КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРС МОЛОДЫХ ФИЗИКОВ

23 декабря 2021 г. Московское физическое общество, Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) и АО «НИИ ПОЛЮС» имени М.Ф. Стельмаха» провели в Колонном зале ФИАН конкурс-конференцию научных работ студентов, аспирантов и молодых специалистов учебных и научно-исследовательских институтов по различным разделам физики. В отборочный комитет конференции-конкурса поступили тезисы 23 докладов.

ПРОГРАММНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Шапочкин М.Б. **(председатель)**, д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН – председатель Правления МФО

Савинов С.Ю., д.ф.-м.н., проф. – помощник директора ФИАН по научной работе

Амиров Ильдар Искандерович, д.ф.-м.н., проф., ЯрГУ им. Демидова, Комиссии по развитию высшего образования и науки Общественной Палаты РФ

Есаков А.А. – ст. преп., кафедра физики МГТУ им. Н.Э. Баумана

Морозов А.Н., д.ф.-м.н., проф. – заведующий кафедрой физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корр. РАН, МФО

Казенков О.Ю. – директор Русского академического фонда, зам. по развитию Технопарка «Полюс»

Кондратюк Н.Д., с.н.с., Объединенный институт высоких температур РАН

Кузнецов Е.В., д.т.н., проф. – руководитель Центра НТИ «Фотоника» Инженерной академии РУДН

Массалимов Б.И., аспирант, Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Мастюкова А.С., студент, м.н.с. РКЦ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российский квантовый центр

Павлов С.В., аспирант, Объединенный институт высоких температур РАН

Разумный Ю.Н., д.т.н., проф., директор Инженерной академии РУДН

Русаков А.И., д.х.н., проф., ректор ЯрГУ им. Демидова, заместитель председателя Комиссии по развитию высшего образования и науки Общественной Палаты РФ

Сардов П.А., студент, Объединенный институт высоких температур РАН

Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, член комитета по образованию и науке Государственной Думы ФС РФ, МФО

Синельников Антон Олегович, к.т.н., АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ученый секретарь конференции – *Моргун Л.А.*, м.н.с. ФИАН, МФО

КОНКУРСНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель секции Фундаментальная физика – *Шапочкин М.Б.*, д.ф.-м.н., проф., академик РАЕН, председатель Правления МФО
– *Голубков Г.В.*, д.ф.-м.н., проф. – гл.н.с. Института химической физики, академик РАЕН
– *Норман Г.Э.*, д.ф.-м.н., проф. – заведующий международной лабораторией суперкомпьютерного атомистического моделирования и многомасштабного анализа НИУ ВШЭ
Секретарь секции *Моргун Л.А.*, м.н.с. ФИАН, МФО

Председатель секции Фундаментальные основы инженерных наук (Прикладная физика) – Морозов А.Н., д.ф.-м.н., проф. – заведующий кафедрой физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корр. РАН, академик РАЕН, МФО
– *Голубков М.Г.* – д.ф.-м.н., гл.н.с. Института химической физики
– *Максимычев А.В.*, д.ф.-м.н., проф. – зав. кафедрой общей физики МФТИ
Секретарь секции *Есаков А.А.,* ст. преп., кафедра физики МГТУ им. Н.Э. Баумана

Председатель секции Инновации и техническое предпринимательство в физических исследованиях – *Кузнецов Е.В.*, д.т.н., проф. – руководитель Центра НТИ «Фотоника» Инженерной академии РУДН
– *Песоцкий Ю.С.* – д.п.н., проф. заведующий кафедрой «Инновационное предпринимательство», МГТУ им Н.Э. Баумана
– *Мармалюк А.А.* – д.т.н., проф., МФТИ, АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»
Секретарь секции *Синельников А.О.*, к.т.н., АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Памятными дипломами также награждены молодые физики, занявшие вторые и третьи места. В сборнике, выпущенном до начала конкурса, опубликованы тезисы работ всех участников конкурса-конференции. Сборник является специальным выпуском журнала «Физическое образование в вузах», который является реферируемым и входит в список ВАК Российской Федерации. Все участники конференции получили твердую копию и, по желанию, электронную версию этого сборника. Редакция журнала «Физическое образование в вузах» и МФО благодарят всех участников конференции-конкурса и желают им дальнейших успехов в учебе и научной работе.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 533.951.7

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДИНАМИКИ БЛОБОВ НА ПЕРИФЕРИИ ТОКАМАКА Т15-МД

Алексей Борисович Ляшенко[1], Андрей Алексеевич Пшенов[1,2], Александр Александрович Степаненко[1]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: ablyashenko@mephi.ru

[2] Российский научный центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Проведено численное моделирование электромагнитной динамики блобов (плазменных филаментов) на периферии токамака Т15-МД. Расчёт проведён в турбулентном коде BOUT++ с учётом геометрии установки и распределения профилей параметров плазмы, полученных в двумерном транспортном коде SOLPS4.3. Рассчитаны скорости движения блобов и связанные с ней потоки вещества, определены области наиболее интенсивного взаимодействия филаментов с первой стенкой установки.
Ключевые слова: плазма, управляемый термоядерный синтез, токамак, блобы, филаменты, моделирование, BOUT++, SOLPS, Т15-МД.

