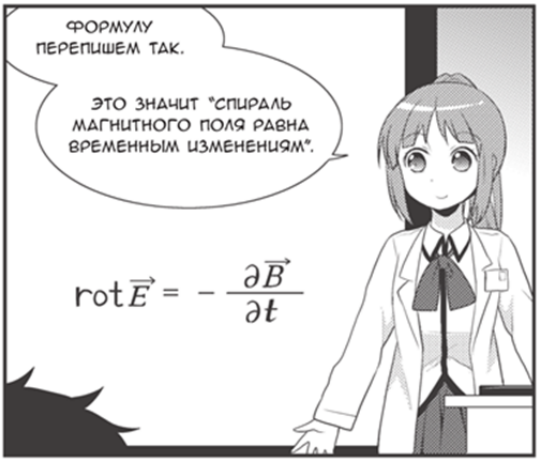


Рис. 2. Пример неудачного перевода с японского языка

На рис. 3 видно, что здесь объясняется мысленный эксперимент по зарядке конденсатора, который привел Максвелла к понятию «тока смешения». Фраза «если изменить форму плоскости, ток не пропускается», представленная в правой части рисунка, требует корректировки. Поэтому неудивительно, что первокурсник Андо Рэн — обучаемый персонаж брошюры — высказался в такой резкой форме. В этом случае вместо слова «плоскости» надо использовать термин «поверхность» и тогда фраза «если изменить форму поверхности, натянутую на контур так, как показано на рисунке, то ток через такую поверхность не потечет» становиться читабельной и грамотной с физической точки зрения.

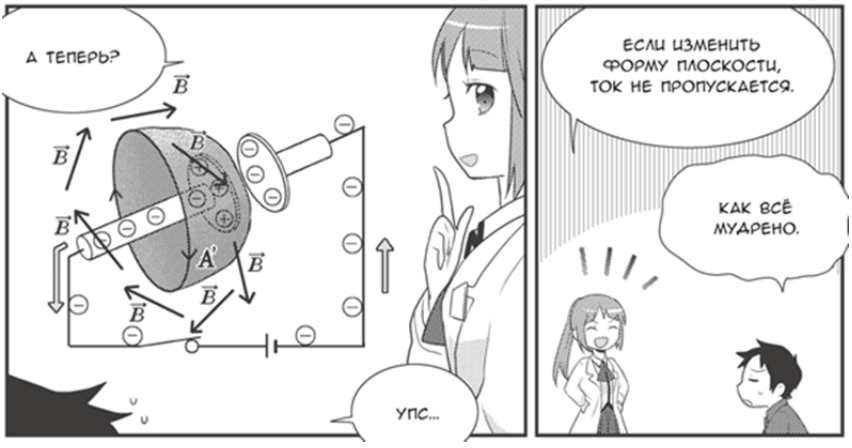


Рис. 3. Пример, когда рисунок, поясняет лучше, чем сопутствующий текст

Очевидно, трудно поддерживать легкий стиль изложения, освещая сложные научные вопросы. Эта проблема в брошюрах решена следующим способом, некоторая часть учебного материала представлена в форме текста с формулами, а другая в форме рисунков. Для этого в брошюрах серии сделаны врезки, в которых излагается обычный текст

в формате классического учебника без участия героев книги. Читатель имеет право выбрать свой способ чтения главы: поверхностный, без детальной проработки материала с выводом формул или глубокий с работой над материалом во врезках.

Обратимся к другой брошюре «Занимательная манга. Квантовая механика». Четыре иероглифа во второй строке слева направо означают следующее: первый иероглиф — количество, второй — ребенок, третий — сила и четвертый — обучение, первые два иероглифа переводятся как квантовая, а сочетание третьего и четвертого как механика, поэтому четыре иероглифа вместе — квантовая механика.



В брошюре дается подробное развитие представлений о микромире с античности до наших дней. Большое внимание уделено развитию квантовой физики на рубеже 20 века, освещаются открытия таких великих физиков как Бальмер, Планк, Шредингер, Гейзенберг, Бор. В заключительной части брошюры читатель знакомится с современными возрениями на элементарные частицы, теорию струн.

В качестве обучающего материала в данной брошюре, рассмотрим вопрос о схлопывании функции вероятности, на примере обнаружения электрона в атоме. На рис. 4 показана функция распределения вероятности (волновая функция), описывающая вероятность обнаружения электрона в разных точках атома и возможное местоположение электрона.

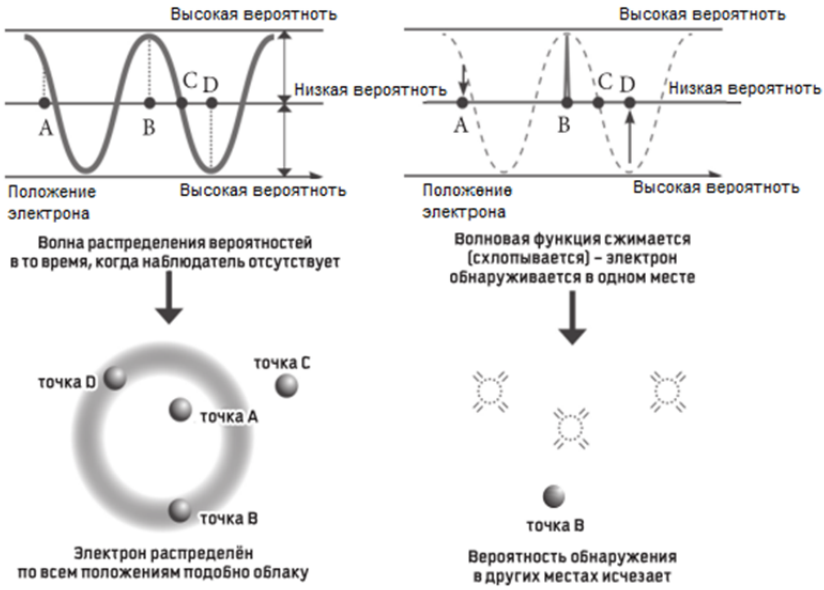


Рис. 4. Иллюстрация к схлопыванию волновой функции при обнаружении электрона в атоме, слева — до наблюдения, справа после наблюдения

Если наблюдатель не воздействует на электрон его вероятность быть обнаруженным в атоме характеризуется волной распределения вероятностей в соответствии с уравнением Шрёдингера. Слева на рис. 4 показан график, изображающий волновую функцию в виде колебания волны вероятности. На этом этапе однозначно определить положение электрона невозможно — электрон распределен по всем возможным положениям, подобно облаку. В качестве примера на рисунке показаны четыре таких возможных положения электрона, обозначенных соотвественно A, B, C и D.

Однако если наблюдатель провел эксперимент, в результате которого было установлено, что электрон находится в точке пространтва B (на рис. 4 справа), то это означает, что вероятность обнаружить электрон в других точках стала равна нулю, поэтому график волновой функции схлопнется в линию, восстановленную из точки B.

В статье рассмотрены брошюры японского учебного ресурса, предназначенного для студентов, изучающих разные разделы общей физики: термодинамику, электромагнетизм, квантовую механику и т. д. Использованный подход, основанный на изложении сложного материала с помощью наглядных рисунков и коротких текстовых объяснений, заслуживает внимания. Однако показаны и сложности, возникающие при использовании данных учебных материалов.

Литература

[1] Эндо М., Маниси М. Занимательная физика. Электромагнетизм. Манга. Москва, ДМК Пресс, 2017.

[2] Кэндзи И., Хиираги Ю. Занимательная физика. Квантовая механика. Манга. Москва, ДМК Пресс, 2016.

[3] Харада Т., Кавамото Р. Занимательная физика. Термодинамика. Манга. Москва, ДМК Пресс, 2015.

[4] Нитта Х., Такацу К. Занимательная физика. Механика. Манга. Москва, ДМК Пресс, 2011.

УДК 501

Образовательные цифровые ресурсы для повышения качества образования

Калугина Любовь Ильинична klove2112i@yandex.ru
МБОУ «Сиренькинская СОШ»

Главная цель новой модели образования — создание среды, обеспечивающей максимально высокий уровень образования за счет развития у обучающихся знаний и навыков, предъявляемых современным информационным обществам: сотрудничество, коммуникация, социальная ответственность, способность мыслить критически, оперативное и качественное решение проблем. Решения этой глобальной задачи невозможно без продвижения и использования цифровых образовательных ресурсов.

Ключевые слова: *цифровые образовательные ресурсы, современные информационные технологии и сервисы, Высокий уровень образования, индивидуализация учебных заданий*

Главная цель новой модели образования — создание среды, обеспечивающей максимально высокий уровень конкурентоспособного образования за счет развития у обучающихся знаний и навыков, предъявляемых современным информационным обществам: сотрудничество, коммуникация, социальная ответственность, способность мыслить критически, оперативное и качественное решение проблем. Такая постановка задачи требует использования активного и актуального контента. Решения этой глобальной задачи невозможно без продвижения и использования открытых образовательных цифровых ресурсов.

Проблема повышения мотивации обучения и качества образования требует от учителя использование современных инновационных образовательных технологий актуальных на данное время. Решить данную проблему нам помогает национальный проект «Образование», согласно которому, к 2024 году Россия должна войти в десятку стран с самым лучшим школьным образованием. И главная задача — помочь детям получить достаточные знания и навыки, чтобы получить интерес к саморазвитию. Создать такие условия, в которых наши дети были здоровы, успешны и счастливы. Иметь готовность и способность к самообразованию; мотивацию к обучению и познанию; устойчивые познавательные интересы; выбор профессиональных предпочтений.

Для успешной жизнедеятельности в этом мире человеку любого возраста необходимо обладать: хорошим психологическим здоровьем, гибким умом и способностью к быстрому анализу; нестандартным мышлением и креативностью; высоким уровнем интеллекта (в том числе социального и эмоционального); хорошей межличностной чувствительностью и умениями налаживания контакта; осознанностью и рефлексивностью, умениями видеть и решать разнообразные проблемы, с любопытством и готовностью воспринимать новое.

Для каждого ученика должна строиться индивидуальная траектория на основе его потребностей, интересов и возможностей. Помимо классических предметов, акцент

будет делаться и на метапредметные навыки — т. е. те, которые пригодятся ученикам в любой сфере жизни. Например, это критическое мышление, креативность, коммуникация, умение анализировать и сравнивать, ставить цели и задачи. Для обучения и развитию этому уже созданы специальные электронные учебники и множество сайтов цифровыми и электронными образовательными ресурсами.

Благодаря таким технологиям учитель может успевать сделать за урок гораздо больше, да и сам урок становится порой интереснее и продуктивнее. В своей работе активно использую различные цифровые ресурсы: электронные формы учебников, образовательные платформы, сервисы, приложения и многое другое. Постоянно пополняя свои знания по применению данных ресурсов. Одним из них является «ЯКласс», «Открытая школа 2035», «Учи.ру», «РЭШ», «Фоксфорд» и другие. Почти на каждом уроке вместе с учащимися работаем на платформе «ЯКласс».

Впервые на своих уроках стала использовать платформу с начало 2019 года, как только сама случайно увидела данный ресурс. Почему то, «ЯКласс» был для меня очень приятным для использования. Возможно интерфейс платформы для использования был очень понятен и прост. Выход в Интернет и скорость Интернета позволял работу на платформе без каких-то затрат времени. Сразу создала классы. Привлекла учащихся. Я прослеживала за их деятельностью и ставила оценки, стимулировала активных учащихся. Тем самым смогла заинтересовать менее активных учащихся, которые на уроках не успевали показать свои возможности.

Варианты использования цифровых помощников «ЯКласс» на различных этапах уроках разнообразны. «ЯКласс» использую на уроках усвоения новых знаний, урок усвоения навыков и умений, урок усвоения навыков и умений в форме исследовательской работы, урок усвоения новых знаний в виде виртуальной экскурсии, урок обобщения, систематизации, урок контроля и коррекции знаний.

При планировании урока необходимо подумать о том, каких целей хотелось бы достигнуть с помощью данного контента. Можно выделить следующие основные критерии:

- Способствует достижению целей урока;
- Соответствует уровню современного научного знания;
- Содержит наиболее существенные, основополагающие сведения;
- Интересен и полезен;
- Не нарушает структурной целостности урока, оптимально сочетает теоретический, иллюстративный и практический материал;
- Отражает связь ранее изученного материала;
- Учитывает возрастные способности и особенности класса;
- Урок должен иметь личностно-ориентированный, индивидуализированный характер;
- В приоритете самостоятельная работа учеников, а не учителя;
- Осуществляется практический, системно-деятельностный подход;
- Каждый урок направлен на развитие УУД;
- Создавать ситуацию успеха и помогает в освоении новых знаний.

Нравится полный комплект учебно-методических документов для организации образовательной деятельности по всем предметам. Теоретические и практические

части по темам составлены по школьной программе. Иной раз создавала свои проверочные работы.

Дидактические и методические материалы, размещенные в контенте, могут быть использованы для подготовки учителей к занятиям, а также непосредственно на уроках. Способствует повышению интереса школьников к изучаемому материалу. Задачи и упражнения для закрепления темы по учебным предметам, проверки и оценки знаний обучающихся в интерактивных уроках даны с учетом специфики заданий Всероссийских проверочных работ и государственной итоговой аттестации в форме ОГЭ и ЕГЭ. В открытом доступе имеются и обновляться контрольные измерительные материалы и тестовые задания по всем учебным предметам. ЦОР «ЯКласс» стал настоящим помощником в моей работе на различных уроках. ЦОР «ЯКласс» имеет различные возможности. Для учителя — это средство повышения эффективности педагогического труда: экономия времени при проверке тетрадей, возможность создания ситуации успеха и развития для учащихся, автоматизация доставки учебного контента учащимся. Для учащихся это хороший электронный репетитор, который гарантирует освоение любого школьного предмета на «хорошо». Получая баллы за правильно выполненные задания, повышая свой рейтинг и стремясь попасть в ТОП, некоторые школьники незаметно, но эффективно стали выполнять задания и давать результаты.

«ЯКласс» был моим помощником, когда мы быстро перешли на дистант. Был опыт работы на данной платформе и у учащихся, и во время дистанта мы все легко стали использовать все возможности этого ресурса. Применяла для изучения новой темы, для проверки знаний и для систематизации изученного. Почти на каждый урок создавала проверочные работы. И сам ресурс ставил оценки за выполненные работы учащихся. Не учитель тратил время на проверку, а сам ресурс помогал вести мониторинг успеваемости и процент выполнения учащихся проверочных работ. За что я была благодарна этому ресурсу. Да учащиеся тоже тянулись к повышению результата. Благодаря данному ресурсу учащиеся стремились улучшить свои знания.

Использую данный ресурс с 5 по 11 классы по всем предметам. Выполняя различные задания, происходил процесс совершенствования моих знаний и знаний учащихся. По итогам года повысилась успеваемость учащихся. Повысилась мотивация к изучению предметов у слабоуспевающих детей. Учащиеся, чтобы повысить качество знаний стараются по мере возможностей работать на данной платформе не только на уроке и вне урока. Созданы и использованы собственные теоретические материалы, практические задания и использованы собственные домашние задания. В целом «ЯКласс» очень привлекателен, познавателен и доступен.

- Считаю, что образовательная платформа «ЯКласс» дает возможность учителю:
- Использовать материалы в качестве дидактического материала на уроках.
- Как инструмент для проверки знаний учащихся, как в школе, так и дома.
- Возможность давать проверочную работу на дом всему классу, группе учащихся или отдельному ученику.
- Возможность для организации дистанционного обучения.
- Как инструмент для подготовки учащихся к итоговой аттестации.
- Возможность для индивидуализации образовательного процесса.

Для обучающегося:

- Получить моментальную обратную связь об усвоении изученного материала.
- Постоянный и неограниченный доступ к учебным материалам по предметам школьной программы.
- Возможность выстраивать индивидуальную образовательную траекторию и выбрать удобное время для выполнения работы.

Для родителя:

- Возможность организовать индивидуальное обучение своему ребенку.
- Задать персональный темп обучения, когда ученик болеет.

На данном сайте каждый педагог найдет для себя полезные инструменты для ежедневной работы, подведения итогов и реализации своих идей. Задания «ЯКласс» существенно облегчают подготовку к уроку и дальнейшую отработку навыков.

Например, мы начинаем новую тему. Сначала подбираем соответствующий материал в разделе «Физика» и транслируем его на доску в режиме презентации. Далее через тестовые вопросы мы систематизируем, изученное на уроке.

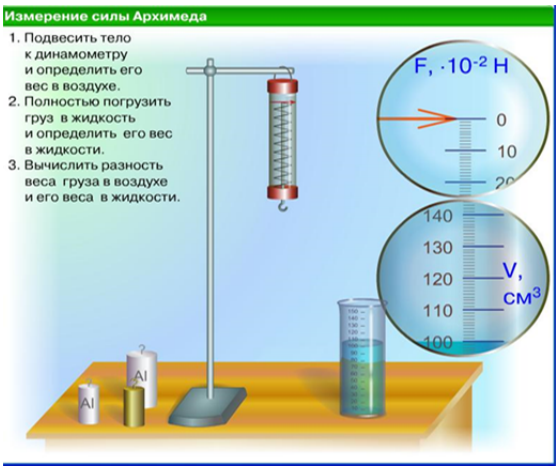
«ЯКласс» постоянно проводит вебинары, где через эти вебинары можно узнать о новых возможностях различных приложений, которые учитель может применять в своей педагогической деятельности. Являюсь постоянным слушателем таких вебинаров.

В новом учебном 2022–2023 году на «Цифровом образовательном контенте» стали доступны учебные материалы 24 образовательных площадок — это более 1700 курсов. Мы учителя имеем возможность задавать домашние и самостоятельные работы, готовить школьников к ВПР, ГИА и олимпиадам, развивать функциональную грамотность, назначая курсы в личном кабинете. Доступны пользователям: Учи.ру, Фоксфорд, МЭО, Якласс, Просвещение, Новый диск, 1С: Урок, Новая школа, Native Class, iSmart, Облако знаний, IBLS, ГлобалЛаб, ИИТ. Интеллектуальная школа. Уже присоединились новые партнеры: СберКласс, Экзамен-Медиа, Maximum Education, Открытая школа. В процессе подключения: Умскул, SkyEng (Skysmart), Think24, 01Математика образование, Лекториум и CERM.RU. Инициаторы проекта — Минцифры и Минпросвещения РФ.

Примеры использования выбранного цифрового контента «Открытая школа 2035» в образовательном процессе и оценка его пользы в обучающем процессе

Планирование урока с использованием ресурсов «Открытой школы» мною реализуется следующим образом. В кабинете имеется компьютер и ноутбуки с выходом в сеть Интернет, проектор и экран. Поэтому часто использую **фронтальную модель** (организую работу со своего рабочего места). **Перевернутый класс** (учащиеся дома знакомятся с новой темой урока, опираясь на контент данной платформы. А на уроке отрабатывают практические навыки по изученной теме), **Смена рабочих зон** (создаются несколько рабочих зон, из которых одна или две работают на платформе, в ходе урока выполняют индивидуальные задания на платформе). **Дистанционное обучение** (позволяет организовать обучение на дистанте). **Компьютерный класс** (зона работы с компьютером, зона с работы учителем), **домашнее задание** (выполняет через платформу).

Описание приема	Пример задания
Просмотр видеоролика и организация фронтального обсуждения его содержания	Предмет: Физика. Вопрос. От каких величин зависит значение выталкивающей силы?
Письменное выполнение заданий на основе просмотра учебного видеоролика Учащиеся самостоятельно должны сочинять задачи по теме урока	Пример. Вагон массой30 т., движущийся со скоростью 1,5 м/с, автоматически на ходу сцепляется с неподвижным вагоном массой 20 т. Найти скорость движения сцепки
Просмотр видео, через некоторое время остановить просмотр и узнать мнение учащихся, что произойдет дальше. После ответов — досмотреть и обсудить, правы ли они были в своих предположениях, если ошиблись, то объяснить и выяснить почему	Тема урока: Плавание судов Проблемный вопрос. Почему гвоздь тонет, а судно не тонет?
Просмотр видео по группам. Одна группа изучает теоретическую часть, другая практическую часть. Третья создает презентацию. После организуется обсуждение по теме	Тема урока: Измерение атмосферного давления. Опыт Торричелли
Запускаем видео без звука. После просмотра ученики должны озвучивать	Тема: Зависимость давление насыщенного пара от температуры. Кипение. Вывод: Согласно формуле (p0=nkT), давление насыщенного пара растет не только в результате повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара заключается в изменении массы пара при изменении температуры при неизменном объеме (в закрытом сосуде) или при изменении объема при постоянной температуре. С идеальным газом ничего подобного происходить не может (молекулярно-кинетическая теория идеального газа не предусматривает фазового перехода газа в жидкость). После испарения всей жидкости поведение пара будет соответствовать поведению идеального газа (участок BC кривой на рисунке выше).
Тесты	
— Вывод на экран задания Тестов и выполнения каждым учащимся индивидуально с проверкой на доске. — Фронтальная работа, с целью закрепления изученного или для актуализации. — Работа с тренажером по цепочке. — Выполнение одним из учащихся у доски на оценку, а остальные из учебника	Тест: Простые механизмы



Демонстрация опыта

Модель «Домашнее задание». Для реализации данной модели необходимо технические устройства с выходом в сеть Интернета. Применяют для повторения материала, изученного на уроке, или для отработки навыков по решения задач, или для глубокого погружения в тему.

Модель «Компьютерный класс»

Описание приема	Пример задания
Парная работа над заданиями в электронных симуляторах	Симулятор. Свободное падение тел
Обсуждения задания тренажера в парах и коллективная проверка результатов работы в парах	Алгебра. Тема: Решение графически систем уравнений
Индивидуальная работа, автоматизированная проверка	
Первая группа выполняет задания из учебника, а вторая работает на платформе (15 минут). Затем меняются рабочими зонами	Сделать конспект по таблице по теме урока
Создание двух разноуровневых групп (сильная и слабая) позволяет реализовать различные подходы с ЭОР	Сильная группа работает с ЭОР, а слабая с учителем выполняет практическую работу. Смена зон происходит через 15 мин
Организовать работу в духе соревнований в парах. Один с учителем обсуждают вопросы по теме, а другой на ЭОР. После смены работ, второй садится с учителем, а первый продолжает на ЭОР. После работы учитель определяет наиболее успешную пару. Такой прием удобно использовать для систематизации знаний учащихся	Информатика. Системы счисления
Работа учеников по индивидуальному маршруту с ЭОР Открытая школа	Учащиеся получают задания в зависимости от уровня своей готовности, самостоятельно изучают на платформе по теме урока, а затем отвечают на вопросы

Заключение

Цифровая трансформация образования позволяет во многом по-настоящему индивидуализировать содержание, методы и темпы учебной деятельности обучающегося. Наблюдать за каждым его действием и операцией при решении конкретных задач. Мониторить процесс освоения новых знаний и соответствующих им компетенций, своевременно вносить необходимые коррекции, как в деятельность обучающегося, так и в собственную деятельность педагога, приспосабливаясь к ситуации, которая постоянно меняется, но остается контролируемой и управляемой, как со стороны педагога, так и со стороны обучающегося. Все это позволяет обучающемуся трудиться в оптимальное для себя время, постоянно контролировать затраты своих сил, внося необходимые коррективы. Индивидуальное обучение предполагает наличие у педагога высокой педагогической квалификации. Важным отличием подобной цифровой модели от традиционного обучения является также развитие некоторых личностных качеств обучаемого, в частности, его способности к непрерывному образованию и самообразованию в развитой учебной среде, базирующейся на компьютерных, электронных, телекоммуникационных, мультимедиа, цифровых, сетевых, интернет- и т. д. — одним словом – кибертехнологиях. Однако необходимо учитывать, что при организации обучения с использованием цифровых технологий и возможностей важную функцию выполняет самоконтроль, так как основную часть учебной нагрузки обучаемый должен выполнять самостоятельно. Для педагогов становится еще более актуальным вопрос поиска средств и форм для реализации действительно индивидуального обучения (полноценной персональной индивидуализации, как по содержанию, так и по темпам и методам обучения) в условиях массового цифрового образования.

Литература

[1] Днепровская Н.В., Комлева Н.В. Открытые образовательные ресурсы. Москва, Интернет-университет информационных технологий, Ай Пи Эр Медиа, 2019, 139 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/79713.html (дата обращения 10.10.2022).

[2] Плешаков В.А. Эссе о том, как «ковидемия» породила «цифродемию» в 2020-2021 гг.: пять групп ключевых проблем и возможности для преодоления их негативных последствий. Homo Cyberus, 2022, № 1 (12). URL: http://journal.homocyberus.ru/Pleshakov_VA_1_2022 (дата обращения 12.10.2022).

[3] Плешаков В.А., Куликова О.Е. Модель программы сохранения психологического здоровья детей раннего подросткового возраста в ситуации цифровизации школы. Homo Cyberus, 2020. № 2 (9). URL: http://journal.homocyberus.ru/Pleshakov_VA_Kulikova_OE_2_2020 (дата обращения 12.10.2022).

[4] Вербицкий А.А. Цифровое обучение: проблемы, риски и перспективы. Homo Cyberus, 2019, № 1 (6). URL: http://journal.homocyberus.ru/Verbitskiy_AA_1_2019 (дата обращения 12.10.2022).

[5] https://educont.ru/ (дата обращения 10.10.2022).

[6] https://www.yaklass.ru/p/fizika/8-klass/teplovye-iavleniia-chast-2-141552/otnositelnaia-vlazhnost-vozdukha-i-ee-izmerenie-psikhrometr-189576/re-638b9fce-887d-44cc-8c9f-debe11c0353a (дата обращения 14.10.2022).

[7] https://uchi.ru/teachers/lk/main (дата обращения 19.10.2022).

[8] https://2035school.ru/profile (дата обращения 19.10.2022).

УДК 533.9

Квадрупольная микроволновая диагностика неоднородных плазменных образований

Козырев Александр Валентинович kozykryl@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поздышев Михаил Леонидович pte59@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Басак Авишак physicsboy009@gmail.com
НИЯУ МИФИ

Представлены результаты исследований на модернизированной учебно-исследовательской установке «Плазма», имеющей в штате микроволновую диагностику. На установках «Плазма 2, 3 и 4» лаборатории УНИРС МГТУ им. Н.Э. Баумана имеется возможность отработки диагностики на модельных цилиндрических (металл (Al), Hg–Ar и He–Ne плазменных образованиях) и интерпретации полученных результатов. Примененный метод квадрупольной диагностики позволяет повысить надежность обработки экспериментальных результатов. Плазменное образование внутри газоразрядной трубки имеет азимутальную неоднородность. На установках «Плазма 3, 4» одновременное использование взаимно-перпендикулярных скрещенных излучателей и приемников позволяет проводить измерение параметров рассеяния электромагнитных волн на цилиндрическом плазменном образовании в двух сечениях. Получены распределения рассеяния микроволн по азимутальному углу различных плазменных образований, что дает возможность оценить степень азимутальной неоднородности цилиндрического плазменного образования. При этом надежность измерений возрастает приблизительно на треть.

Ключевые слова: *квадрупольная диагностика, цилиндрическое плазменное образование, газоразрядная трубка, неоднородность распределения по азимутальному углу*

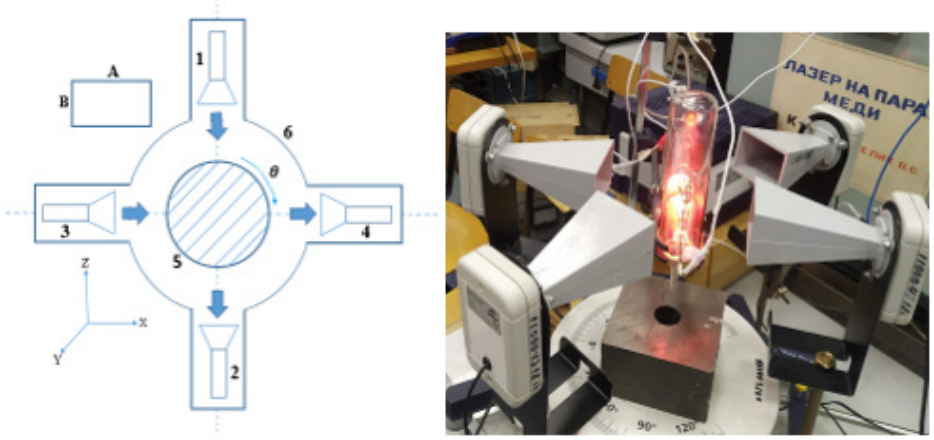
В лаборатории НИРС кафедры физики МТГУ им. Н.Э. Баумана на базе научно-исследовательских установок «Плазма 1, 2, 3 ,4» создан комплекс лабораторных работ [1–6]. для практического обеспечения лекционных курсов «Физика плазмы и Физика высокотемпературных процессов» читаемых для студентов кафедры обучающимися по специальности «Техническая физика».

Микроволновая диагностика — один из эффективных методов диагностики, применяемых в термоядерных исследованиях и при диагностике низкотемпературной плазмы.

В этом методе существуют сложности интерпретации данных. На установках «Плазма 2, 3 и 4» имеется возможность отработки диагностики на модельных цилиндрических металл (Al), (Hg–Ar и He–Ne) плазменных образованиях и интерпретации полученных результатов. На базе тестовых объектов была проведена отработка методики рассеяния волн на металлическом цилиндре и люминесцентной лампе, а также использована квадрупольная диагностика, что позволяет повысить надежность обработки экспериментальных результатов.

Плазменное образование внутри трубки имеет азимутальную неоднородность. На установках «Плазма 3, 4» (рис. 1) одновременное использование взаимно-перпендикулярных скрещенных излучателей и приемников позволяет проводить измере-

ние параметров рассеяния электромагнитных волн на цилиндрическом плазменном образовании в двух сечениях. Это дает возможность оценивать влияния неоднородности распределения по азимутальному углу плазменного образования. При этом надежность измерений возрастает приблизительно в 20...30 %.



а *б*

Рис. 1. Квадрупольная установка «Плазма 3»:

а — схема установки; *б* — внешний вид установки

Полученные результаты по учету влияния поляризации излучения, по влиянию рассеяния электромагнитных волн на внешней оболочке стекла, ограничивающей плазменное образование, представлены на (рис. 2, *а*)**,** по рассеянию для двух состояний поляризаций падающей волны (рис. 2, *б*) — продольной параллельной *S* и перпендикулярной *P* оси цилиндра.

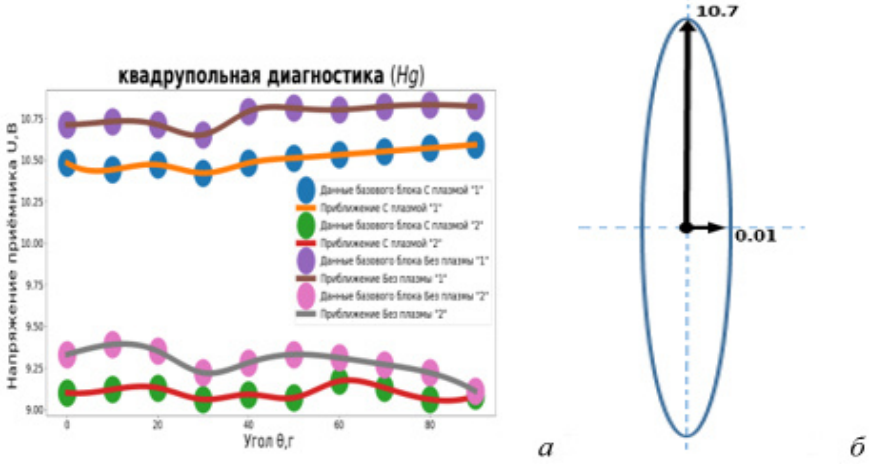
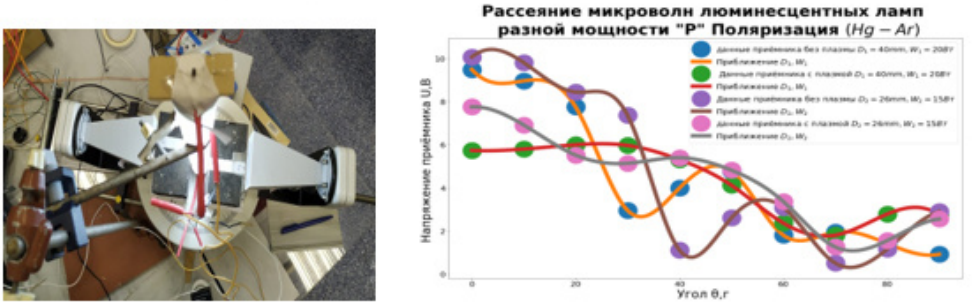


Рис. 2. Полученные результаты на установке:

а — угловая зависимость рассеяния микроволн с плазмой (верхние кривые) и без плазмы (нижние кривые) для двух взаимно-перпендикулярных направлений диагностики; *б* — диаграмма поляризации излучателя установки

Для отработки диагностики использовалось несколько объектов. Металлические цилиндры диаметром соответственно 8,3 и 6,0 см, а также стандартные люминесцентные трубки диаметром, соответственно, 4,0 и 2,6 см и мощностью 20 и 15 Вт .

Здесь использовался разряд переменного тока частотой 50 Гц в парах ртути (Hg) и инертного газа (Ar). При этом параметры плазмы находятся для температуры электронов порядка 4 эв и концентрации электронов $\sim 10^{13}$ см$^{-3}$. Отработка методики была упрощена за счет использования стандартных люминесцентных трубок (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Использование методики исследования параметров плазмы: а — установка «Плазма 4» с люминесцентной трубкой; б — угловая зависимость рассеяния микроволн для трубок диаметром 4,0 см (с плазмой и без нее, верхние кривые) и 2,6 см (с плазмой и без нее, нижние кривые)

Несмотря на то, что в люминесцентных трубках разряд происходит на переменном токе, но за счет того, что измерения проводятся в стационарном режиме, имело место усреднение рассеяния по времени.

В работе проведено исследование цилиндрического He–Ne плазменного образования в диапазоне удельных мощностей (32...50) Вт/с$^{-3}$. Для правильной интерпретации полученных результатов рассмотрены случаи рассеяния микроволн в дифракционном и геометро-оптическом приближениях.

Показано что для данного частотного диапазона правильной моделью полученных результатов является модель дифракционного приближения.

Полученные результаты позволяют использовать данную методику исследования параметров плазмы, в частности градиентов концентрации на аналогичных плазменных образованиях.

На основе этих данных модернизирована лабораторная работа по СВЧ-диагностике плазменных образований [3].

Все это позволяет повысить уровень компетенции студентов и эффективность усвоения материалов спецкурсов по физике плазмы, а результаты будут полезны при проведении научно исследовательских работ в области разработки и совершенствования плазменных установок в различных областях науки и техники.

Литература

[1] Белозор Д.А., Козырев А.В., Ланцов А.В. Лабораторный практикум по изучению стратификации магнитоактивной водородной плазмы. Современный физический практикум, 2016, № 14, с. 191–193.

[2] Козырев А.В., Шибаева А.Д. Лабораторная работа «Зондовый метод диагностики плазмы». Физическое образование в вузах, 2021, т. 27, № 1, с. 41–49.

[3] Козырев А.В., Анфимов Д.Р., Басак А. Лабораторная работа по рассеянию микроволн на цилиндрическом He–Ne плазменном образовании. Физическое образование в вузах, 2021, т. 27, № 1. с. 50–59.

[4] Белозор Д.А., Козырев А.В. Экспериментальное исследование амбиполярной диффузии магнитоактивной стратифицированной плазмы. IX Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике»: сб. трудов. Ч. 1. Москва, 2017, с. 145–147.

[5] Козырев А.В., Ланцов А.В. Исследование газоразрядной стратифицированной плазмы с использованием среды Phywe Measure. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 3 (39). DOI: https://doi.org/10.18698/2308-6033-2015-3-1381

[6] Козырев А.В., Анфимов Д.Р., Басак А. Микроволновая диагностика цилиндрического He–Ne-плазменного образования. XI Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике»: сб. трудов. В 2-х т. Т. 1. Москва, 2021, с. 93–96.

УДК 37.01

Мышление и когнитивное познание

Купавцев Анатолий Владимирович avkup@bk.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены три ипостаси существования человека: естественно-научный материальный мир, одушевленным объектом которого он является, биологическая форма жизни одушевленного субъекта-индивида, отличающаяся наличием высокоорганизованной материи — человеческого мозга, и социум совместного труда, общения и этикокультурного общежития людей. Показано, что диалектико-материалистическое познание разделяется на две подсистемы: общефилософских категорий, распространяющихся на области природы, общества, познания, и логико-гносеологических, которые характеризуют форму знания и выражают специфику познавательного и практического взаимодействия субъекта и объекта. Поэтому в продукте деятельности запечатлевается не образ, а именно деятельность, то предметное содержание, которое она объективно несет в себе. Показано, что познавательная деятельность, обогащаясь за счет проявления общественных связей и отношений в предметном мире, кристаллизуется в своем продукте, выступает в координатах внешнего мира как явление сознания.

Ключевые слова: *познание, диалектическое отражение мира, картина мира, роль и место мышления в познании, деятельность и мышление*

На заре развития человеческой расы мир воспринимался первобытными людьми исключительно перцепцивно, т.е. непосредственное, натуральное, восприятие внешнего мира органами чувств человека. Он довольствовался теми плодами и возможностями, которые предоставляла ему Природа. Движения и взаимодействия с объектами предметного мира, которые мог осуществлять человек, полностью определялись и происходили в непосредственной данности этих объектов. Такая деятельность человека имеет несколько названий: *предметная*, *практическая, материальная.* Все они означают независимое, как бы внешнее, существование природных предметов от присутствия человека, его желаний, воли и т. п. Человек может в определенной степени вмешиваться в происходящие в окружающем мире процессы, если не будет нарушать законов материального мира. На этой стадии человек полностью сливается с внешним по отношению к нему миром, не отделим от него, находится в нем.

Исторически предметная деятельность явилась первичным, донаучным, этапом гносеологии. В повседневном труде, в работе с орудиями труда и приспособлениям люди от поколения к поколению передавали опыт деятельности, а с нею ценностную информацию, совершенствовали свой труд и себя. Было положено начало новому виду деятельности — теоретическому, особенность которого состоит в возможности предсказывать новые виды *предметно-практической* деятельности, прошедшей социальное апробирование, как деятельность коллективная, совместная, социально-функционирующая. Виды деятельности, получившие подтверждение в общественной практике, закрепляются в общественном социально-историческом опыте [1]. Общественно подтвержденный опыт деятельности приобретает значение эталонов, познавательных «единиц», которые «квантуют» соответствующие стороны действительно-

сти. Познание выражает собой единство диалектического отражения материального мира, социально-опосредованной исторически-развивающейся коллективной предметно-практической практики и коммуникации (общения) всех участников познавательного отношения [2, с. 306].

Окружающий мир человек обнаруживает через органы чувств. Отражение — свойство материального мира. Понятие «отражение» включает весь спектр «реагирования» как простейших, так и высших отражательных систем, включая различные изменения объектов неживой природы при их взаимодействии, раздражимость простейших одноклеточных, вплоть до высших форм человеческого общения и познания.

Особой формой отражения жизнедеятельности человека является *психика* — онтогенетически иисторически развивающийся аспект взаимодействия индивида с предметным миром и обществом людей, заключающийся в восприятии объективной действительности посредством сформировавшихся у человека нервной системы и ее высшего отдела — *головного мозга*, как регулятора этого процесса взаимодействия человека с окружающим миром. Психика не относится к физиологическим процессам, которые имеют чисто физическое объяснение. Поэтому непосредственно возникнуть, зародиться психическое не может внутри физических, химических, технических и т.п. процессов. Психика человека развивается под влиянием внутренних условий биологического психофизиологического развития человеческого организма и становления социального общения (коммуникации) в совместном труде людей. Поэтому само по себе психическое развитие и формирование психики человека может быть только живым непрерывным континуально-генетическим недизъюнктивным процессом.

Субъективный мир сознания, как психическая реальность, которая непосредственно открывается субъекту, не является хранилищем и не вызывает непосредственного возникновения в мозгу человека субъективных образов предметов. Преобразование внешнего, мира во внутренний, умственный план сознания совершается в процессе *интериоризации*. А.Н. Леонтьев раскрыл деятельностную природу процесса интериоризации и объяснил познавательную роль сознания, предложив трехкомпонентную схему преобразования окружающего мира в объекты сознания, в центре которой феномен деятельности человека: *субъект-деятельность-объект*. Интериоризация заключается в *формировании* человекомвнутреннего умственного плана сознания в процессе деятельности [3, с. 74]. Внешний чувственно-практический мир не перемещается вовсе в план сознания, а открывается человеку как субъективный идеальный образ, являющимся продуктом деятельности с объектом, изначально относящимся к внешнему миру. Психический образ с самого начала относится к внешней по отношению к головному мозгу реальности и поэтому нет в сознании раздвоения: перед человеком окружающий мир, а не мир и картина мира [3, с. 97].

Фундаментальным принципом диалектического отражения материального мира является принцип творческой активности субъекта в процессе познания действительности посредством практической деятельности. Поэтому в продукте деятельности «запечатлевается не образ, а именно деятельность, то предметное содержание, которое она объективно несет в себе» [3, с. 96]. Вступая в прямое соприкосновение с предметной действительностью и подчиняясь ей, деятельность индивидов видоизменяется, обогащается за счет проявления общественных связей и отношений в предметном мире, что составляет реальный момент в движении деятельности, которая, кристаллизуясь в своем продукте, выступает для индивидов как явления сознания, «как существующие вне нас, вне нашей субъективности — в координатах внешнего мира» [3, с. 100].

Активность субъекта проявляется на рациональной ступени познания, на которой открывается возможность использовать специфические когнитивные (мыслительные) действия: абстрагирование, идеализация, выдвижение гипотез, создание понятий, теорий, — добиваясь более адекватного отражения действительности. В диалектическом отражении Природы человеком признается творческая роль разума в процессе познания при детерминирующем значении объективной действительности.

Система диалектико-материалистических категорий познания разделяется на две подсистемы: систему общефилософских категорий, которые распространяются на области природы, общества, познания (материя, движение, причинность, необходимость, случайность и т. д.) и на подсистему логико-гносеологических категорий, которые характеризуют не содержание, а форму знания и выражают специфику познавательной деятельности как особого фрагмента действительности (образ, знание, гипотеза, модель, теория, доказательство, умозаключение и др.) — области познавательного и практического взаимодействия субъекта и объекта. Эта вторая подсистема логико-гносеологических категорий образует теорию познания в узком (собственном) смысле.

Благодаря появлению у человека второй сигнальной системы (речи) и превращению его труда в общественно-производственную деятельность, мышление превратилось в когнитивное познание, областью непосредственного функционирования которого является не наличное бытие, а сознание — бытие отраженное, рефлектированное. Материальным субстратом, психофизиологической основой мышления являются *функциональные системы* головного мозга, которые представляют собой сложные динамические образования, опирающихся на совместную работу отдельных — иногда территориально далеко друг от друга расположенных — участков мозга, каждый из которых выполняет свою специфическую роль, внося в работу всей функциональной системы свой вклад. Динамические структуры различных зон головного мозга могут изменяться по мере формирования иной психической деятельности.