Активное взаимодействие плазмы с материалами первой стенки токамака – одна из основных проблем, стоящих на пути реализации управляемого термоядерного синтеза. Значительные потоки энергии и частиц на стенки установки могут приводить к деградации материала вплоть до необходимости вывода установки из эксплуатации. Так, в ITER первая стенка способна работать при потоках энергии, не превышающих 10–15 МВт/м^2 [1].

В работе [2] было показано, что в пристеночной плазме токамаков до половины от общих потоков энергии и частиц, попадающих на стенки токамаков, может переноситься за счёт трёхмерных структур – плазменных филаментов, или блобов. Это вытянутые вдоль линий магнитного поля образования, характеризующиеся большей плотностью и температурой, чем окружающая их плазма. Блобы обвивают плазменный шнур токамака, дрейфую поперек магнитных поверхностей во время своего движения. Если в результате движения часть блоба попадёт на стенку, на поверхности стенки возникнут сильно локализованные, с характерным линейным масштабом порядка радиуса блоба, потоки частиц и энергии. Предсказание этих потоков является важной задачей для реализации управляемого термоядерного синтеза.

В настоящей работе смоделирована динамика плазменных филаментов на периферии токамака Т15-МД. Для расчётов использован трёхмерный турбулентный код BOUT++ и электромагнитная модель динамики филаментов, поскольку, как показано в работе [3], периферическая плазма токамака Т15-МД, хоть и характеризуется малым отношением давления плазмы к магнитному давлению: $\beta < \frac{m_e}{m_i}$, обладает высокой температурой электронов, приводящей к эффективному «вмораживанию» линий магнитного поля в плазму филаментов. В расчёте учтены распределения параметров пристеночной плазмы по сечению плазменного шнура, рассчитанные в двухмерном транспортном коде SOLPS4.3, а также реальная геометрия первой стенки установки. Определены области преимущественного взаимодействия блобов с первой стенкой токамака. Рассчитаны скорость движения филаментов и связанные с ней потоки плазмы.

Работа выполняется при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук, грант № МК-5753.2021.1.2.

Литература

1. *Pitts, R.A., et al.* Physics basis for the first ITER tungsten divertor. – Nuclear Materials and Energy 20 (2019): 100696.
2. *A. Loarte, B. Lipschultz, A.S. Kukushkin et al.,* Chapter 4: Power and particle control. Nuclear Fusion. 2007.Vol 47. P. S203-S263.
3. *Stepanenko, A.A.* Impact of electromagnetic effects on macroscopic dynamics of blobs in hot low-β edge plasma of fusion devices. Physics of Plasmas 27, 9 (2020): 092301.

Numerical Study of Blobs Electromagnetic Dynamics on the Periphery of the Tokamak T15-MD

A.B. Lyashenko[1], A.A. Pshenov[1,2], A.A. Stepanenko[1]

[1] NRNU «MEPhI»
115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31
E-mail: ablyashenko@mephi.ru
[2] NRC «Kurchatov Institute»
123182, Moscow, Akademika Kurchatova, 1

Received October 15, 2021 PACS: 52.65.–y

A numerical study of blobs (plasma filaments) electromagnetic dynamics on the plasma periphery of the T15-MD has been performed. Turbulent code BOUT++ was used for the calculations. We have considered the tokamak geometry and the distribution of the profiles of the plasma parameters obtained in the two-dimensional transport code SOLPS4.3. Blobs velocities and plasma flux associated with them were calculated. The regions of the most intense interaction of filaments with the first wall of the installation are determined.

Keywords: plasma, controlled thermonuclear fusion, tokamak, blobs, filaments, modeling, BOUT++, SOLPS, T15-MD.