Каждая функциональная система обладает определенным набором афферентных, т. е. идущих с разных участков мозга, сигналов. Сигналы образуют афферентное поле, которое и обеспечивает нормальную работу функциональной системы. Афферентные поля закладываются в онтогенезе человека, и их развитие идет по пути сужения круга афферентаций, выделения «ведущей» и ухода остальных в резервный фонд. При этом афферентации не исчезают, но переходят в латентное (скрытое) состояние» и могут активироваться при востребовании. Так могут видоизменяться и даже формироваться новые функциональные системы головного мозга. По мере развития высших психических функций функциональные системы превращаются в единые функциональные органы, а кора головного мозга становится органом, способным формировать *новообразования* в процессе индивидуального онтогенеза, которые представляют собой материальный субстрат тех специфических способностей и функций, которые формируются в ходе овладения научными знаниями [4]. Это — процесс формирования новой мысленной репрезентации в ходе сложного взаимодействия мыслительных атрибутов суждения, абстрагирования, воображения и решения задач. По своей природе оно когнитивно, то есть происходит «внутренне», в уме, но о нем судят по *внешнему* [5, с. 333]:

1. Мышление есть внутренний процесс, в ходе которого происходит преобразование информации; мышление может быть направленным и вести к решению задачи, а на структурном уровне приводить к образованию новой мысленной репрезентации.

2. Когнитивное формирование понятий включает выделение признаков, общих для некоторого класса объектов, и раскрытие правил, связывающих эти концептуальные признаки. Для этого процесса важны такие виды когнитивной деятельности, как усвоение правил, ассоциирование и проверка гипотез.
3. Стратегии формулирования и проверки гипотез включают сканирование и процедуры сосредоточения, причем процедуры сосредоточения (близкие научным процедурам) более эффективны, чем сканирование.
4. Изучение дедуктивного рассуждения показывает, что на выводы в силлогистических задачах оказывает влияние форма предъявления (зрительная или вербальная), количество вариантов, генерируемых из посылок, форма аргументации (положительная или отрицательная), знания в долговременной памяти, связанные с решаемой задачей, и уровень интеллекта и образования решающего.
5. Выводы индуктивного рассуждения часто имеют вид вероятностных утверждений и лучше соответствуют повседневному принятию решений, чем силлогистическое или дедуктивное рассуждение.

Литература

[1] Купавцев А.В. Деятельностная альтернатива в образовании. Педагогика, 2005, № 10, с. 27–33.

[2] Лекторский В.А. Субъект. Объект. Познание. Москва, Наука, 1980, 352 с.

[3] Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. Москва, Смысл, 2004, 352 с.

[4] Цветкова А. Психологические возможности человека и проблемы обучения. Коммунист, 1986, № 11, с. 49-58.

[5] Солсо Р. Когнитивная психология. Санкт-Петербург, Питер, 2006, 589 с.

УДК 537.622.4

Применение графических методов в определении критической напряженности магнитного поля у ферромагнетиков

Лукашевич Светлана Анатольевна lukashevich@gsu.by
ГГУ им Ф. Скорины

Рассмотрены основные физические свойства ферромагнитных материалов по снятию кривой намагничивания, которая была получена с помощью баллистического гальнометра, также получена петля гистерезиса с помощью осциллографа. Одновременно в лабораторном практикуме особо обращено внимание на получение зависимости магнитной индукции от напряженности, построению петли гистерезиса, нахождению полной магнитной проницаемости на основе максимальных индукции и напряженности с помощью ферротестера. На основании всех экспериментов по изучению свойств ферромагнетиков сделан вывод, что существенным является прибор ферротестер, с помощью которого изучены все основные свойства ферромагнетиков.

Ключевые слова: *напряженность, магнитная индукция, намагниченность, магнитная проницаемость, графический метод*

Среди магнитных материалов особый интерес представляют вещества, у которых магнитная проницаемость достигает больших значений и зависит от внешнего магнитного поля, а также предшествующей истории. Такие вещества называются ферромагнетиками. Кроме того, эти вещества обладают остаточной намагниченностью, т. е. намагниченность может быть отлична от нуля, если внешнее магнитное поле существует. Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость индукции $\vec{B}$ и намагниченности $\vec{J}$ от напряженности магнитного поля $\vec{H}$ [1].

Основным методом изучения свойств ферромагнетиков является лабораторный практикум по разделу «Электричество и магнетизм» курса общей физики, на котором особое внимание уделяется снятию кривой намагничивания $B = f(H)$ (рис. 1).

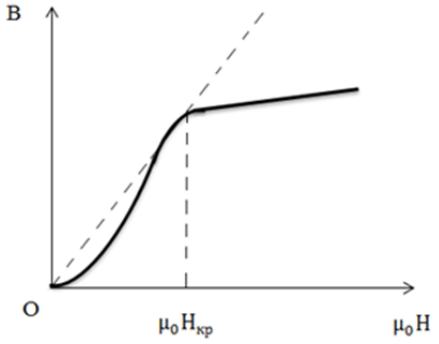


Рис. 1. Зависимость индукции ферромагнетика от напряженности поля H

Такая кривая может быть построена с помощью баллистического гальванометра или в результате соединения вершин петель гистерезиса, которые получены на экране осциллографа [2, 3]. Кривая намагничивания является основой для построения графика зависимости относительной магнитной проницаемости ферромагнетика μ_2 от напряженности магнитного поля H, называемая кривой Столетова.

Важной характеристикой ферромагнетиков является кривая магнитной проницаемости [4]:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = 1 + \frac{J}{\mu_0 H}, \quad (1)$$

которая представлена на рис. 2. Характерное поведение относительной магнитный проницаемости объясняется нелинейной зависимостью намагниченности J от напряженности магнитного поля H.

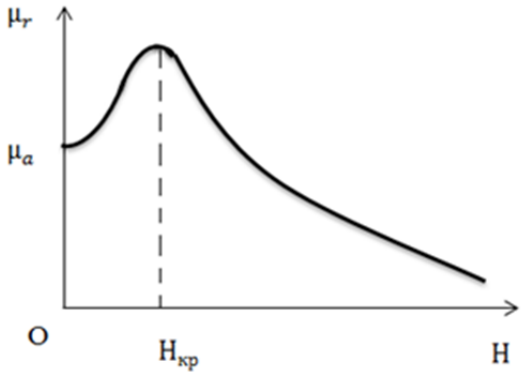


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости μ2 от напряженности поля (кривая Столетова)

При малых значениях H намагниченность быстро растет, а магнитная проницаемость увеличивается. B то же время с увеличением напряженности рост намагниченности замедляется и μ_r, достигнув максимального значения при критической напряженности $H_{кр}$, начинает монотонно убывать. При переходе ферромагнетика в состояние насыщения намагниченности относительная магнитная проницаемость стремится к единице по гиперболическому закону:

$$\mu_r = 1 + \frac{const}{H}.$$

Отсюда следует, что применение ферромагнетиков при больших значениях μ_r возможно только при напряженностях магнитного поля, близких к критическому значению H, т. е. когда материал не находится в состоянии насыщения намагниченности.

Обычно критическая напряженность магнитного поля $H_{кр}$ определяется на основе построения графика функции $\mu_r = f(H)$ с помощью формулы (1) и предварительно снятой зависимости индукции ферроагнетика от напряженности магнитного поля.

Однако, кроме этого, существует еще один способ определения $H_{кр}$ на основе графика функции $B = f(H)$ (или $J = f(H)$).

В этом случае отпадает необходимость определения относительной магнитной проницаемости в достаточно большом интервале напряженностей магнитного поля для нахождения значения μ_r.

Метод определения состоит из условия экстремума

$$\frac{d\mu_r}{d(\mu_0 H)} = 0$$

и выражения (1), на основе которого можно получить соотношения

$$\frac{J}{(\mu_0 H)} = \frac{dJ}{d(\mu_0 H)}; \frac{B}{(\mu_0 H)} = \frac{dB}{d(\mu_0 H)}.$$

Из этих выражений следует, что в точке, соответствующей $H_{\text{кр}}$, касательные к кривым $J(\mu_0 H)$ и $B(\mu_0 H)$ проходят через начало координат (см. рис. 1).

Кроме названных методов [2, 3] в лабораторном практикуме для исследования магнитных свойств ферромагнетиков применялся ферротестер — прибор для быстрого измерения материалов. С помощью прибора исследуются и измеряются кривые намагничивания, магнитная насыщенность, остаточная индукция, коэрцитивная сила, потеря, проницаемость ферромагнитных материалов. Также отметили, что гистерезис в сильнейшей степени зависит от состава ферромагнетика и его обработки. Для чистого «мягкого» железа, т. е. отожженного и затем медленно охлажденного гистерезис выражен весьма слабо и петля гистерезиса очень узкая. Но для закаленной стали гистерезис значителен.

При работе с ферротестером применялись различные образцы ферромагнитных материалов в виде стальных спиц, которые вставлялись в измерительное отверстие измерительной катушки. При этом исследовались и изменялись кривые намагничивания, магнитная насыщенность, остаточный магнетизм, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, потеря. Все испытания проводились при силе тока возбуждения частотой 50 Гц.

С помощью ферротестера можно проводить два разных измерения проницаемости, а именно полной проницаемости и измерение так называемой дифференциальной проницаемости.

Величина полной проницаемости получается таким образом, что при заданном намагничивании измеряются величины $B_{\text{мах}}$ и $H_{\text{мах}}$ (рис. 3) и образуется производная двух величин, значит:

$$\mu_r = \frac{B_{MAX}}{H_{MAX}} + 1 \approx \frac{B_{MAX}}{H_{MAX}}. \quad (2)$$

В выражении (2) величина производной $\frac{B_{MAX}}{H_{MAX}}$ на несколько порядков больше, чем единица, и поэтому она обеспечивает вполне достаточную точность для практики, если пренебречь единицей.

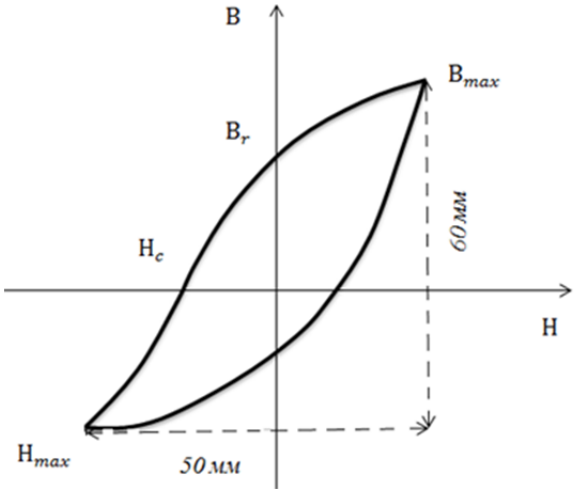


Рис. 3. Петля гистерезиса ферромагнетика

В заключение отметим, что для исследования физических свойств ферромагнетиков, наиболее эффективным прибором является ферротестер, в комплект которого входят различные измерительные катушки, предназначенные для испытания магнитных материалов, для испытания коротких ферромагнитных образцов малого сечения, для испытания кольцеобразных магнитных материалов.

Литература

[1] Савельев И.В. Курс физики. Т. 2. Москва, Наука, 1989, 273 с.
[2] Гольдин Л.Л., ред. Лабораторные занятия по физике. Москва, Наука, 1983, с. 352–365.
[3] Кембровский Г.С., ред. Физический практикум. Минск, Высшая школа, 1986, с. 225–233.
[4] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. Москва, Наука, 1977, 688 с.

УДК 378.147

Организация учебного процесса по физике в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники

Окс Ефим Михайлович bull56@mail.ru
ТУСУР

На примере Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники обобщен опыт организации и проведения учебного процесса по курсу дисциплины «Физика» для студентов, обучающихся по инженерно-техническим направлениям университета. Рассмотрены особенности формирования рабочих программ по курсу дисциплины «Физика» и распределения учебных часов по видам занятий. Описан комплекс мероприятий, способствующий и стимулирующий студентов к усвоению этой важной дисциплины с сохранением контингента студентов.

Ключевые слова: *учебный процесс, физика, организационная структура, технический университет, комплекс мероприятий*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) — один из передовых отечественных технических университетов, специализирующийся в подготовке специалистов всех уровней обучения в областях радиотехники, электронной и вычислительной техники, программирования, автоматики и систем управления, информационных технологий, информационной безопасности и инноватики. ТУСУР — победитель конкурса по поддержке программ стратегического развития университетов «Приоритет 2030» и программы «Передовые инженерные школы» в области электронного приборостроения и систем связи. Некоторые аспекты преподавания физики для студентов ТУСУР отражены в [1–4].

Как и для любого технического высшего учебного заведения курс по дисциплине «Физика» вместе с высшей дисциплиной «Математика» представляют собой основу для успешного усвоения специальных дисциплин. Проблемы организации учебного процесса по курсу дисциплины «Физика» для студентов технических специальностей напрямую связаны с обучением по дисциплине «Физика» будущих абитуриентов в школе. Объем учебной нагрузки в школе по дициплине «Физика» недостаточен в качестве начальной базы для усвоения университетского курса. Кроме того, отсутствие обязательного ЕГЭ по дисциплине «Физика» существенно сокращает количество выпускников школ, выбирающих физику в качестве ЕГЭ. Именно поэтому во многих периферийных технических вузах ЕГЭ по физике может по выбору абитуриента быть заменен на информатику, интерес к которой у нынешних школьников несравненно выше. Как это ни парадоксально, но переход к так называемой Болонской системе и соответствующее сокращение срока обучения для получения первой степени высшего образования (бакалавра) привели к непропорциональному, намного более серьезному сокращению естественно-научных дисциплин, главным образом физики и математики. Так, сегодня в университете для технических направлений бакалавриата дисциплина «Физика» изучается в первых двух семестрах с объемом «звонковой» нагрузки в каждом семестре 98 часов, из них 48 часов — лекции, 26 часов — практические занятия и 24 часа — лабораторный практикум. В «до Болонские времена» этих часов было в два раза больше, и уровень подготовки абитуриентов по дисциплине «Физика» был несравнимо более высоким.

Для повышения качества подготовки студентов по курсу дисциплины «Физика» в университете в той или иной мере для каждого направления подготовки реализуется ряд мероприятий:

- сдвиг начала обучения по курсу дисциплины «Физика» на второй семестр и введение в учебный план первого семестра выравнивающего курса дисциплины «Физика», основанного на школьной программе;
- унификация рабочих программ по курсу дисциплины «Физика», делающее их количество предельно минимальным;
- раздельное обучение студентов с разным уровнем входных знаний и компетенций;
- организацию самостоятельной работы студента в учебной аудитории с присутствием преподавателя-консультанта;
- помощь «тьюторов» — студентов старших курсов;
- использование рейтинговой системы контроля знаний, стимулирующей студента активно работать в течение всего семестра и набирать баллы для получения зачетной оценки без сдачи экзамена.

Вышеуказанный комплекс мероприятий позволил снизить уровень неудовлетворительных оценок по курсу дисциплины «Физика» и в определенной степени обеспечил сохранение контингента студентов, которые, как правило «умнеют» и начинают что-то действительно понимать только на старших курсах. Но принципиально это не может решить проблему качественной подготовки по курсу дисциплины «Физика» студентов инженерного направления подготовки.

Для успешного развития отечественного промышленного производства и вывода его на мировой уровень необходима подготовка высококвалифицированных инженерных кадров. Начинать следует со школы. Представляется целесообразным введение обязательного ЕГЭ по курсу дисциплины «Физика» для выпускников и отказ от разделения ЕГЭ по дисциплине «Математика» на два уровня. Здесь необходимо оставить один более высокий уровень. И, несомненно, следует пересмотреть объем учебных часов по курсу дисциплины «Физика» в вузе в сторону его увеличения и повышения интенсивности при одновременной трансформации процесса преподавания учебного курса по дисциплине «Физика», делая его более привлекательным и интересным.

Литература

[1] Окс Е.М., Лячин А.В., Воеводина О.В. Анализ результатов проведения эксперимента по дифференцированному подходу к изучению дисциплины «Физика». Современное образование: повышение конкурентоспособности университетов: сб. материалов Международной научно-методической конференции. Томск, 28–29 января 2021 г., ТУСУР. Томск, Изд-во ТУСУР, 2021, с. 199–203.

[2] Воеводина О.В. Использование в учебном процессе социоигровой методики обучения. Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: сб. материалов международной научно-методической конференции. Томск, 29–30 января 2015 г., ТУСУР. Томск, Изд-во ТУСУР, 2015, с. 269–270

[3] Воеводина О.В., Окс Е.М. Проблемы проблемно-ориентированных технологий в преподавании физики и концепций современного естествознания. Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики: сб. материалов Международной научно-методической конференции. Томск, 30–31 января 2020 г., ТУСУР. Томск, Изд-во ТУСУР, 2020, с. 58–59.

[4] Воеводина О.В., Окс Е.М. Использование образовательной технологии Flipped Learning на кафедре физики ТУСУРа. Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти: сб. материалов Международной научно-методической конференции. Томск, 27-28 января 2022 г., ТУСУР. Томск, Изд-во ТУСУР, 2022, с. 226–234.

УДК 378.33

Ключевые аспекты обучения химии студентов с нарушением слуха в инклюзивных программах инженерного образования

Орешкина Ольга Алексеевна Olga_Oreshkina@yahoo.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Шаповал Валентин Николаевич valentinshapoval@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрен опыт МГТУ им. Н.Э. Баумана по обучению химии студентов с нарушением слуха в адаптированных (инклюзивных) программах. Ключевой потребностью этих студентов в вузе общего типа с вербальной формой преподавания является содержательная доступность дисциплин фундаментальной инженерии, включая химию. Предложены решения, формирующие безбарьерную среду в учебном процессе изучения дисциплины «Химия» и способствующие его содержательной доступности, т. е. ясности и понятности смыслового содержания курса химии для таких обучающихся.

Ключевые слова: *студенты с нарушением слуха, инклюзивные программы, универсальный дизайн для обучения, цифровая среда, доступность образовательной среды*

МГТУ им. Н.Э. Баумана является первым российским вузом общего типа, в котором с 1934 г в инклюзивных условиях обучаются студенты с нарушением слуха: глухие и слабослышащие. Они являются одной из самых тяжелых категорий обучающихся с инвалидностью в вузе общего типа. Первичное отклонение в развитии (дефект слуха) приводит к вторичным отклонениям (речь), существенно нарушающим процесс взаимодействия этих студентов с образовательным социумом. Ведущим каналом восприятия в процессе образовательной деятельности у этого контингента является зрение [1].

Исходя из особенностей и видов когнитивных ограничений при нарушениях слуха различной выраженности, обучение этой категории студентов в общем потоке не может соответствовать их возможностям и полностью совпадать по срокам, методам и формам обучения, обозначенных в основных профессиональных образовательных программах. Их обучение в МГТУ им. Н.Э. Баумана происходит по инклюзивным программам (ИП) бакалавриата, срок освоения которых увеличен на 1 год и составляет 5 лет. «Бауманская модель» реализации ИП отвечает социальной модели понимания инвалидности в профессиональном образовании и включает сочетание принципов универсального дизайна для процесса обучения (UDL), ассистивных (AT) и когнитивных технологий обучения (КТО) на основе учета индивидуальных когнитивных особенностей и ограничений студентов [2]. Принципы UDL связывают барьеры в обучении с дизайном среды, а не с обучающимся и направляют процесс обучения на удовлетворение потребностей всех обучающихся в доступности учебного содержания. Доступность рассматривается с точки зрения минимизации физических, организационных и когнитивных барьеров в обучении, что является центральной идеей бауманских подходов к реализации ИП.

Цель исследования — разработка эффективных способов обеспечения доступности учебного контента по химии с учетом принципов UDL для студентов с нарушением слуха — субъектов ИП на основе учета их индивидуальных образовательных особенностей и потребностей.

Эффективная реализация ИП возможна только на основе комплексной диагностики специальных потребностей студентов на этапе зачисления на ИП. На основании ее результатов формируется индивидуализированный подход к обучению каждого студента с обеспечением системного воздействия на выявленные у него отклонения. ИП реализуются в специальных условиях обучения, без которых невозможно или затруднено их освоение обучающимися с ограниченными возможностями здоровья (нарушениями слуха) на всех этапах обучения. Специальные условия создают доступную среду и включают модификацию учебных планов и программ, специальную цифровую организацию аудиторий и академическую поддержку учебного процесса. Так, организационно-педагогические особенности преподавания курса химии для студентов с нарушением слуха в ИП заключаются в следующем [3, 4]:

- изменение срока освоения основной образовательной программы по курсу «Химии», структуры и видов занятий: срок ее освоения этими студентами при том же содержании и количестве выделенных часов (144 часа — 4 зачетных единицы) составляет два семестра вместо одного для обычных студентов;
- лекционные занятия для таких студентов наполовину сокращены в часах с заменой их на семинары. В оставшиеся часы проводятся обзорные лекции по тематике модулей;
- введение дополнительного адаптивного курса «Когнитивные технологии сопровождения дисциплины «Химия» (далее — «КТСД Химия»), в объеме 144 часов – 4-х зачетных единиц с направленностью на индивидуализированное обучение химии с применением ряда КТО;
- адаптация учебных материалов и фондов оценочных средств по дисциплинам «Химия» и «КТСД Химия»;
- для повышения эффективности контроля знаний этих студентов содержание дисциплины «Химия» в программе структурировано на 6 модулей, по 3 модуля в каждом семестре, тогда как для обычных студентов — на 3 модуля.

Доступность образовательных ресурсов по химии обеспечивает специальная цифровая организация образовательной среды — ее цифровая трансформация. Лекции и семинары по химии проводятся в аудиториях, оборудованных современными средствами коммуникации (FM-системы, аудиоколонки) и мультимедийными программно-аппаратными комплексами: электронной доской, проектором, плазменной панелью, персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть с доступом к сети Интернет, веб-камерами и др.

Лабораторные работы проводятся в химической лаборатории, оснащенной компьютером преподавателя с доступом к Интернет, проектором и большим экраном для вывода информации. Лекции и лабораторные работы поддерживаются сурдопереводом. Такая цифровая организация аудиторий обеспечивает программно-аппаратную поддержку как студентов, так и преподавателей. Последние имеют возможность предоставлять студентам учебный контент разными способами согласно принципам UDL (текстовые и графические учебно-методические материалы для самостоятельной работы, доступные на интернет-сайтах, презентации в PowerPoint и PDF, видеоматериалы с субтитрами), разрабатывать и внедрять в учебный процесс различные КТО для его освоения. Студенты имеют возможность воспринимать учебную информацию в соответствии со своими индивидуальными предпочтениями. Для студентов с нарушением слуха цифровая трансформируемая среда обеспечивает повышенную доступность образовательно-информационных ресурсов.

Принципы UDL, которыми руководствуются преподаватели химии-субъекты ИП при разработке содержательно доступных учебных материалов для студентов, методик и технологий преподавания/обучения, включают:

- учет индивидуальных когнитивных особенностей и способностей студентов, их предыдущего учебного опыта и базовых знаний;
- множественность форм представления учебного материала студентам (настраиваемые учебный текст, аудио-, видеоконтент с субтитрами, сурдоперевод);
- множественность способов взаимодействия со студентами (письменная и/или звучная речь, печатный текст, сурдоперевод, перевод речи в текст);
- множественность способов вовлечения студентов в учебный процесс и их мотивации к освоению дисциплин;
- системную поддержку обучения, включая применение КТО, для повышения возможностей всех обучающихся и др.

В совокупности указанные решения формируют безбарьерную среду в учебном процессе по химии и способствуют его содержательной доступности, т. е., ясности и понятности смыслового содержания курса химии для обучающихся. Этому во многом способствует введение дополнительного когнитивно-технологического сопровождающего курса химии (КТСД Химии). Преподавание последнего обеспечивает индивидуализированную коррекцию нарушений учебных и коммуникативных умений, профессиональную и социальную адаптацию студентов с инвалидностью по слуху на этапе высшего образования и в этой связи является одновременно способом их вовлечения в учебный процесс и его академической поддержки. Курсы КТСД реализуются только в ИП.

Основная задача КТО заключается в формировании у обучающихся способности конвертировать доступную информацию в полезные знания. Исследования в области когнитивной науки показали, что это — активный процесс. Формирование в будущих инженерах знаний, доступных для применения, принятия решений, создания новых технологий и продуктов зависит не только от навыков восприятия информации, но и от активных навыков ее обработки, таких как актуализация информации, активное запоминание, интеграция новой информации с предшествующими знаниями.

Реализация принципов UDL в цифровой трансформируемой образовательной среде, оснащенной ассистивными техническими и сурдотехническими средствами и технологиями, делает ее мультимодальной, способной удовлетворять индивидуальные когнитивные потребности не только студентов с нарушением слуха, но и обычных студентов. Создание такой среды обучения является ответственностью любого образовательного учреждения, обучающего студентов с особыми когнитивными потребностями в ИП.

Литература

[1] Oreshkina O.A., Aslamazova V.I. Specifics of developing and implementing remote classes in chemistry with hearing impaired students at a technical university of a general type. Proceedings of the 2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON 2021). April 21–23, 2021, Vienna, Austria. IEEE, 2021, pp. 244-251, art. no. 9454033.
URL: https://ieeexplore.ieee.org/ stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9454033&tag=1
(дата обращения 09.09.2022). DOI: https://doi.org/10.1109/EDUCON46332.2021.9454033

[2] The UDL Guidelines. CAST, Inc. URL: https://udlguidelines.cast.org/(дата обращения 12.11.2022).

[3] Станевский А.Г., Храпылина Л.П. Концептуальные подходы к проектированию ключевых направлений организации обучения лиц с нарушением слуха по программам бакалавриата (на примере направления «Инженерное дело, технологии и технические науки». Психологическая наука и образование, 2017, т. 22, № 2, с. 87–96. DOI: https://doi.org/10.17759/pse.2017220208

[4] Орешкина О.А., Слитиков П.В. Сравнительный анализ подходов к обучению студентов с нарушением слуха и нормативных студентов химии в техническом вузе. Высшее образование в России, 2020, т. 29, № 6, с. 92−101. DOI: https://doi.org/10.31992/0869-3617-2020-6-92-101

УДК 001:53

Участие кафедры «Физика» в мероприятии «Ночь в музее» в техническом университете

Пауткина Анна Владимировна pautkinaannav@mail.ru
РУТ (МИИТ)

Кокин Сергей Михайлович kokin2@mail.ru
РУТ (МИИТ)

Андреев Александр Иванович andreew_ai@mail.ru
РУТ (МИИТ)

Рассмотрен опыт участия кафедры «Физика» Российского университета транспорта (МИИТ) в проведении общегородской акции «Ночь в музее - 2022». Приведен перечень демонстраций, вызвавший наибольший интерес у посетителей. Обсуждены целевая аудитория и критерии выбора демонстраций. Отмечено, что в будущем повысить эффективность мероприятия можно переносом его открытия с позднего вечера на более раннее время.

Ключевые слова: *«Ночь в музее», неординарная программа, привлечение будущих студентов, демонстрационное шоу, банк лекционных демонстраций кафедры, эксперименты с жидким азотом, физические опыты*

«Ночь музеев», «Ночь в музее» или даже «Ночь искусств» — мероприятие (фестиваль, акция), которое проводится в Москве уже несколько лет. Оно приурочено к Международному дню музеев, который был учрежден в 1977 г. по инициативе советской делегации на конференции Международного совета музеев (International Council of Museums), проходившей в Москве и Ленинграде. История ночных музейных гуляний, приуроченных к Международному дню музеев, началась в 2001 г. в Париже и стремительно завоевала популярность во всех главных европейских столицах. Сегодня эта дата отмечается более чем в 150 странах (и не только в столицах), в том числе в России. Москва впервые присоединилась к европейским странам в 2007 г., когда в акции «Ночь в музее» приняли участие шесть городских и четыре федеральных музея, продливших свою работу до 21 ч. И если раньше прерогатива проведения данного мероприятия действительно принадлежала только музеям, то в последние годы организаторами стали и центры популярной науки (Экспериментаниум, Политехнический музей), и даже различные организации (например, Минтранс), а также учебные заведения самых разных направлений, имеющие музеи. Организуются лекции, семинары, выставки, исторические реконструкции, театрализованные шоу, аудиоэкскурсии и др.

Главной целью акции является возможность привлечь и заинтересовать посетителей яркими, неординарными программами, привлекающими внимание прежде всего к ценностям и возможностям своего учреждения. А у учебных учреждений есть еще и заинтересованность в привлечении будущих студентов.

Впервые данное мероприятие было проведено и в Российском университете транспорта (МИИТ) 21 мая 2022 г. Гостям университета был предложен маршрут, следуя которому, они смогли посетить музей РУТ (МИИТ), а также ряд лабораторий с привлекающими внимание экскурсантов техническими комплексами, учебных ауди-

торий с работающим оборудованием и многое другое. Среди кафедр, явившихся организаторами мероприятия, была и кафедра «Физика».

Кафедрой была подготовлена специальная программа, рассчитанная на широкую аудиторию: среди посетителей была молодежь самых разных возрастов, даже дошкольники, сопровождаемые братьями и сестрами, мамами и папами, бабушками и дедушками. Посетители были собраны в группы по 10–15 человек. Демонстрационное шоу для каждой группы занимало 15–20 мин, далее после небольшого перерыва в аудиторию входила следующая группа, а предыдущая следовала дальше по заранее намеченному маршруту. Все мероприятие длилось с семи до одиннадцати часов вечера.

Основой для подготовки выставки физических опытов и демонстраций послужил банк лекционных демонстраций кафедры, который содержит более 200 демонстраций. Критериями выбора являлись: возможность переноса оборудования в выделенное для показа помещение, компактность, наглядность, красота демонстрационной установки. И – простота, ведь в проведении некоторых опытов мы предлагали принять участие самим посетителям.

Вот некоторые из опытов, которые входили в программу показа:

- гироскопический эффект (трехстепенной гироскоп, прецессия гироскопа, в том числе — жесткого диска компьютера);
- влияние низких температур на различные объекты (опыты с сухим льдом и с жидким азотом);
- высокотемпературная сверхпроводимость (сверхпроводящая керамика);
- левитация в магнитном поле (магнитная подвеска, основанная на явлении электромагнитной индукции и на взаимодействии сильных постоянных магнитов);
- работа моторов, использующих энергию света (внутренний фотоэффект);
- тепловое действие лазера (поджигание бумаги);
- электрический разряд в газе (в воздухе);
- демонстрация толстослойных голограмм;
- опыты с газами (образование тумана при адиабатном расширении паров спирта, аквариум с зажженными свечами, заполняемый углекислым газом) и т. д.

Наибольший интерес вызывали эксперименты с жидким азотом (заметим: их проведение требует соблюдения правил техники безопасности, потому ход проведения экспериментов со сжиженным газом, в которых принимали участие посетители, требовал особого контроля).

Успех мероприятия оказался связан, прежде всего, с предоставляемой гостям возможностью «прикоснуться к науке», узнать что-то новое, попробовать самим принять участие в проведении эксперимента. Это характерно не только для акции «Ночь в музее»: у кафедры накоплен многолетний опыт проведения физических семинаров для школьников, на которые вместе с родителями и учителями приезжают на только старшеклассники школ Москвы, но и ближнего Подмосковья (тематические лекции с демонстрацией опытов), а также московских «Университетских суббот» [1–4] (за проведение которых кафедра, в частности, награждена грамотой Департамента образования города Москвы). Все проводимые мероприятия бесплатны, что тоже важно.

Акция «Ночь в музее» проводилась в разных точках города примерно в одни и те же часы, поэтому нельзя сказать, что предложенное время (вечер, причем достаточно поздний) оптимально для всех из них, например, для самых маленьких посетителей, дошкольников, сопровождаемых родителями. Да и для преподавателей-организаторов встречи ночь с субботы на воскресенье — тоже не идеальное время для работы. Понятно, что время проведения выбрано не только в соответствии с названием: для

музеев этот временной интервал действительно важен, поскольку в дневное время в большинстве из них и так очень много посетителей. Но вот для вуза, на наш взгляд, в будущем можно, оставив название, все же перенести мероприятие на более раннее время.

Довольны мы проведенным мероприятием? Да. Как и для артистов, для нас очень важна оценка нашей работы гостями. А гостям было действительно интересно: они были активны, любопытны, разговорчивы. Как следует из полученных отзывов, именно демонстрация физических экспериментов стала одним из наиболее запоминающихся моментов в рамках проведенного в РУТ (МИИТ) мероприятия «Ночь в музее – 2022» .

Литература

[1] Виноградов В.В. и др. Кафедра физики технического университета – школьникам. Москва, МИИТ, 2016, 162 с.

[2] Никитенко В.А., Прунцев А.П., Кокин С.М. Университетские субботы и физические семинары для школьников в Московском государственном университете путей сообщения. Сб. матер. XIII Междунар. науч.-метод. конф. «Физическое образование: проблемы и перспективы развития»: в 2 ч. Ч. 1. Москва, МГПУ, 2014, с. 150–152.

[3] Кокин С.М., Никитенко В.А., Калачев Н.В. Опыт поддержки физического образования в школах кафедрой физики технического университета. Сб. матер. II Междунар. науч.-метод. конф. «Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития»: в 2 ч. Ч. 1. Москва, МПГУ, 2016, с. 128–132.

[4] Пауткина А.В. Комфортное обучение. Сб. матер. Междунар. шк.-сем. «Физика в системе высшего и среднего образования». Москва, Лига-Вент, 2016, с. 203–204.

УДК 378.147

Контролируемая самостоятельная работа обучающихся на занятиях семинарского типа по физике как элемент индивидуальной образовательной траектории

Савина Анастасия Сергеевна savina.a.s@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Богатов Никита Алексеевич nikitabogatov@list.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Пентюхин Егор Игоревич pentyukhin.e.i@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зоткин Александр Павлович zotkin.a.p@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Болдырев Вениамин Станиславович boldyrev.v.s@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Предлагается методика проведения занятий семинарского типа с применением инструментов контролируемой самостоятельной работы. Приводится план построения семинарского занятия с учетом вариативности в зависимости от уровня сложности заданий и формата выполнения (в группах или в одиночку) и специализации или направления подготовки обучающихся. Такой способ построения семинарских занятий может повысить качество усвоения материала обучающимися и улучшить вовлеченность.

Ключевые слова: *контролируемая самостоятельная работа, индивидуальная образовательная траектория, семинарские занятия, практикоориентированность*

В последнее время в сфере высшего образования (не только технического или естественно-научного направления подготовки) намечается стабильный рост бюджетных мест от года к году. Министр науки и высшего образования Российской Федерации Валерий Фальков отмечал, что по поручению Президента России В.В. Путина с 2020 г. в вузах каждый год увеличивается число бюджетных мест [1], причем основная часть мест достается регионам. В 2022 г. в университеты поступили сотни тысяч первокурсников, 588 044 из которых обучаются за счет федерального бюджета. Это на 11 546 мест больше, чем в 2021 г. На следующий 2023/2024 учебный год планируется распределить в вузы 590 156 бюджетных мест.

Несмотря на такой запрос со стороны экономики на кадры технических специальностей, формируется ситуация, при которой растет нагрузка на преподавателей так называемых «общих» кафедр. С учетом активного внедрения в Высшей школе индивидуальной образовательной траектории, необходимо разрабатывать новые методики проведения занятий семинарского типа, поскольку с ростом численности студентов не должно уменьшаться количество времени контактной работы с каждым обучающимся [2–5].

Для решения вышеописанной задачи коллективом авторов настоящей работы была разработана методика проведения контролируемой самостоятельной работы с учетом индивидуальной образовательной траектории на занятиях семинарского типа по курсу общей физики, преподаваемого в РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Занятие делится на две части. Первая часть (вводная) посвящена краткому введению в тему: представление одной или нескольких рабочих формул в рамках изучаемого раздела с небольшими комментариями (при необходимости) о том, какой дополнительный материал может потребоваться для решения задач. Далее преподаватель предлагает алгоритмы решения типовых модельных задач в рамках темы, не доводя задачу до самого конца и предлагая учащимся самостоятельно в качестве разминки вывести общую формулу и подставить числовые значения. Описанные этапы должны занимать примерно половину занятия. Вторая часть занятия посвящена самостоятельной отработке темы под контролем преподавателя. Точный формат этой половины может быть вариативным, и преподавателю следует подстраивать его под уровень навыков конкретной группы с возможностью дополнительных заданий для более активных и успевающих студентов. Производится выдача небольших индивидуальных задач на отдельных билетах с возможностью выбора условия с учетом интереса обучающихся. Но данный выбор является условным. Приведем пример такой задачи из сборника [6]:

Тонкое кольцо радиусом $R = 8$ см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $t = 10$ нКл/м. Какова напряженность E электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние $r = 10$ см?

Такая задача является не столь понятной с практикоорентированной точки зрения для большинства обучающихся на направлении 18.03.01 «Химическая технология». Поэтому на выбор дается следующая задача [6]:

Найти напряженность электрического поля, создаваемого C_5H_5 в молекуле ферроцена в области нахождения Fe^{2+}, если считать, что по C_5H_5 распределен один элементарный заряд как по колечку радиусом R.

Несмотря на то, что такая задача не совсем корректна с точки зрения химии, она дает возможность понять необходимость умения рассчитывать значения напряженности. Данное задание по сравнению с описанным ранее является более практикоорентированным, и вызывает заинтересованность у обучающихся, особенно у тех, кто интересуется органической химией. Но стоит отметить, что представленная задача является по физической сути аналогичной исходной. Таким образом, студент сразу во время обучения может наблюдать взаимосвязь дисциплины с выбранным направлением подготовки, что позволит повысить интерес с изучаемой дисциплине и расширить представление об изучаемом предмете для применения в будущих исследований.

Предложенная методика контролируемой самостоятельной работы студентов является динамичным и гибким инструментом преподавания и способом познания материала в индивидуальном темпе с учетом индивидуальных возможностей учащихся. В соответствии с балльно-рейтинговой системой вуза, такая система может легко вписаться в рейтинг семестра. Каждое задание может отличаться по количеству получаемых обучающимся баллов в зависимости от сложности решения и формата работы. А также такой формат занятий расширяет спектр компетенций, которые можно единовременно осваивать в образовательном процессе даже при ограниченном количестве часов в учебном плане, отводимых на преподаваемую дисциплину.

Литература

[1] В 2023/2024 учебном году количество бюджетных мест в вузах превысит 590 тысяч: сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Сайт Минобрнауки

России. URL: https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka-i-obrazovanie/46361/ (дата обращения 25.01.2022).

[2] Фадеев Г.Н., Стихова А.М., Фадеева С.А., Двуличанская Н.Н. Организация самостоятельной работы студентов в высшем учебном заведении. XII Всероссийская научно-методическая конференция «Актуальные проблемы химического и биологического образования»: сб. материалов. Москва, 22–23 апреля 2022 г. Москва, Московский педагогический государственный университет, 2022, с. 45–48.

[3] Фадеев Г.Н., Стихова А.М., Фадеева С.А., Двуличанская Н.Н. Особенности организации самостоятельной работы студентов по химии в нехимическом вузе. 67-я Всероссийская научно-практическая конференция химиков с международным участием «Актуальные проблемы химического и экологического образования»: сб. научных. Санкт-Петербург, 16–17 апреля 2020 г. Санкт-Петербург, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2021, с. 329–337.

[4] Купавцев А.В. Контролируемая самостоятельная работа — новое явление в образовательной практике высшей школы. Alma Mater (Вестник высшей школы), 2013, № 12, с. 56–61.

[5] Купавцев А.В. Контролируемая самостоятельная работа студентов: первые итоги и перспектива. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 8 (20). DOI: https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-8-877

[6] Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. 4-е изд., перераб. и доп. Москва, Высшая школа, 1981, 496 с.

УДК 556.113

Неочевидная связь между коэффициентами оценочной регрессионной модели скорости звука в жидкой воде с особой точкой минимальной теплоемкости при нормальном давлении

Симонян Григорий Каренович Grisim01@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Приведено построение регрессионной модели оценочного типа в виде квадратичной функции для температурной зависимости скорости звука в жидкой воде при нормальном давлении P = 0,101325 МПа и в температурном диапазоне T= [0...100 °C] по данным эталонных измерений «ВНИИФТРИ» (ГСССД 190–2000). Показано, что соотношение, составленное из коэффициентов регрессионного уравнения, может приводить, с высокой точностью, к численному значению температуры особой точки минимальной теплоемкости жидкой фазы H2O. Задача представляет интерес, с точки зрения выявления возможных связей между температурными шкалами особых точек воды, принадлежащих к разным термодинамическим характеристикам.

Ключевые слова: *скорость звука в воде, особые термодинамические точки воды, аномальные критические точки воды, особая точка максимальной скорости звука, особая точка минимальной теплоемкости, квадратичная регрессия*

Жидкая фаза воды (H_2O) обладает целым рядом аномальных свойств, вызванных особенностями ее трехкомпонентной структуры (мономолекулы, кластеры высокой, HDW, и низкой, LDW, плотности) [1]. Важным проявлением аномальности на макроуровне является отсутствие монотонной зависимости в виде убывания или возрастания термодинамических характеристик воды в диапазоне температур между плавлением и кипением. Это отличает жидкую фазу H_2O от жидких фаз подавляющего большинства известных в природе веществ (к таким же исключениям можно отнести жидкую фазу диоксида кремния SiO_2). Таким образом, все термодинамические характеристики воды (плотность, теплоемкость, вязкость, стеклование, сила сдвига, скорость звука и т. д.) имеют выраженные точки максимумов или минимумов при определенных температурах. Эти точки принято называть аномальными критическими или особыми термодинамическими точками воды. Хорошо известны примеры максимальной плотности при T = 3,98 °C и минимальной теплоемкости при T = 36,79 °C.

Вызывает интерес возможность установления связи особых точек жидкой фазы H_2O друг с другом либо по показаниям температурных характеристик одной из них. Теоретически такая возможность заложена в теории подобия тепловых процессов. В ней критериальные числа (они же критерии подобия), выведенные в виде безразмерных коэффициентов, описывают взаимосвязи различных теплофизических и термодинамических величин между собой. Однако методы выявления особых термодинамических состояний одной отдельно выбранной характеристики по температурным шкалам другой отсутствуют.

В настоящей работе предпринята попытка построения регрессионной модели температурной зависимости скорости звука в жидкой воде при нормальном давлении P = 0,101325 МПа и в температурном диапазоне T = [0...100 °C], на основе эталонных измерений ВНИИФТРИ с помощью рабочего эталона нулевого разряда УВТ-90-А–96 [2].

Измеренные значения утверждены Государственной службой стандартных справочных данных (при Госкомитете РФ по стандартизации и метрологии) в качестве официальных таблиц, содержащих значения термодинамической скорости распространения звука в нормальной, деаэрированной, дистиллированной (ГОСТ 6709–72) воде при температурах от 0 до 100 °С и при давлениях от атмосферного до 100 МПа (ГСССД 190–2000) [2].

Ниже приведены табличные значения скорости звука в воде при нормальном давлении с шагом $\Delta T = 1$ °С (табл. 1).

Таблица 1

Значения скорости звука *w* (м/с) при *P* = 0,101325 МПа, *d* = 0,02 м/с (ГСССД 190–2000)

T, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1402,39	1407,37	1412,23	1416,99	1421,63	1426,17	1430,60	1434,92	1439,14	1443,26
10	1447,28	1451,20	1455,03	1458,76	1462,40	1465,94	1469,40	1472,77	1476,05	1479,25
20	1482,36	1485,39	1488,33	1491,20	1493,99	1496,70	1499,34	1501,90	1504,39	1506,80
30	1509,14	1511,42	1513,62	1515,76	1517,82	1519,83	1521,76	1523,64	1525,45	1527,19
40	1528,88	1530,51	1532,07	1533,58	1535,03	1536,42	1537,76	1539,04	1540,27	1541,44
50	1542,57	1543,63	1544,65	1545,61	1546,53	1547,39	1548,21	1548,98	1549,70	1550,37
60	1551,00	1551,58	1552,11	1552,60	1553,04	1553,44	1553,80	1554,11	1554,39	1554,61
70	1554,80	1554,95	1555,06	1555,12	1555,15	1555,13	1555,08	1554,99	1554,86	1554,69
80	1554,49	1554,25	1553,97	1553,65	1553,30	1552,91	1552,49	1552,04	1551,55	1551,02
90	1550,46	1549,87	1549,24	1548,59	1547,89	1547,17	1546,42	1545,63	1544,81	1543,97
100	1543,09	–	–	–	–	–	–	–	–	–

График, построенный на основе табл. 1, приведен на рис. 1.

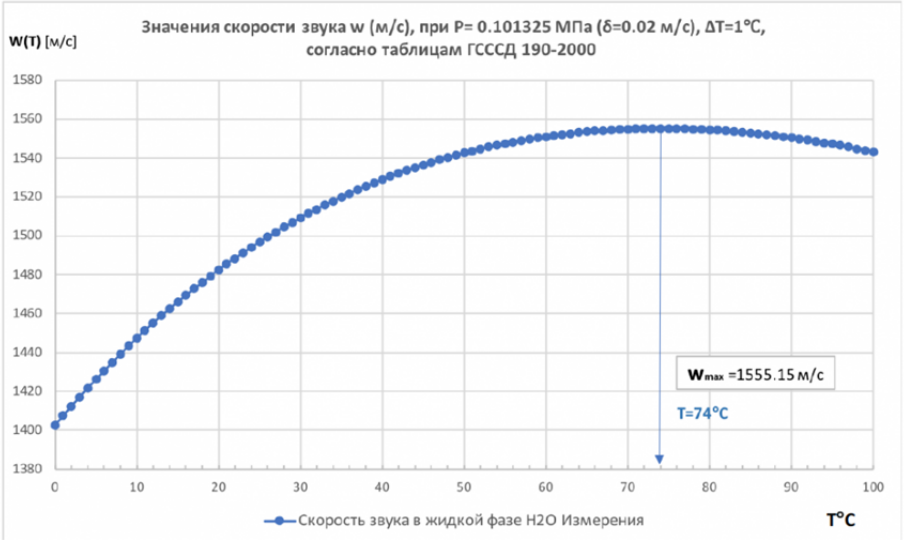


Рис. 1. График по значениям скорости звука (согласно ГСССД 190–2000)

Данные эталонных измерений (см. табл. 1, рис. 1), содержат значение максимума скорости звука при T = 74 °C, w_{max} = 1555,15 м/с. Скорость звука является одной из термодинамических характеристик любого вещества, а точка ее максимума считается одной из особых термодинамических точек жидкой фазы воды.

Форма кривой (см. рис.1) позволяет предположить возможность ее описания квадратичной функцией, через построение оценочного регрессионного уравнения вида:

$$w(T) = k_1 \cdot T^2 + k_2 \cdot T + k_3,$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты регрессии.

Нашей целью является исключительно оценочный подход к построению модели. Помимо визуальной оценки кривой, о возможности применения квадратичной функции говорит также и физическая картина процесса, которая во многих случаях описывается уравнениями с параметрами температуры именно во второй степени. Есть ограничения в правой части от точки максимума, кривая не совсем квадратична. В условиях приближения к интервалу 90...100 °C кластерная структура воды существенно смещается в сторону увеличения доли мономолекул и кластеров малого размера (димеры, тримеры). Для максимального учета особенностей всей кривой из 12 точек, участвующих в построении модели, мы постарались сохранить интервальные пропорции — 10 пробных точек описывают 100 точек экспериментальных значений, плюс две точки дополнительно — левую и правую часть в окрестности максимума. Таким образом были учтены условия интервальных пропорций для трех условных интервалов. В табл. 2 приведены отобранные для расчетов значения.

Таблица 2

Значения для построения квадратичной модели

Интервал T	Точки построения модели	Примечание
[0–70 °C]	{0; 1402.39}, {10; 1447.28}, {20; 1482.36}, {40; 1528.88}, {60; 1551.00}, {70; 1554.80}	6 точек — часть кривой до точки max
[70– 80 °C]	{72; 1555.06}, {74; 1555.15}, {76; 1555.08}	3 точки — точка max и окрестности
[80–100 °C]	{80; 1554.49}, {85; 1552.91}, {90; 1550.46}	3 точки — правая часть кривой

В результате расчетов методом наименьших квадратов было получено уравнение квадратичной регрессии в виде

$$w(T) = -0{,}0291285 \cdot T^2 + 4{,}18531 \cdot T + 1406{,}4, \quad (1)$$

где $w(T)$ — функция скорости звука от температуры; коэффициенты регрессии, соответственно, равны: k_1 = – 0,0291285; k_2 = 4,18531; k_3 = 1406,4.

Результаты модельных исследований приведены на рис. 2.

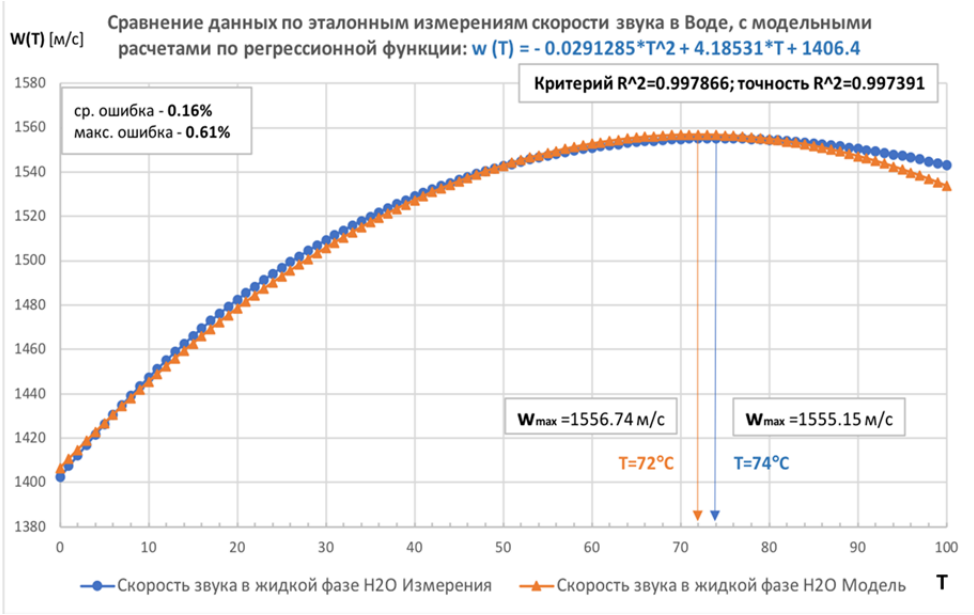


Рис. 2. Сравнение температурной зависимости скорости звука (согласно ГСССД 190–2000) с расчетными значениями квадратичной регрессионной модели

Обратим внимание на основные параметры сравнения:

1. Очень высокий коэффициент детерминации, отражающий меру качества регрессионной модели, — критерий $R^2 = 0{,}997866$.
2. Пересчет по всем 100 точкам эталонных значений показал среднее отклонение расчетных значений от эталонных 0,16 %. При этом максимальное отклонение даже в крайней точке при 100 °C составило 0,61 %.
3. Мы обнаруживаем смещение температурного значения особой точки (максимума) с 74 до 72 °C. Это существенный недостаток, однако точное температурное значение максимальной скорости звука в жидкой фазе H_2O до сих пор является предметом спора, и в разных источниках мы встречаем разные данные на этот счет. Трудности связаны прежде всего с разными стандартами водоподготовки для эталонных измерений, особенно в части деаэрации воды.

И, наконец, главный вывод. Если составить из коэффициентов регрессии (1) выражение

$$|k_1 \cdot k_3| - k_2 = 36{,}7810124,$$

получившийся результат очень близок по значению к температуре особой точки минимальной теплоемкости T_c = 36,79 °C. Теория и практика применения методов регрессионного анализа предостерегает от придания коэффициентам регрессии физического смысла без достаточных на то оснований. В настоящий момент основания к этому в нашей модели, действительно, отсутствуют. Мы лишь фиксируем получившийся результат численного совпадения с очень важной особой точкой теплоемкости по коэффициентам регрессии для температурной зависимости скорости звука в жид-

кой воде. Крайне важными, на наш взгляд, будут исследования для эталонных значений скорости звука при давлениях отличных от атмосферного, вплоть до условий в диапазоне давлений от 5 до 100 МПа. Получившаяся связь кажется неочевидной, но, с другой стороны, взаимовлияние между термодинамическими характеристиками, имеющими особые точки во всем температурном диапазоне жидкой фазы H_2O, может принимать самые разные формы [3, 4]. Оно обусловлено более глубокими принципами симметрии, которые в настоящее время пока не заняли свое место в физической теории воды, находящейся в лишь в начальной стадии своего формирования.

Литература

[1] Захаров С.Д., Мосягина И.В. Кластерная структура воды (обзор). Препринт. Сер. 11. Москва, 2011, 24 с.

[2] ГСССД 190–2000. Таблицы стандартных справочных данных Вода. Скорость звука при температурах 0... 100 °С и давлениях ОД 01325...100 МПа. Москва, 2000, 12 с.

[3] Fedichev P., Menshikov L., Bordonskiy G., Orlov A. Experimental evidence of the ferroelectric nature of the λ-point transition in liquid water. JETP Letters, 2011, vol. 94, no. 5, pp. 401–405. DOI: https://doi.org/10.1134/S002136401117005X

[4] Pershin S. Coincidence of rotational energy of H2O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice. Physics of Wave Phenomena, 2008, vol. 16 (1), pp. 15–25. DOI: https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x

УДК 530.145.6

Исследование волновых свойств антиматерии

Смирнов Евгений Васильевич Seva09@rambler.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Отмечена важность экспериментального обнаружения волновых свойств античастиц. Подчеркнута необходимость включения этого материала в курс общей физики, читаемый в технических университетах России. Продемонстрированный метод способен справиться со слабой когерентностью и низкой интенсивностью реальных пучков антивещества. Результаты этих исследований — первых исследований волновых свойств античастиц — имеют важное значение для формирования основ физического образования студентов технических вузов.

Ключевые слова: *антиматерия, волны де Бройля, интерферометры, античастицы, антивещество*

Волновая природа материи лежит в основе квантовой физики, и ее проявления в опытах как по дифракции на кристаллах, так и на дифракционных решетках, экспериментально наблюдались для разнообразных частиц, начиная с электронов и заканчивая крупными органическими молекулами (см., например, [1–3]). Для всех этих частиц длина волны де Бройля определялась соотношением

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

и не зависела от формы и размеров молекулы, а также от величины ее массы.

Вполне естественно ожидать, что частицы, состоящие из антивещества — позитроны, а также нейтральные системы — позитроний, мюоний, антиводород — также будут обладать волновыми свойствами. Первая работа в этом направлении, в которой были выявлены волновые свойства одиночных позитронов, была выполнена в 2019 году на экспериментальной установке в Комо (Италия) [4].

Используемые в опыте дифракционные решетки были изготовлены из нитрида кремния толщиной 700 нм и покрыты слоем золота толщиной ~ 10 нм. Они пропускали значительную долю позитронов с энергией 14 кэВ. Фокусировка луча была настроена таким образом, чтобы размер пятна луча и, следовательно, геометрические характеристики луча, такие как угловое расхождение, заметно не изменялись в зависимости от энергии.

Интерферометр Тальбота — Лоу, схема которого представлена на рис. 1, создавал высококонтрастные периодические полосы, которые были обнаружены с помощью ядерных эмульсий, способных определять точку столкновения каждого отдельного позитрона с эмульсией с субмикронным разрешением (рис. 2). Остаточная скорость счета пучка на детекторе после коллимации (~80 % потерь) и прохождения через решетки (~90 % потерь) была около 100 e+/c. Для накопления достаточной статистики требовалось время экспозиции от 120 до 200 ч (около $2 \cdot 10^7$ зерен в области анализа). Все компоненты интерферометра были немагнитными, и интерферометр был окружен металлическим экраном, предназначенным для уменьшения остаточного магнитного поля Земли.

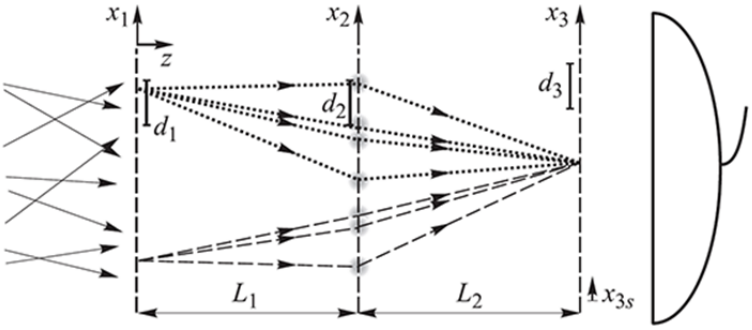


Рис. 1. Схема интерферометра Тальбота — Лоу [3]

Измеренная энергетическая зависимость контраста полосы в диапазоне от 8 до 16 кэВ доказывает квантовомеханическое происхождение периодической структуры и исключает классические эффекты, обеспечивая первое на сегодняшний день наблюдение интерференции волн антивещества.

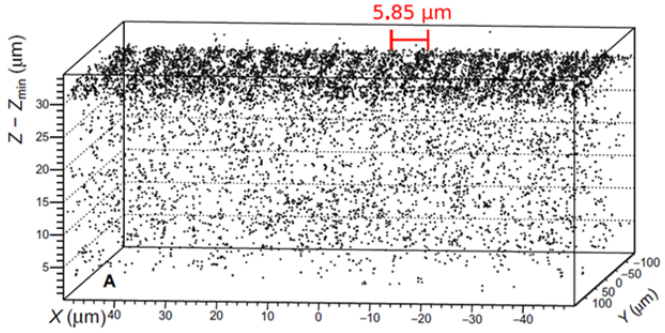


Рис. 2. Трехмерное распределение интерференционных полос в эмульсии [4]

Результаты работы [4] иллюстрирует принцип корпускулярно-волнового дуализма: позитроны испускаются радиоактивным источником в виде точечных частиц, взаимодействуют как волны материи — волны де Бройля — с интерферометром и в конечном итоге обнаруживаются в виде отдельных пятен в детекторе эмульсии. Их пространственное распределение определяется длиной волны де Бройля λ_{dB}, как предсказано квантовой механикой, обеспечивая первую демонстрацию волновой интерферометрии антивещества.

Эти исследования открывают путь не только к интерферометрическому изучению нейтральных систем антивещества, таких как позитроний, мюоний или антиводород, но и к измерению их гравитационного ускорения в поле тяжести Земли. Продемонстрированный метод способен справиться со слабой когерентностью и низкой интенсивностью реальных пучков антивещества.

Результаты этих исследований — первых исследований волновых свойств античастиц — имеют важное значение для формирования основ физического образования студентов технических вузов и должны быть включены в курс общей физики, изучаемый в технических университетах России.

Литература

[1] Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 528 с.

[2] Смирнов Е.В. Дифракция микрочастиц на щелях: от электронов до биологических молекул. Физическое образование в вузах, 2015, т. 21, № 1, с. 97–110.

[3] Hornberger K., Gerlich S., Haslinger Ph., Nimmrichter S., Arndt M. Quantum interference of clusters and molecules. Rev Mod Phys, 2012, vol. 84, pp.157–173.
DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1109.5937

[4] Sala S., Ariga A., Ereditato A., Ferragut R., Giammarchi M., Leone M., Pistillo C., Scampoli P. First demonstration of antimatter wave interferometry. Science Advances, 2019, vol. 5, pp. 1–7.
DOI: https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7610

УДК 530.145.6

Изучение волновых свойств крупных молекул с помощью интерферометра Капицы — Дирака — Тальбота — Лоу

Смирнов Евгений Васильевич Seva09@rambler.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Экспериментальные исследования волновых свойств самых крупных на сегодняшний день молекул — функционализированных олигопорфиринов — состоящих из более чем 2000 атомов, подчеркивают универсальность квантовой механики. Результаты этих исследований должны быть включены в курсы общей физики и квантовой механики, изучаемые в технических университетах России. Вид интерференционных полос для таких массивных частиц был получен с использованием нового интерферометра Капицы — Дирака — Тальбота — Лоу длиной 2 м, самого длинного макромолекулярного интерферометра на сегодняшний день.

Ключевые слова: *экспериментальные основания квантовой физики, волны де Бройля, интерферометры, эффект Тальбота*

Большое значение для изучения волновых свойств частиц материи имел переход от опытов по дифракции частиц на кристаллах к опытам по дифракции на дифракционных решетках [1]. Эти эксперименты, начавшиеся с изучения дифракции на решетках самых легких частиц — электронов [2, 3], были затем распространены и на случай молекул, содержащих достаточно большое число атомов [4]. Важным моментом, определившим дальнейшее направление исследований, явилось использование в эксперименте интерферометра Тальбота — Лоу [5] и интерферометра Капицы-Дирака — Тальбота — Лоу [6] (рис. 1). Существенной особенностью этих интерферометров является то, что они позволяют проводить эксперименты с пучками частиц небольшой интенсивности, обладающих к тому же довольно невысокой пространственной когерентностью.

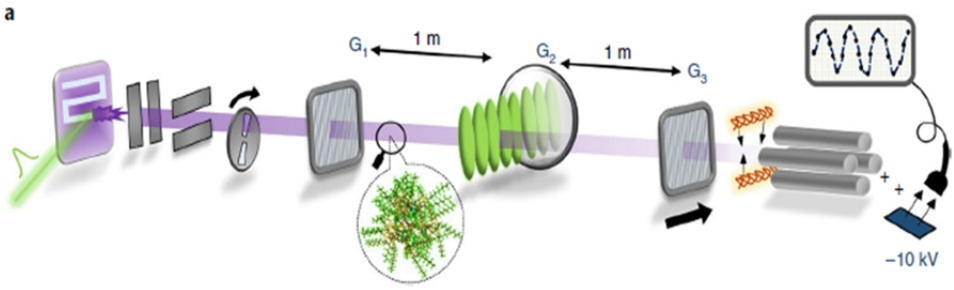


Рис. 1. Схема интерферометра Капицы — Дирака — Тальбота — Лоу [7]

С помощью нового интерферометра Капицы — Дирака — Тальбота — Лоу, были выявлены волновые свойства молекул функционализированных олигопорфиринов с массой более 25000 а.е.м. [7]. Эти молекулы состоят из более чем 2000 атомов и на

сегодняшний день являются самыми тяжелыми микрообъектами, демонстрирующими волновые свойства.

Молекулярный пучок формировался путем импульсной лазерной десорбции с предметного стекла с покрытием. Луч коллимировался щелями (500 мкм по горизонтали, 400 мкм по вертикали) и модулировался диском-прерывателем с псевдослучайной последовательностью отверстий для измерения времени пролета. Используемые молекулы представляли собой специально подобранные производные олиготетрафенилпорфиринов, обогащенные до 60 фторалкилсульфонильных цепей. После прохождения интерферометра молекулы ионизировались электронным ударом, отбирались по массе и подсчитывались. Затем интерференционные полосы обнаруживались путем смещения конечной механической решетки поперечно небольшими шагами при одновременном мониторинге передаваемого молекулярного потока.

Вид интерференционных полос для таких массивных частиц (рис. 2) был получен с использованием нового интерферометра Капицы — Дирака— Тальбота — Лоу длиной 2 м, самого длинного макромолекулярного интерферометра на сегодняшний день, который обеспечивал доступ к широкому диапазону масс частиц с большим разнообразием внутренних состояний. Молекулы в этом исследовании имели длину волны де Бройля, равную 53 фм, что на пять порядков меньше диаметра самих молекул.

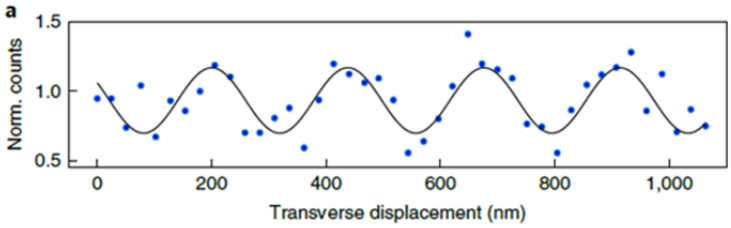


Рис. 2. Интерференционные полосы, демонстрирующие волновые свойства молекул [7]

Развитие экспериментальных методов квантовой механики за последние два с половиной десятилетия сделали нас свидетелями того, что было названо второй квантовой революцией: возрождение исследований квантовых основ, идущих рука об руку с растущими экспериментальными возможностями, возродило идею использования квантовых суперпозиций для технологических приложений от информатики до точной метрологии.

Демонстрация в работе [7] волновой природы нового класса массивных частиц подчеркивает универсальность квантовой механики, показывая, что динамика таких частиц не может быть понята без квантовой теории. Кроме того, увеличение массы частиц, обладающих волновыми свойствами, накладывает более строгие ограничения на модифицированные квантовые теории, такие, например, как объективные модели коллапса [8]. Представленные результаты должны быть включены в курсы физики и квантовой механики, изучаемые в технических университетах России.

Литература

[1] Смирнов Е.В. Дифракция микрочастиц на щелях: от электронов до биологических молекул. Физическое образование в вузах, 2015, т. 21, № 1, с. 97–110.

[2] Jonsson C. Elektroneninterferenzen an mehreren kunstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift fur Physik, 1961, vol. 161, pp. 454–474.

[3] Jonsson C., Brandt D., Hirschi S. Electron diffraction at multiple slits. Am J Phys, 1974, vol. 42, pp. 4–11.

[4] Arndt M., Nairz O., Voss-Andreae J., Keller C., van der Zouw G., Zeilinger A. Wave-particle duality of C_60 molecules. Nature, 1999, vol. 401, pp. 680–682.

[5] Hackermuller L., Uttenthaler S., Hornberger K., Reiger E., Brezger B., Zeilinger A., Arndt M. Wave nature of biomolecules and fluorofullerenes. Phys Rev Lett, 2003, vol. 91 (9), art. 090408.

[6] Arndt M., Hornberger K. Quantum interferometry with complex molecules. arXiv: 0903.1614v1 [quant-ph], 9 Mar 2009.

[7] Gerlich S., Hackermuller L., Hornberger K., Stibor A., Ulbricht H., Gring M., Goldfarb F., Savas T., Muri M., Mayor M., Arndt M. A Kapitza-Dirac-Talbot- Lau Interferometer for highly polarizable molecules. Nature Physics, 2007, vol. 3, pp. 711–715.

[8] Fein Y.Y., Geyer Ph., Zwick P., Kiałka F., Pedalino S., Mayor M., Gerlich S., Arndt M. Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa. Nature Phys- ics, 2019, vol. 15, pp. 1242–1245.

УДК 536.79

Модернизация теплового модуля для двигателя Стирлинга

Тимченко Светлана Леонидовна svtimchenko@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Задорожный Николай Антонович nikazador@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Лебедев Александр Владимирович lexbird@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Проанализированы достоинства и недостатки применения двигателя Стирлинга на практике. Представлены варианты термомодуля для осуществления нагрева рабочего тела двигателя Стирлинга. Первый термомодуль изготовлен из меди и увеличивает теплоемкость контакта светового источника с рабочим телом. В качестве базы для второго термомодуля выбран электрический нагревательный элемент. Данная установка будет иметь преимущество за пределами атмосферы, где Солнце или спутник с установленным на нем мощным лазером от изготовленной детали отделяет лишь пустота и ничего не препятствует передаче энергии.

Ключевые слова: *двигатель Стирлинга, термодинамический цикл, термомодуль, перепад температур, сжатие, расширение газа*

Введение

В настоящее время активно развивается направление по созданию экологически чистых регенеративных источников энергии и их преобразователей. Двигатель Стирлинга — тепловая машина с замкнутым термодинамическим регенеративным циклом, в котором циклические процессы сжатия и расширения осуществляются при различных уровнях температуры, а управление потоком рабочего тела происходит путем изменения его объема. На этом принципе основано превращение теплоты в работу, и наоборот. В качестве рабочего тела в двигателях могут служить воздух, водород, гелий и др. При использовании углеводородных топлив такие двигатели отличаются низким содержанием токсичных составляющих отработавших газов. Двигатели Стирлинга могут длительное время работать автономно в энергосистемах при отсутствии атмосферного воздуха (в космических или подводных условиях) [1–4].

Двигатель Стирлинга имеет ряд преимуществ [1, 2, 5]:

- *универсальность* — может работать при почти любом перепаде температур: например, между разными слоями воды в океане, от энергии Солнца, от ядерного или изотопного нагревателя, угольной или дровяной печи и т. д.;
- *простота конструкции* — конструкция двигателя очень проста, он не требует дополнительных систем, таких как газораспределительный механизм. Он запускается самостоятельно и не нуждается в стартере. Его характеристики позволяют избавиться от коробки передач.
- *увеличенный ресурс* — простота конструкции позволяет обеспечить хороший запас работоспособности в десятки и сотни тысяч часов непрерывной работы;

- *экономичность* — для утилизации некоторых видов тепловой энергии, особенно при небольшой разнице температур. В случае преобразования в электричество солнечной энергии двигатель достигает КПД до 31,25 %, чем тепловые машины на пару.
- *экологичность* — не имеет выхлопа из цилиндров, а поэтому уровень его шума гораздо меньше, чем у поршневых двигателей внутреннего сгорания. β-стирлинг с ромбическим механизмом является идеально сбалансированным устройством и имеет предельно низкий уровень вибраций: амплитуда вибрации меньше 0,0038 мм. Двигатель Стирлинга не загрязняет окружающую среду, так как не расходует рабочее тело. Экологичность двигателя обусловлена прежде всего экологичностью источника тепла.
- *малая шумность* — такое качество очень важно на подводных лодках. Такие недостатки, как высокий удельный вес и большая рассеиваемая теплота, там менее важны, поскольку двигатель в общей массе подводной лодки имеет небольшой процент, а теплота передается теплообменником через прочный корпус, не требуя радиаторов и вентиляторов. Двигатель Стирлинга получил широкое распространение на подводных лодках.

К недостаткам двигателя Стирлинга относятся:

- *громоздкость и материалоемкость* — основной недостаток поршневых двигателей внешнего сгорания. Двигатель Стирлинга всю теплоту отдает в систему охлаждения (не имеет выхода горячих газов), и требует по сравнению с обычным автомобильным двигателем удвоенного по производительности радиатора. Для получения характеристик, сравнимых с характеристиками ДВС, приходится применять высокие давления (свыше 100 атм) и особые виды рабочего тела — водород, гелий;
- *тепло подводится не к рабочему телу непосредственно*, а только через стенки теплообменников. Стенки имеют ограниченную теплопроводность, из-за чего КПД оказывается ниже, чем можно было ожидать. Горячий теплообменник работает в очень напряженных условиях теплопередачи и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогостоящих материалов. Поскольку источник тепла расположен снаружи, двигатель медленно откликается на изменение теплового потока, подводимого к цилиндру, и не сразу может выдать нужную мощность при запуске.

Экспериментальная часть

В данной работе рассматривается принцип работы экологически чистого теплового двигателя, в котором осуществляется процесс преобразования тепловой энергии в механическую, представлена разработка двух тепловых модулей, позволяющих привести рабочее тело двигателя Стирлинга в движение, за счет энергии солнца и электричества. Подробно рассмотрены различные варианты нагрева рабочего тела двигателя Стирлинга с целью обеспечения стабильной работы двигателя. Предложены различные варианты термомодулей.

На рис. 1 показан внешний вид термомодуля, который изготовлен из меди.



Рис. 1. Внешний вид элемента термомодуля

На рис. 2 показан внешний вид установки «Двигатель Стирлинга с термомодулем».

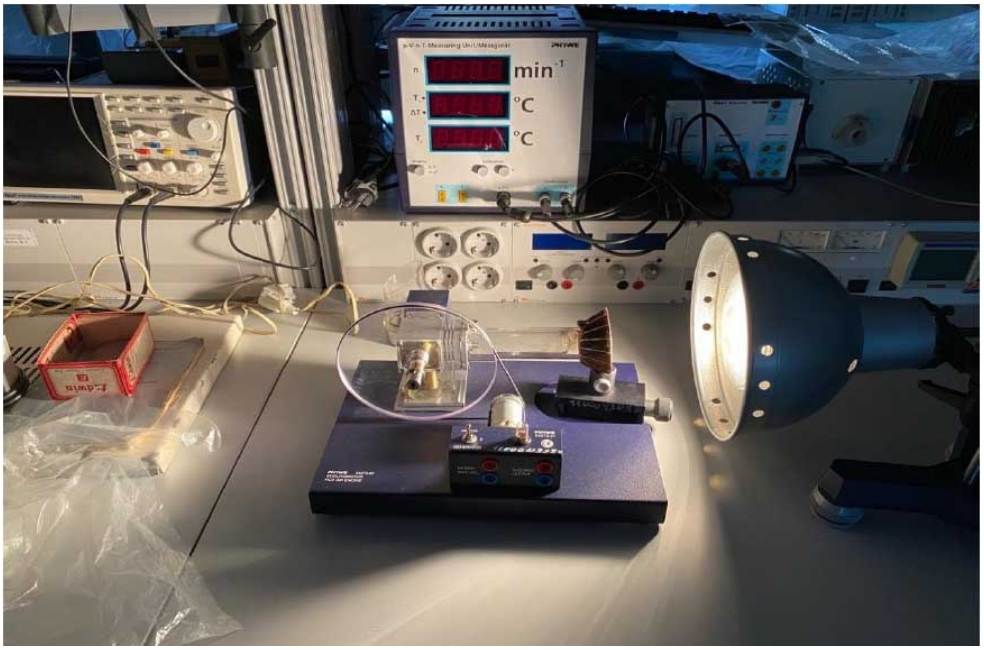


Рис. 2. Внешний вид установки «Двигатель Стирлинга с термомодулем»

Для нагрева рабочего тела двигателя использовались два вида тепловых модулей.

«Модуль 1» (см. рис. 1, 2) приводили в контакт со стеклянным цилиндром, в котором находилось рабочее тело, а нагрев самого модуля осуществляли от лампы накаливания с люминофорным покрытием. В качестве материала для «Модуля 1» были выбрана медь (марка М1М и М0.5Т), поскольку по теплопроводности данный металл уступает лишь серебру.

Второй вариант эксперимента — «Модуль 2». В этом случае нагрев рабочего тела осуществлял нагревательный элемент, представляющий собой керамический конус с обмотанной вокруг него спиралью из проволоки с большим сопротивлением (рис. 3). Элемент рассчитан на сеть с напряжением 220 В. Мощность 500 Вт.



Рис. 3. Электрический нагревательный элемент

Под данный элемент был выбран соответствующий цоколь и рефлектор. Цоколь нужен обязательно керамический, поскольку пластиковый не выдержит такой тепловой нагрузки. Цоколь стандарт E27. Рефлектор выбирали по тому же самому принципу, материал должен выдержать тепловую нагрузку от нагревательного элемента.

На рис. 4 показан термодинамический цикл двигателя Стирлинга, рабочим телом которого служит воздух.

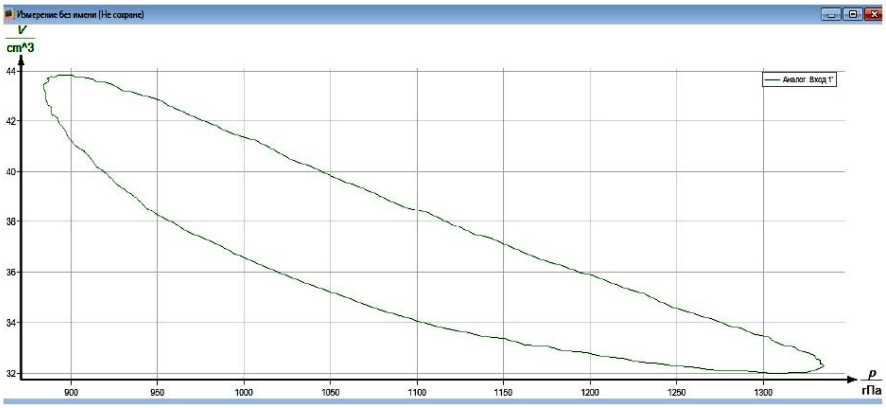


Рис. 4. Термодинамический цикл двигателя Стирлинга

Выводы

Перспективы данной установки лежат преимущественно за пределами атмосферы, где солнце от изготовленной детали отделяет вакуум, и ничего не препятствует передаче энергии. Двигатель Стирлинга не требует смены топлива, что крайне важно

при работе в космическом пространстве, ведь каждый килограмм или литр топлива нужно поднимать с Земли. Это экономически не выгодно, но на данный момент альтернатив нет.

Эффективно можно использовать данный двигатель на Луне. Одну часть емкости с рабочим телом заглубить в грунт, а другую часть направить к Солнцу. Это обеспечит оптимальную разность температур. В случае открытого космоса стоит вопрос о теплоотводе. Одним из вариантов решения проблемы (помимо громоздких радиаторов) является система капельного охлаждения (капельный холодильник-излучатель) представленная МФТИ в 2015 г. на Международном аэрокосмическом форуме (МАКС 2015).

Литература

[1] Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга: пер. с англ. Москва, Энергия, 1978, 152 с.

[2] Уокер Г. Двигатели Стирлинга. Москва, Машиностроение, 1985, 408 с.

[3] Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва, Юрайт, 2015, 576 с.

[4] Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б. Криогенные машины. Санкт-Петербург, Политехника, 1991, 332 с.

[5] Алиев И.Н., Копылов И.С., Коршунов В.М. Двигатель Стирлинга. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 24 с.

УДК 53.043

Стенд для исследования характеристик солнечных панелей

Тимченко Светлана Леонидовна svtimchenko@yandex.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Задорожный Николай Антонович nikazador@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Фролов Максим Валерьевич salikat221@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Создан автоматизированный стенд для исследования характеристик солнечных панелей и проведены исследования работы солнечной панели при различных температурах панели. Автоматизированный стенд позволяет осуществлять сбор данных и их обработку при работе солнечной панели в режиме удаленного доступа. Измерительным и управляющим устройства установки служит микропроцессор Arduino. Устройством для поддержания температуры выбран элемент Пельтье. Измерительный стенд позволяет поддерживать заданную температуру поверхности солнечной батареи и проводить запись данных при длительных (более 4 ч) измерениях для их последующей обработки. В результате исследований стенда измерена зависимость средней мощности, вырабатываемой солнечной батареей, от температуры поверхности солнечной панели и определен коэффициент полезного действия солнечной батареи.

Ключевые слова: *солнечная панель, мощность, коэффициент полезного действия, элемент Пельтье, термомодуль, микропроцессор*

Введение

Разработка и производство систем преобразования солнечной энергии в электричество является перспективным и активно развиваемым направлением создания экологически чистых регенеративных источников энергии. Использовать энергию, вырабатываемую солнечными элементами, можно так же, как и энергию других источников питания, с той разницей, что солнечные элементы не боятся короткого замыкания. Каждый солнечный элемент батареи предназначен для поддержания определенной силы тока при заданном напряжении [1]. Его действие основано на использовании внутреннего фотоэффекта в неоднородных полупроводниковых структурах [2–4]. При попадании света на *p*-область *p–n*-перехода в полупроводнике генерируются дополнительные носители заряда, обладающие избыточной потенциальной энергией, которые перемещаются под действием электрического поля и создают на внешних выводах фотоЭДС. Таким образом, избыточная потенциальная энергия носителей преобразуется в электрическую энергию.

В отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего на его поверхность света, спектрального состава излучения. На практике в процессе эксплуатации солнечной батареи (СБ) необходимо проводить контроль физических характеристик солнечной панели (СП).

Цель работы заключалась в исследовании КПД солнечных установок в зависимости от параметров окружающей среды и проведении расчета аккумулированной энергии при использовании СП в течении суток.

Методика эксперимента

Исследования характеристик СП проводили на созданном автоматизированном стенде. Стенд позволяет одновременно измерять пять физических величин в процессе работы СП: силу тока, напряжение, среднюю мощность, время и температуру. Стенд состоит из солнечной панели, измерительного и управляющего устройства, охлаждающего модуля (рис. 1). Стенд может быть адаптирован для исследования характеристики различных СП.

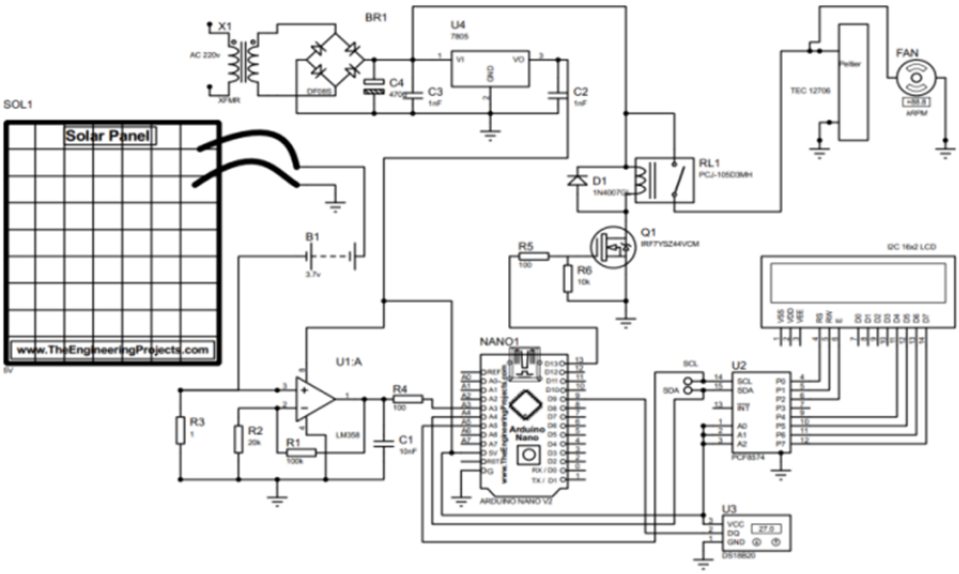


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного стенда

Результаты эксперимента

Измерение зависимости средней мощности, вырабатываемой солнечной батареей, от температуры поверхности солнечной панели

Солнечные модули в основе которых лежит кремний, составляют 90 % количества всех выпускаемых солнечных панелей. Кристаллические кремниевые модули делятся на два типа: монокристаллические и поликристаллические. В данной установке используется панель монокристаллического типа с оценочной эффективностью 22 %. Температура поверхности СБ — один из ключевых факторов, влияющих на КПД. Солнечные элементы имеют ограниченное КПД, т. е. они не могут пре-

образовать всю полученную солнечную энергию в электрическую энергию. Повышенная температура вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования пары «электрон — дырка». Оценочное изменение КПД при повышении температуры СБ на 1 °С около 0,4 %. Из выражения $P_{СЭ} = P_0(1 + \beta\Delta T)$ можно определить влияние температуры на выдаваемую мощности солнечного элемента. В данной формуле $P_{СЭ}$ — мощность солнечного элемента; P_0 — мощность солнечного элемента при температуре 25 °С; β — температурный коэффициент мощности; ΔT — изменение температуры.

Выполним эксперимент по изучению зависимости средней мощности, вырабатываемой СБ от температуры ее поверхности. Для этого были проведены измерения вырабатываемой электрической мощности СП при двух температурах — 22 и 25 °С в течение 3 300 с. Внешний вид стенда показан на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид дисплея

Графическая информация данных, поступающих с микропроцессора Arduino, представлена на рис. 3, 4.

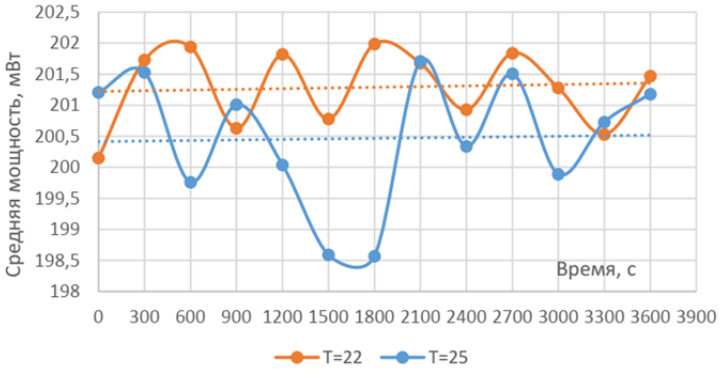


Рис. 3. Средняя мощность, вырабатываемая СП в течении 60 минут при температурах 22 °С (кривая 1) и 25 °С (кривая 2).

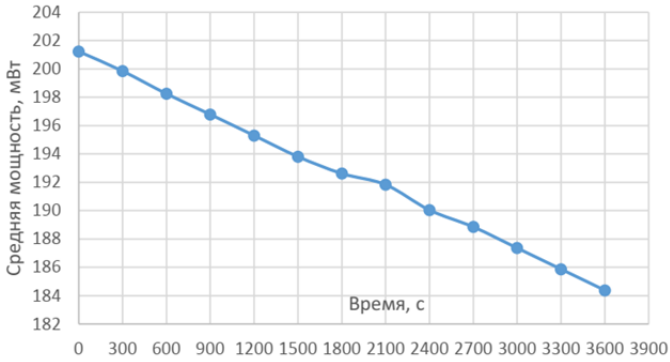


Рис. 4. Снижение мощности СП (каждые 300 с температура повышается на 1 °С)

Измерительный стенд, блок-схема которого представлена на рис. 1, позволяет:

- поддерживать заданную температуру поверхности солнечной батареи и проводить измерения температуры, вырабатываемого электрического напряжения, силы тока, мощности;
- проводить запись данных при длительных (более 4 ч) измерениях, для их последующей обработки.

В качестве измерительного и управляющего устройства установки служит микропроцессор Arduino. Устройством для поддержания температуры был выбран элемент Пельтье.

Интерфейс вывода полученных экспериментальных результатов представляет собой двухрядный 16-символьный дисплей, позволяет визуализировать следующую информацию:

- значение мгновенного напряжения, мВ;
- значение средней мощности, мВт;
- значение работы тока, мДж;
- значение мгновенной силы тока, мА.

Были поставлены следующие экспериментальные задачи:

- исследование зависимости, вырабатываемой солнечной батареей средней мощности, от температуры поверхности СП;
- определение КПД СП и расчет удельных характеристик солнечных панелей.

Установка (см. рис. 1, 2) позволяет проводить измерения мощности каждые 5 с и после преобразований выдает значение средней мощности за 5 мин. Такая функциональная возможность позволяет упростить обработку результатов, а также минимизировать погрешности измерений. Значение температуры записывается в память управляющего устройства (см. рис. 1). Для создания высокой разности температур на поверхности термоэлектрического охладителя к «горячей» стороне элемента Пельтье через термопрокладку прикреплен массивный радиатор с устройством постоянного отвода теплоты — куллером. Для распределения температуры по всей поверхности СП между «холодной» стороной элемента Пельтье и солнечной панелью закреплена алюминиевая пластина.

На рис. 3 видно, что средняя мощность, вырабатываемая СП при температуре панели 22 °С, выше на 0,4 %, чем при 25 °С. При в интервале 22...25 °С падение мощности составило 0,4 %. Поскольку через каждые 300 с температура солнечной панели

линейно повышается на 1 °С, мощность будет линейно уменьшаться на 0,13 %. Следует указать, что применение элемента Пельтье в качестве термомодуля достаточно хорошо поддерживает температуру солнечной панели. На рис. 4 видно, что за 60 мин за счет нагрева на 12 С средняя мощность вырабатываемой электрической энергии уменьшается примерно на 8,5 %.

Определение КПД солнечной панели и расчет удельных характеристик солнечных панелей

Проведена оценка возможностей суточной выработка солнечной батареи – суточный ресурс вырабатываемой энергии.

В результате анализа полученных данных установлено, что на данной СП средняя вырабатываемая мощность в час равна 130 мВт. Площадь солнечного элемента равна 0,007 м^2. На основе полученных данных удельная мощность СП равна 18,5 Вт/м^2. По таблице мощности солнечного излучения на Земле было выбрано значения дневной суммы солнечной радиации для Москвы. Далее будем использовать данные, приведенные к ваттам в час, для времени проведения замеров значение равно 167 Вт·ч. Таким образом КПД нашей СП равен 11 %. При повышении температуры поверхности СП КПД падает примерно на 0,7 %.

Выводы

Представленный стенд для контроля электрических параметров солнечной панели позволяет поддерживать температуру панели и в автоматическом режиме корректировать сопротивление нагрузки для достижения максимальной мощности вырабатываемой электрической энергии.

Литература

[1] Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. Москва, Энергоатомиздат, 2008, 231 с.

[2] Тимченко С.Л. Дементьева О.Ю., Задорожный Н.А. Влияние спектра излучателей на характеристические кривые солнечной батареи. Физическое образование в вузах, 2015, т. 21, № 1, с. 3–13.

[3] Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В. Изучение работы солнечной батареи. Казань, Казан. ун-т, 2014, 33 с.

[4] Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных аппаратных факторов. Известия Томского политехнического университета, 2009, т. 314, № 4, с. 142–148.

УДК 004.4

Модель движения упругого тела в гравитационном поле

Титов Константин Викторович kvtito@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассматривается математическая модель, реализация которой представлена в системах компьютерной математики Maple, MATHCAD и MatLab. Такое представление позволяет сравнить возможности этих систем с точки зрения удобства, простоты и эффективности проводимых исследований. Модель движения упругого тела в гравитационном поле подробно записывается в каждой из систем компьютерной математики, что дает возможность ответить на поставленные вопросы. Решение модели проводится в интерактивном режиме, сопровождается расчетными и графическими данными.

Ключевые слова: *дифференциальные уравнения, математические модели, теория колебаний, динамический гаситель, гравитация*

Постановка задачи и ее запись в системе компьютерной математики MATHCAD

Запишем математическую модель движения упругого тела в гравитационном поле. Динамика падающего упругого тела, если пренебречь сопротивлением воздуха и некоторыми другими факторами, может быть описана следующим уравнением:

$$mas \cdot \frac{d^2}{dx^2} y(x) = -P,$$

где mas — масса упругого тела, P — сила тяготения, x — время, $y(x)$ — расстояние от поверхности, на которую вертикально падает упругое тело. Удобнее записать его в виде, обозначая

$$\frac{P}{mas} = g$$

как ускорение свободного падения,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -g. \quad (1)$$

Именно это уравнение (1) и будет рассматриваться в дальнейшем. К этому уравнению необходимо добавить начальные условия. Так как движение упругого тела можно разбить на две фазы: падение (скорость не положительна) и подъем (отскок, скорость не отрицательна), то и начальных условий будет по паре для каждой фазы отдельно. Для фазы падения (ФПА):

$$y(t_n) = a_{2,n}; y(t_n) = a_{1,n}. \quad (2)$$

Здесь $x = t_n$ — момент времени начала фазы падения упругого тела, а n — ее номер. Причем $t_1 = 0$, $n = 1, 2,\ldots$ $a_{1,n}$— высота падения, $a_{2,n}$ — начальная скорость фазы падения.

Аналогично для фазы подъема упругого тела:

$$y(\theta_n) = b_{2,n}; y(\theta_n) = b_{1,n}. \quad (3)$$

В (3) $x = \theta_n$— момент времени начала фазы подъема упругого тела, а n — ее номер. Причем $b_{1,n}$ — начальная высота подъема, $b_{2,n}$ — начальная скорость подъема. Моменты времени t_n и θ_n связаны, каким образом — будет указано ниже.

Именно в этой хронологической последовательности будут рассмотрены эти фазы движения. Фазы зависят друг от друга только по начальным условиям, следующим образом. Конечные условия предыдущей фазы становятся начальными условиями последующей фазы с учетом потери (рассеяния) энергии. При этом сумма потенциальной и кинетической энергии равна постоянной величине. Потенциальная энергия переходит в кинетическую и, наоборот, с учетом потерь (рассеяния) энергии или перехода ее в тепловую, деформации и другие виды энергии. Сумма же всех видов энергии в количественном отношении остается неизменной. Пусть движение упругого тела, как было сказано выше, начинается с фазы падения с высотыh (см. начальные условия (2)). Так как за фазой падения начинается фаза подъема упругого тела, то θ_n одновременно является временем конца фазы падения и $\theta_n \geq t_n$.

Дано:
коэффициент рассеяния энергии или, будем называть его, редуцирования
$k := 0.8$;
число наблюдаемых фаз движения упругого тела $N := 5$;
номер участка n; ускорение свободного падения $g := 9.81$;
начальная высота, с которой падает упругое тело $h := 15$;
начальный момент времени $t_1 := 0$. $n = 1 \ldots N$.
Введем обозначения:

$$v := \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}, w := \sqrt{2 \cdot \mathrm{h} \cdot \mathrm{g}} \quad , \theta_\mathrm{n} = \mathrm{t_n} + \nu \cdot \mathrm{k}^{\mathrm{n}-1}. \quad (4)$$

Ниже будет показано, что вычисление t_n можно проводитьпо следующей рекуррентной формуле:

$$t_{n+1} := t_n + v(k^{n-1} + k^n). \quad (5)$$

Поэтому упругое тело, поднятое на высоту h, начинает своё движение в момент времени $t_1 = 0$. Следующая фаза падения наступает в момент времениt_2 и т. д.

Фаза падения упругого тела (ФПА)

Зададим функцию Хевисайда, которая будет выделять на временной оси фазу падения, следующим образом:

$$x \in [t_n, \theta_n],\ Fp(x, n) := (x - t_n) - (x - \theta_n), \quad (6)$$

$$FP(x) := \sum_{n=1}^{N} Fp(x, n). \quad (7)$$

Функция (7) выделяет участки падения упругого тела на оси времени в виде единичных прямоугольных импульсов.

Динамику падения упругого тела на каждом участке n (x принадлежит отрезку $[t_n, (t_n+vk^{n-1})]$) можно получить, дважды интегрируя (1) с учетом начальных условий (2). В результате решения задачи Коши для (1) получим:

$$y(x) = a_{1,n} + a_{2,n} \cdot (x - t_n) - \frac{g}{2} \cdot (x - t_n)^2. \quad (8)$$

Уравнение (8) может описывать как фазу ФПА ($a_{2,n} \leq 0$) так и ФПО ($a_{2,n} > 0$).

Таким образом, на всех участках динамика падения упругого тела будет описываться уравнением

$$Y(x) := \sum_{n=1}^{N} \left(Fp(x,n)y(x,n)\right). \quad (9)$$

Фаза подъема упругого тела

Зададим $b_{1,n} := 0, b_{2,n} := w \cdot k^n, \theta_1 := v$ и рекуррентную формулу, позволяющую вычислять начальные моменты фазы подъема упругого тела.

$$\theta_{n+1} := \theta_n + 2 \cdot v \cdot k^n. \quad (10)$$

Здесь переменная x принадлежит интервалу: $x \in [\theta_n, \theta_n + v \cdot k^n]$.

По-прежнему возьмем уравнение (1) и начальные условия (3). Аналогично тому, как это было сделано при описании фазы падения упругого тела, запишем для фазы ФПО функцию Хевисайда

$$Fb(x,n) := (x - \theta_n) - [x - (\theta_n + v \cdot k^n)];; \quad FB(x) := \sum_{n=1}^{N} Fb(x,n). \quad (11)$$

Начальная скорость $⍰'(\theta_n) = b_{2,n}$ определяется так

$$b_{2,n} = k \cdot \sqrt{2g \cdot a_{1,n}} = k \cdot \sqrt{2g \cdot k^{2\cdot(n-1)} \cdot h} = k^n \cdot w.$$

Уравнение, описывающее динамику фазы подъема посредством функции Хевисайда на любом из участков, запишем в виде суммы:

$$YB(x) := \sum_{n=1}^{N} \left(Fb(x,n)yb(x,n)\right).$$

Общая картина движения упругого тела представлена на рис. 1.

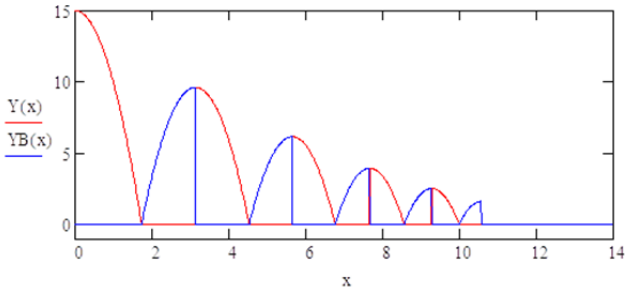


Рис. 1. Движение упругого тела (общий случай)

Обобщение модели движения упругого тела в гравитационном поле с ограничениями по высоте

Вычислим начальные условия ФПО (причем должно выполняться $a_{1,n} \geq b_{1,n}$):

$$b := \begin{vmatrix} for\, n \in 1..N; \\ b_{1,n} \leftarrow a_{1,n}\, if\, a_{1,n} \leq b_{1,n}; \\ b_{2,n} \leftarrow k \cdot \sqrt{(a_{2,n})^2 + 2 \cdot g \cdot (a_{1,n} - b_{1,n})}; \\ H_n \leftarrow \frac{(b_{2,n})^2}{2 \cdot g} + b_{1,n}; \\ a_{1,n+1} \leftarrow if(H_n \leq A_{1,n+1}, H_n, A_{1,n+1}); \\ a_{2,n+1} \leftarrow -k \cdot \sqrt{(b_{2,n})^2 + 2 \cdot g \cdot (b_{1,n} - a_{1,n+1})}; \\ b. \end{vmatrix}$$

Вычислим начальные условия ФПА:

$$a := \begin{vmatrix} for\, n \in 1..N; \\ b_{2,n} \leftarrow k \cdot \sqrt{(a_{2,n})^2 + 2 \cdot g \cdot (a_{1,n} - b_{1,n})}; \\ H_n \leftarrow \frac{(b_{2,n})^2}{2 \cdot g} + b_{1,n}; \\ a_{1,n+1} \leftarrow if(H_n \leq A_{1,n+1}, H_n, A_{1,n+1}); \\ a_{2,n+1} \leftarrow -k \cdot \sqrt{(b_{2,n})^2 + 2 \cdot g \cdot (b_{1,n} - a_{1,n+1})}; \\ \vec{Re}(a). \end{vmatrix}$$

Фаза падения (ФПА) упругого тела

Зададим функцию Хевисайда для этой фазы:

$$x \in [t_n, \theta_n], Fp(x,n) := \Phi(x - t_n) - \Phi(x - \theta_n), FR(x) := \sum_{n=1}^{N} Fp(x,n).$$

Функция *FR*(*x*) выделяет участки падения упругого тела на оси времени в виде единичных прямоугольных импульсов.

Задаваемые нелинейные ограничения можно записать в Maple в виде процедуры, что позволяет компактно представить алгоритм движения объекта.

```
Процедура
kor2:=proc(f,F,x0,d,xk)
local n,r,Z,N; Z:=777:N:=floor((xk-x0)/d):
for n from 1 to N do
r:=fsolve(f=F,x=x0+d*(n-1)..x0+d*n):
```

```
if type(r, realcons)=true then Z:=r: break fi:
od: RETURN(Z)
end:
```

Фазы не могут меняться местами. В зависимости от н.у. ФПО может свернуться в нулевой отрезок. Далее будет идти ФПА:.

$$y := (x, n) \to -\frac{g(x-te_n)^2}{2} + W_n(x - te_n) + H_n \text{ (начало } n\text{-й ФПА).}$$

Отметим, что все выше сказанное можно представить в виде имитационной модели в системе компьютерной математики MATLAB & Simulink.

На рис. 2 дана модель движения упругого тела в СКМ MATLAB.

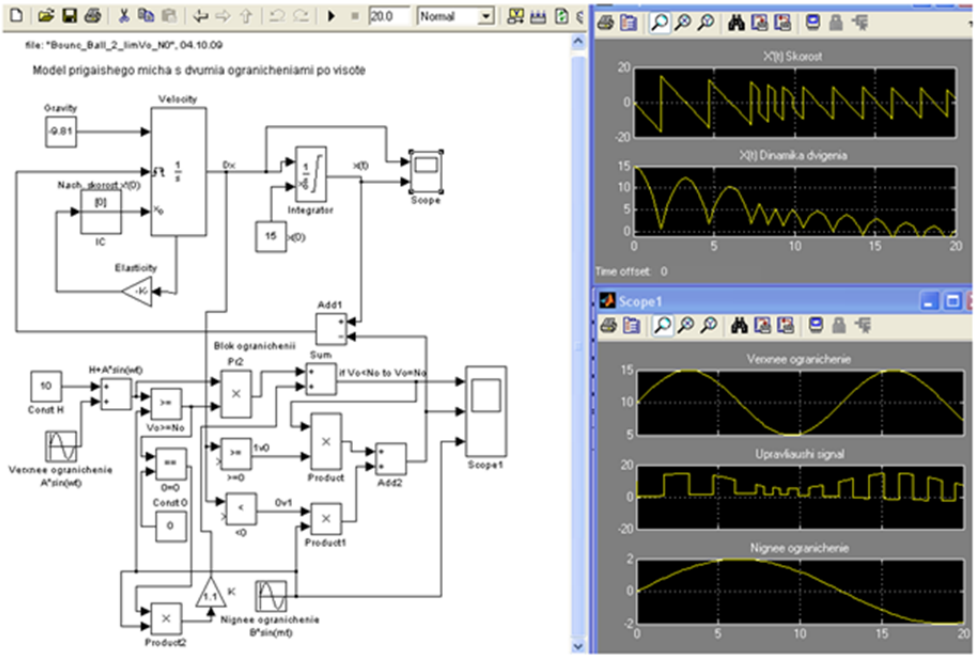


Рис. 2. Имитационная модель движения объекта в гравитационном поле

Заключение

Преимущество такой модели заключается в том, что в интерактивном режиме можно изменять параметры движения объекта и проводить качественный его анализ. Причем можно менять не только параметры, но и блоки, задающие ограничения и внешние возмущения.

Модель может быть с успехом использована в формате цифровых технологий в образовании [3], например, по таким специальностям как «Робототехника» и другие при исследовании систем посадки объекта на поверхность Земли или других небесных тел. Подобные модели могут найти также применение в автомобилестроении при исследовании динамики подвески колес.

Литература

[1] Титов К.В. Компьютерная математика. Москва, РИОР: ИНФРА-М, 2016, 282 с.

[2] Титов К.В. Уравнения математической физики. Практикум. Компьютерные технологии решения задач. Москва, РИОР, ИНФРА-М, 2019, 262 с.

[3] Александров А.А., Димитриенко Ю.И. Математическое и компьютерное моделирование — основа современных инженерных наук. Математическое моделирование и численные методы, 2014, № 1, с. 3–4.

[4] Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. Москва, Наука, 1967, 444 с.

УДК 372.853

Фундаментальные основы и методы новых технологий в преподавании физики в военно-инженерном вузе

Ханин Самуил Давидович antodinik@gmail.com
Военная академия связи имени С.М. Будённого

Остроумова Юлия Сергеевна sinklit@mail.ru
Военная академия связи имени С.М. Будённого

Костарев Сергей Валерьевич antonina1993@mail.ru
Военная академия связи имени С.М. Будённого

Предложены методические приемы раскрытия в содержании обучения физике знаниевой основы профессионально значимых для военных специалистов новых технологий. Показаны возможности реализации этих приемов в практике обучения физическим основам нанотехнологий электроники и фотоники. Развит подход к отражению в содержании обучения физике основ методов новых технологий в их конкретных проявлениях в решении военно-профессиональных задач.

Ключевые слова: *методические приемы обучения, знаниевая основа нанотехнологий, основы методов квантовых технологий, задачи военно-профессиональной деятельности*

В современных условиях интенсивного научно-технологического развития существенно актуализируется достижение цели создания в преподавании физики базиса для освоения новых технологий. В настоящем докладе, отражающем опыт работы кафедры физики Военной академии связи, показываются возможности раскрытия фундаментальных основ и методов новых технологий в преподавании физики посредством активизации ее образовательных ресурсов.

С целью отражения в содержании физических дисциплин знаниевой основы научно-технологического развития в профессионально-значимых для военного специалиста его областях без существенного увеличения временного ресурса предлагаются следующие методические приемы.

- расширительный анализ формируемых в обучении физике модельных представлений, что позволяет обнаружить «новое» в «старом»;
- распространение приобретенных знаний-умений на новые, подлежащие изучению объекты — использование «старого» в «новом»;
- конструирование нового знания методом аналогий.

Эти приемы конкретизируются на примерах их применение в обучении теоретическим основам развития нанотехнологий электроники и фотоники.

Возможности реализации первого из указанных методических приемов демонстрируются на примере формирования ключевых в развитии нанотехнологий представлений об эффектах размерного квантования в системах пониженной размерности [1], осуществляемого посредством расширительного анализа традиционно изучаемой в курсе физики модели квантования энергии микрочастицы в потенциальном ящике при уменьшении его ширины до нанометровых размеров; изменении энергии связанных (примесных, экситонных) состояний с уменьшением размерности системы,

выясняемом на основе водородоподобной модели этих состояний, энергетическом спектре сверхрешеток, определяемом посредством анализа модели Кронига — Пенни.

Второго методического приема — на примере освоения ключевых концептов полупроводниковой гетероструктурной электроники [2]. Показывается, что необходимое для понимания важнейших в практическом плане эффектов в гетероструктурах построение зонных диаграмм может осуществляться на основе знаний-умений, освоенных в курсе физики в части *p*–*n*-гомопереходов. Достаточно дополнительно внести в рассмотрение два параметра — работу выхода электронов и энергию электронного сродства составляющих гетероструктуру полупроводников, чтобы прийти к принципиально важному в рассматриваемом аспекте выводу о наличии разрывов краев разрешенных энергетических зон.

Примером реализации третьего из указанных приемов является формирование представлений об оптических свойствах фотонных кристаллов [3]. Получаемое здесь на основе использования уравнений Максвелла уравнение обнаруживает аналогию с известным уравнением Шредингера для электронов в кристалле. Это позволяет выявить принципиально важную в научном и практическом планах особенность оптических свойств фотонных кристаллов — наличие фотонных запрещенных зон.

Освоение указанного материала в логике задачно-деятельностного подхода, координация изучения теории с проведением эксперимента превращают его в полноценное учебное исследование, выполнение которого открывает возможности предметного осмысления роли фундаментальных знаний как ориентировочной основы технологического развития.

В части отражения методов новых технологий показываются возможности представления в содержании обучения физики отдельных классов актуальных методов в их применении к решению всего спектра задач в военно-профессиональной деятельности [4].

Сказанное конкретизируется на примере изучения методов квантово-оптических технологий. Применительно к решению задач наблюдения рассматриваются методы и средства лазерной дальнометрии [5]. В рамках изучения физики прежде всего осваивается могущий быть положенным в основу принципа действий дальномера радиолокационный метод и, исходя их предъявляемых к дальномеру требований, обосновывается целесообразность использования в качестве источника световых импульсов полупроводникового лазера. Далее выявляется противоречие между необходимостью широкой активной области лазера, что позволяет уменьшить угол расходимости облучения, и малости энергопотребления. С целью разрешения этого противоречия формулируется идея о раздельном электронном и оптическом разграничении в полупроводниковой гетероструктуре лазера. Наконец, изучается устройство отвечающего принятому на физическом уровне проектирования решению полоскового лазера.

В части обучения методам решения задач ориентации и принятия решения в качестве центральных выступают методы квантовой криптографии [6]. В курсе физики актуализируются свойства фотонов, делающие их перспективными для передачи информации, ее кодирования на уровне физических законов, формулируются требования к функциональному источнику одиночных фотонов и обосновывается целесообразность использования в качестве такового квантовых точек, даются представления о методах корреляционной оптической спектроскопии, позволяющей определить степень соответствия излучения однофотонной статистике. В качестве продуктивного

варианта рассматривается генерация излучения посредством фотолюминесценции полупроводниковых квантовых точек и приема излучения с использованием наноантенн и сверхпроводящих устройств [7].

В части обучения методам квантовых-оптических технологий, используемых в решении задач действия, в работе рассматривается лазерный метод высокоточного поражения, в основе принципа которого лежит конструктивная интерференция лазерных пучков [8].

В курсе физика при изучении явления интерференции в логике задачно-деятельностного подхода производится оценка достигаемой интенсивности излучения и анализируются возможности повышения ее концентрации в центральном пике интерференционной картины и сужения этого пика. В разделе, посвященном основам квантовой электроники, изучается устройство волоконного лазера как отвечающего предъявляемым к источнику боевого назначения требованиям, включая одномодовость излучения. В качестве средства достижения последней рассматривается применение резонатора с отражателем в виде решетки с периодически изменяющимся показателем преломления, что обеспечивает селективность отражения падающего излучения.

Литература

[1] Ципенюк Ю.М. Квантовая микро- и макрофизика. Москва, Физматкнига, 2006, 640 с.

[2] Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Москва, Высшая школа, 2001, 573 с.

[3] Photonic crystals: Advances in design, fabrication, and characterization. Ed. By K. Busch, S. Lölkes, R.B. Wehrspohn, H. Föll. Wiley-VCH, 2004, 354 p.

[4] Ивлев А.А., Артеменко В.Б. Онтология военных технологий: основы, структура, визуализация и применение. Вооружение и экономика, 2011, № 4 (16), с. 35–52.

[5] Медведев А., Гринкевич А., Князева С. Современные подходы к созданию пассивных дальномеров. Фотоника, 2017. № 8, с. 30–37.

[6] Козубов А.В., Гайдаш А.А., Крынёв С.М., Егоров В.И., Иванова А.Е., Глейц А.А., Мирошниченко Г.П. Основы квантовой коммуникации: Ч. 1. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2019, 85 с.

[7] Однофотонные источники для квантовой криптографии в атмосферных и волоконно-оптических линиях связи. Санкт-Петербург, Физико-технический институт имени А.М. Иоффе, 2018, с. 345–347.

[8] Плюснин Н.И., Спирин М.С., Калинин С.В. Технология передачи лазерных лучей в атмосфере и их объединения на удаленном расстоянии. Инновационный вестник, 2021, № 1, с. 47–51.

УДК 378.14

Фонд оценочных средств в системе ФГОС ВО 3++

Харитонов Александр Олегович alharitonov@yandex.ru
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Бусыгина Елена Борисовна bus-elena3@yandex.ru
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Никитина Ольга Александровна line_av@mail.ru
МГТУ им. Г.И. Носова

Масленников Игорь Марселевич tookai88@gmail.com
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Представлены результаты анализа изменений по формированию оценочных средств достижения студентами компетенций после введение в действие федеральных образовательных стандартов высшего образования поколения 3++. Отмечен ограниченный выбор компетенций из перечня универсальных и общепрофессиональных компетенций стандартов для фундаментальных и общеинженерных дисциплин. Предложено вернуться к формированию оценочных средств с привязкой к программе дисциплины.

Ключевые слова: *образовательные стандарты, оценочные средства, компетенции, программа дисциплины*

Оценочные средства как инструмент контроля знаний студентов существовали всегда в форме зачетных заданий и экзаменационных билетов. Их содержательную часть определял преподаватель согласно рабочей программе курса. После одобрения методическим семинаром кафедры заведующий допускал к использованию в учебном процессе оценочные средства. С внедрением в учебный процесс требований Болонского соглашениями образовательными стандартами третьего поколения формально процедура создания и использования оценочных средств осталась неизменной, но их содержание качественно изменилось. Теперь оценочные средства представляют собой индикаторы достижения компетенций, закрепленных учебным планом данного направления подготовки за каждой его дисциплиной.

Изменения явились следствием новой редакции самих стандартов. Представление результатов обучения по этим нормативным документам форме навыков, знаний и умений должно было отобразиться и в содержании оценочных средств. Если предположить что знания студент получает на лекциях, умения достигаются на семинарских занятиях, а навыки приобретаются при выполнении работ лабораторных практикумов то все это в той или иной форме должны быть отражено оценочных в фондах средств. Тестовые задания Рособрнадзора для проверки статочных знаний студентов, предшествующие лицензированию и аккредитации учебных заведений, в какой-то степени соответствует такому построению. Поэтому основным наполнением фонда оценочных средств должен стать контроль качества знаний, оценка умений и подтверждение навыков, полученных студентами при изучении данного курса.

Еще одним назначением фонда оценочные средства является проверка достижения студентами компетенций, указанных выше по каждой дисциплине учебного плана. Компетенции как обобщенная цель изучения были приняты образовательными стандартами третьего поколения. Методическую их незавершенность предполагалось

преодолеть в образовательных стандартах поколения 3+. Особую трудность представляла собой отработка компетенций фундаментальных и общеинженерных дисциплин. С ведением в действие образовательных стандартов поколения 3++ эта проблема усложнилась многократно. Последнее объясняется тем, что эти стандарты поколения 3++ в большей степени, чем прежде, ориентированы на профессиональные стандарты соответствующей группы специальностей, а их компетенции во многом совпадают или просто заимствованы из профессиональных стандартов.

Стандарты нового поколения отдают приоритет профессиональный подготовке студентов и уменьшают значение фундаментальный. Это повлекло за собой сокращение числа часов на первом и втором курсе по фундаментальным и общеинженерным дисциплинам. Соответственно и большей проблемой стало назначение компетенций для этих дисциплин из-за их чрезмерной общности. Так наиболее близкой к курсу «Инженерная графика» по содержанию компетенцией действующего образовательного стандарта по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» является общепрофессиональная компетенция ОПК-1 «… применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности». Это верно, но применительно к указанному курсу является достаточно общим. Поэтому выбор оценочных средств как индикаторов достижения компетенции вновь определяется рабочей программой курса, квалификацией и опытом работы преподавателя.

В нынешнем учебном году Рособрнадзор внес изменения в оценочные средства дисциплин, дополнив их требованием обязательного тестирования знаний студентов наряду с выполнением зачетных заданий или ответа по экзаменационным билетам. Тестирование, как дополнение к итоговому контролю знаний, в полной мере соответствует Болонскому соглашению в сфере образования. Кроме того, оно исключит, по существу, дублирование оценок пятибалльной системы простым переводом по шкале этой оценки в баллы. Должно быть определено и время проведения тестирования. Дополнительные временные затраты на тестирование в зачетную неделю при чрезмерной занятости студентов в этот период могут отрицательно сказаться на готовности студентов к экзаменационной сессии. Сокращение времени на подготовку к экзаменам для проведения тестирования в экзаменационную сессию также нежелательно.

Реально оценивая все организационные и методические сложности, связанные с рассмотренным дополнением фонда оценочных средств, можно надеяться на то, что оно приведет к большей объективности оценки знаний студентов.

Литература

[1] Аристова Е.П., Аристов В.М., Харитонов А.О. Формирование профессиональных компетенций на основе обобщенных трудовых функций. Компетентность, 2018, № 1 (152), с. 4–7.

[2] Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования — бакалавриата по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование. М., 7.09.2001. URL: https://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak/ 150302_B_3_07092021.pdf (дата обращения 30.09.2022).

[3] Аристова Е.П., Аристов В.М., Харитонов А.О. Формирование индикаторов достижения профессиональных компетенций. Компетентность, 2019, № 3, с. 22–25.

[4] Харитонов А.О. Образовательные стандарты в системе высшего образования: кадровое соответствие. Компетентность, 2021, № 9-10, с. 6–8.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Состав организационного и программного комитетов 4

Секция 3.
Фундаментальные проблемы создания новой техники 5

Болдырев В.С., Савина А.С., Богатов Н.А., Зоткин А.П., Пентюхин Е.И., Халаджан Е.А. Исследование влияния технологических факторов на защитные свойства энергоресурсоэффективных лакокрасочных покрытий 7

Браже Р.А., Лебедев Е.Ю., Фуфаев И.В. Недиссипативные необратимые процессы в наномасштабных линиях передачи 12

Браже Р.А., Долгов Д.А., Лебедев Е.Ю. О необходимости учета квантово-размерных эффектов при расчете характеристик наномасштабных линий передачи 16

Винтайкин И.Б., Назолин А.Л., Морозов А.Н., Глушков В.Л., Голяк Ил.С., Свирин В.В., Фуфурин И.Л., Анфимов Д.Р., Голяк Иг.С. Стенд оптического обнаружения беспилотных летательных аппаратов в видимом и УФ-диапазоне 21

Голяк И.С., Назолин А.Л., Морозов А.Н. Система сбора и обработки данных высокочастотных гравитационных волн 24

Горячева В.Н., Костылев И.Г., Елисеева Е.А., Карнюшкин А.И. Способы изготовления металлических пен 29

Дементьева О.Ю., Тимченко С.Л., Боровикова М.М., Павлючкова А.В., Цветкова А.А. Определение КПД солнечной батареи при искусственном освещении 32

Дёмкин П.П., Анфимов Д.Р., Голяк Иг.С., Голяк Ил.С., Гылка Р.А., Карпов И.А., Морозов А.Н., Небритова О.А., Фуфурин И.Л. Разработка и юстировка квантового каскадного лазера 37

Ерофеев В.И. Устойчивость и волновая динамика высокоскоростных объектов, движущихся по упругим направляющим 41

Жданова Ю.И., Мошкин В.В., Романов М.П. Алгоритм непрямого управления антропоморфным захватом по параметру усилия на выходном звене 50

Задорожный Е.Н., Винтайкин И.Б. Измерение расстояния до беспилотного летательного аппарата с помощью твердотельного лазерного дальномера и определение его размеров с помощью видеокамеры видимого и ближнего ИК-диапазона 54

Инфимовский Ю.Ю. Влияние воздуха, растворенного в жидкости, на эффективность измельчения непроводящих материалов электрогидравлическим способом 57

Клюев С.Б., Иовдальский В.А., Налогин А.Г. Влияние размеров щели на характеристики модифицированной симметричной щелевой линии 60

Кожевников Д.А., Кулагин И.Ю., Ермоленко А.В., Матросова И.А. Автоматизированная система очистки воздуха от радона и дочерних продуктов его распада 65

Кокин С.М. Использование вращающегося электрического поля для возбуждения предпробойного свечения порошкового ZnS, Cu люминофора 68

Кузнецов В.В., Андреев В.В. Исследование необратимых процессов деградации полупроводниковых приборов при воздействии электростатического разряда..... 73

Куракин В.В. Решение задачи рационального проектирования фермы космического аппарата с учетом необратимого поведения при нагружении 77

Кутлубаев И.М., Дудоров Е.А., Богданов А.А. Выбор структурной схемы привода манипулятора 83

Лепешкин А.Р. Исследования теплопроводности и электронной эмиссии образцов деталей при высокочастотных механических колебаниях 86

Митюшев Н.Д. Фоторезистивные структуры на основе восстановленного оксида графена и углеродных наночастиц 90

Назолин А.Л. Контроль и диагностика валопроводов турбоагрегатов по крутильным колебаниям 93

Низиенко М.О., Смирнов А.Е., Севальнёв Г.С. Исследование упрочняющего эффекта при химико-термической обработке дуплексных сталей, легированных редкоземельными металлами и кобальтом..... 97

Николаев П.П., Гордин М.В., Гладышев В.О., Кауц В.Л., Литвинов Д.А., Шарандин Е.А. Применение дипольной анизотропии реликтового излучения в задачах навигации и ориентации 100

Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В. К вопросу о предельной удельной электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода для системы преобразования тока энергодвигательной установки 104

Потапов А.А. Фрактальные информационные технологии: современное состояние и перспективы развития 107

Рахимов Д.Р., Зимин В.Н., Кувыркин Г.Н. Расчет на прочность баллона высокого давления с металлическим лейнером..... 116

Селиванов А.Б., Турчанинов С.О. Возможность изготовления наноспутника в единой цепочке технологических операций 120

Семиколенов А.В. Не реактивная сила отталкивания в неоднородном гравитационном поле..... 123

Соломашенко А.Б., Шишова М.В., Афанасьева О.Л. Особенности разработки оптических волноводов для устройств дополненной реальности..... 128

Харитонов А.О., Бусыгина Е.Б., Никитина О.А., Масленников И.М. Численное исследование неопределенности коэффициента истечения цилиндрических сопел 130

Секция 4.
Необратимые оптические процессы 137

Болоцкова П.Н., Бункин Н.Ф., Козлов В.А. Особенности взаимодействия аминокислот с полимерной мембраной Нафиона в зависимости от изотопного состава жидкой матрицы 139

Боритко С.В., Иванов С.И., Богданова Т.В. Некоторые возможности модуляционной акустооптической спектрометрии 143

Герасимов Р.Ю., Бункин Н.Ф. Изучение специфических ионных эффектов в водных растворах солей щелочных металлов 147

Дайбаге Д.С., Захарчук И.А., Осадченко А.В., Гехт М.Э., Селюков А.С., Амброзевич С.А., Скориков М.Л., Васильев Р.Б. Люминесценция ультратонких наночастиц селенида кадмия планарной геометрии 152

Заниздра С.Р., Метлин М.Т., Коршунов В.М., Тайдаков И.В. Эффект фторирования лигандов из класса 1,3-дикетонов в процессах переноса энергии в комплексах европия 155

Захарчук И.А., Дайбаге Д.С., Осадченко А.В., Селюков А.С., Мосягина И.В., Амброзевич С.А., Гехт М.Э., Ивкина О.В., Данилкин М.И. Замена тканеэквивалентных термолюминесцентных детекторов для космической дозиметрии: тетрабораты лития и магния против фтористого лития 158

Игнатенко Д.Н., Асташев М.Е., Шкирин А.В. Измерение содержания жира и крупномасштабных примесей в молоке с помощью лазерной скаттерометрии 161

Исмаилов С.М., Бункин Н.Ф., Козлов В.А., Болоцкова П.Н. Эффекты деполяризованного рассеяния низкочастотного излучения на анизотропных металлических наночастицах при набухании полимерной мембраны в воде с разным изотопным составом 166

Карпов И.А., Фуфурин И.Л., Небритова О.А., Анфимов Д.Р., Дёмкин П.П. Разработка подхода по осушению пробы выдыхаемого воздуха человека 173

Колпаков А.В., Турчанинов С.О., Щербаков М.И. Исследование возможности мультимодального применения спектроскопии обратного рассеяния и термографии для раннего обнаружения очагов воспаления в биологических тканях 177

Коршунов В.М., Тайдаков И.В. Моделирование электронной структуры и процессов переноса энергии в комплексах иона Eu(III) 181

Кравченко А.О., Бункин Н.Ф., Козлов В.А., Болоцкова П.Н. Набухание полимерной мембраны в воде с разным изотопным составом; управление динамикой люминесценции с помощью ультразвуковых волн 184

Кудрявцева А.Д., Чернега Н.В., Тареева М.В., Уманская С.Ф., Шевченко М.А., Матрохин А.А. Генерация второй гармоники в замороженной суспензии частиц ниобата лития 193

Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Болдырев К.Н., Манжос О.А., Громков А.С. Исследование низкочастотной области инфракрасных спектров в жидких аренах и их галогеносодержащих 197

Осадченко А.В., Дайбаге Д.С., Захарчук И.А., Селюков А.С., Амброзевич С.А., Гехт М.Э., Певцов Н.В., Певцов Д.Н., Рыжов А.В. Люминесценция новых координационных соединений европия 201

Пеньков Н.В. Терагерцовая динамика воды в гидратных оболочках биомолекул..... 205

Поликовский Т.А., Коршунов В.М., Тайдаков И.В. Влияние центрального иона на фотолюминесцентные свойства органического лиганда из класса 1,3-дикетонов в составе координационных соединений редкоземельных ионов 208

Пясецкий В.Б. Расчетные методики современной визуальной фотометрии 212

Светличный С.И., Дроздов М.С. О хемилюминесценции в газовых взрывах высокого и низкого давлений 217

Скрабатун А.В., Маслов А.Г., Шарандин Е.А., Гладышев В.О., Николаев П.П. Влияние микробиологического поражения на спектральные характеристики плодов винограда в оптическом диапазоне 221

Скрабатун А.В., Пятышев А.Ю. Комбинационное рассеяние в кристаллах хлористого аммония, легированных ионами меди и кобальта 225

Тимченко С.Л., Бункин Н.Ф., Козлов В.А., Гладышева Я.В., Болоцкова П.Н. Адсорбция метиленового синего на поверхности полимерной мембраны при разном изотопном составе водного раствора 228

Филатов В.В., Крупская А.Е. Расчет достижимости предела Швингера в абсолютно черном теле на основе твердотельной микрополости с зеркальными стенками 233

Филатов В.В., Волкова В.В. Резонансная фотонная ловушка для контроля изотопного состава тяжелой воды 237

Филатов В.В., Корец Д.А., Дащинский А.А. Одноосцилляторная модель распространения оптического поля в метаматериале с одномерной пространственно-периодической сверхструктурой 240

Цориева А.В., Коршунов В.М., Тайдаков И.В. Влияния тяжелых гетероатомов на процессы переноса энергии в координационных соединениях иона Eu(III) 244

Яшин М.М., Юрасов А.Н., Телегин А.В., Лобов И.Д., Самардак А.С., Сайфулина Д.А. Особенности магнитооптических спектров экваториального эффекта Керра гранулированного сплава на основе CoPt 247

Секция 5.
Научно-методические проблемы преподавания естественнонаучных дисциплин 251

Бабаева М.А. Коллективное взаимообучение студентов основам естествознания в дистанционном формате 253

Бабаева М.А., Голубев Е.Б. «Вуз без профессоров» успешно работал по программам Московского высшего технического училища 256

Бадаев Ю.Л. Специальная теория относительности и ее представление в современном высшем техническом образовании 259

Веретимус Д.К., Веретимус Н.К. Роль учетной недели в лабораторном практикуме по физике 263

Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. О влиянии контролируемой самостоятельной работы студента на его успеваемость 265

Гладышева Я.В., Комкова Т.Ю., Задорожный Е.Н. Программа дополнительного образования в рамках сотрудничества МГТУ им. Н.Э. Баумана и ПАО «Газпром» 267

Двуличанская Н.Н. Дистанционное обучение в вузе: за и против 270

Еркович О.С., Поздышев М.Л. Тестирование остаточных знаний студентов первого курса технического университета как инструмент менеджмента качества высшего образования: физика 273

Заблоцкий В.Р. Образовательная манга — японский учебный ресурс по курсу общей физики для студентов 276

Калугина Л.И. Образовательные цифровые ресурсы для повышения качества образования 282

Козырев А.В., Поздышев М.Л., Басак Авишак. Квадрупольная микроволновая диагностика неоднородных плазменных образований 289

Купавцев А.В. Мышление и когнитивное познание 293

Лукашевич С.А. Применение графических методов в определении критической напряженности магнитного поля у ферромагнетиков 297

Окс Е.М. Организация учебного процесса по физике в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники 300

Орешкина О.А., Шаповал В.Н. Ключевые аспекты обучения химии студентов с нарушением слуха в инклюзивных программах инженерного образования 303

Пауткина А.В., Кокин С.М., Андреев А.И. Участие кафедры «Физика» в мероприятии «Ночь в музее» в техническом университете 306

Савина А.С., Богатов Н.А., Пентюхин Е.И., Зоткин А.П., Болдырев В.С. Контролируемая самостоятельная работа обучающихся на занятиях семинарского типа по физике как элемент индивидуальной образовательной траектории 309

Симонян Г.К. Неочевидная связь между коэффициентами оценочной регрессионной модели скорости звука в жидкой воде с особой точкой минимальной теплоемкости при нормальном давлении 312

Смирнов Е.В. Исследование волновых свойств антиматерии 317

Смирнов Е.В. Изучение волновых свойств крупных молекул с помощью интерферометра Капицы — Дирака — Тальбота — Лоу 320

Тимченко С.Л., Задорожный Н.А., Лебедев А.В. Модернизация теплового модуля для двигателя Стирлинга 323

Тимченко С.Л., Задорожный Н.А., Фролов М.В. Стенд для исследования характеристик солнечных панелей 328

Титов К.В. Модель движения упругого тела в гравитационном поле 333

Ханин С.Д., Остроумова Ю.С., Костарев С.В. Фундаментальные основы и методы новых технологий в преподавании физики в военно-инженерном вузе 339

Харитонов А.О., Бусыгина Е.Б., Никитина О.А., Масленников И.М. Фонд оценочных средств в системе ФГОС ВО 3++ 342

Научное издание

НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

ДВЕНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

31 января — 3 февраля 2023 года

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 2

Художник *Я.М. Асинкритова*
Компьютерная верстка *Е.В. Ляшкевич*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 09.01.2023. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 28,44. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1.
info@bmstu.press
https://bmstu.press

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1.
baumanprint@gmail.com