References

1. *Pitts, R. A., et al*. Physics basis for the first ITER tungsten divertor. – Nuclear Materials and Energy 20 (2019): 100696.
2. *Loarte, B. Lipschultz, A.S. Kukushkin et al.,*Chapter 4: Power and particle control. Nuclear Fusion. 2007.Vol 47. P. S203-S263.
3. *Stepanenko, A. A.* Impact of electromagnetic effects on macroscopic dynamics of blobs in hot low-β edge plasma of fusion devices. Physics of Plasmas 27, 9 (2020): 092301.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 539.143.5

СРАВНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ПРОТОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $n^{12}C$ И $p^{12}C$ ПРИ 4,2 ГэВ/с

Зоир Мамасолиев[1], Нодирбек Эшпулатов[1], Зафар Шарипов[1], Хажиакбар Туратов[1], Бекмирзаев Рахматилла[1], Кахрамон Маматкулов[1,2]

[1] Джизакский государственный педагогический институт
130100 Республика Узбекистан, г. Джизак, Ш. Рашидов, 4,

[2] Объединенный Институт Ядерных Исследований
141980 Россия, Московская область, г. Дубна;
e-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Приведены результаты сравнительного анализа средних кратных протонов, π^+ и π^- мезонов в столкновениях $n^{12}C$ и $p^{12}C$ при 4,2 ГэВ/с. Также были исследованы корреляции между множественностью протонов и наличием ($n(\pi^-) \geq 1$) (или отсутствия ($n(\pi^-) = 0$)) в случае отрицательного пиона. Найдены доли событий с $n(\pi^-) = 0$ и $n(\pi^-) \geq 1$. Обнаружены положительные корреляции между средней множественностью протонов и числом отрицательных пионов в обоих типах столкновений. Эти корреляции связаны с неупругой перезарядкой нейтрона на протон и π^- мезон и / или с образованием и последующим распадом изобары Δ^0.

Ключевые слова: пузырьковая камера, пионы, нейтрон, протон, ядро, множественность, корреляции, неупругая перезарядка, изобара Δ^0.

Взаимодействие протонов высоких энергий с нуклонами и ядрами достаточно хорошо изучено экспериментально в широком диапазоне первичных энергий, а из-за трудностей получения монохроматических пучков нейтральных частиц экспериментальная информация о столкновениях нейтронов с ядрами (nA), полученная в условиях 4p-геометрия очень скудна [1] и основана на небольшой статистике. Поэтому получение экспериментальных данных о pA-столкновениях и сравнение их с данными о pA-взаимодействиях при той же энергии и для того же ядра-мишени представляет значительный интерес. Данная работа продолжает наши исследования [2, 3] и посвящена сравнительному анализу множественности протонов и заряженных пионов, образующихся в столкновениях $n^{12}C$ и $p^{12}C$ при импульсе 4,2 ГэВ/с.

Экспериментальный материал был получен с помощью двухметровой пузырьковой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), облученной пучками протонов, ядер дейтронов ($d = {}^2H$) и гелия-4 на импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон на синхрофазотроне в Дубне. Методологические особенности эксперимента и подробные данные о поправках на потерю вторичных заряженных частиц обсуждаются в [2].

Взаимодействия нейтронов с ядрами углерода были извлечены из столкновений дейтронов и ядер ^{4}He с ядрами углерода путем наблюдения их характерной особенности – присутствия в этих событиях протона-наблюдателя и ядра ^{3}He соответственно.

В таблице представлены средние множественности протонов, π^- и π^+ мезонов во взаимодействиях p^{12}C и n^{12}C при 4,2 ГэВ/с.

Ценить	Тип столкновения	
	p^{12}C	n^{12}C
$\langle n_p \rangle$	1.92 ± 0.02	1.65 ± 0.02
$\langle n(\pi^-) \rangle$	0.36±0.02	0.64±0.02
$\langle n(\pi^+) \rangle$	0.63±0.02	0.37±0.02

Из таблицы видно, что в столкновениях p^{12}C доля событий без отрицательных пионов в 2.2 раза больше, чем с рождением π– мезонов, тогда как в столкновениях n^{12}C доли событий с отрицательными пионами или без них близки друг к другу. Этот факт может быть связан с существованием дополнительного механизма образования отрицательных пионов за счет неупругого перехода исходного нейтрона в протон и π– мезон в столкновениях n^{12}C. Мы также видим, что средняя множественность протонов в обеих реакциях значительно больше для событий с образованием отрицательных пионов. Очевидно, это связано с тем, что часть отрицательных пионов возникает в результате неупругих переходов снаряда нейтрона (в первом случае) и нейтронов мишени (в обоих случаях) в протон и π– мезон. Из таблицы следует, что независимо от наличия отрицательных пионов в конечном состоянии средняя множественность протонов во взаимодействиях p^{12}C значительно больше, чем в столкновениях n^{12}C. Это наблюдение можно объяснить более высокой вероятностью (0,64) сохранения исходного протона в столкновениях p^{12}C по сравнению с вероятностью превращения исходного нейтрона в протон в столкновениях n^{12}C, равной 0,36.

В этой работе мы представили новые данные о взаимодействии нейтронов с ядрами углерода при 4,2 ГэВ/с. Проведен сравнительный анализ средних множественностей протонов и заряженных пионов, рожденных в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с. Мы исследовали корреляции между средней множественностью протонов и наличием отрицательных пионов в конечном состоянии рассматриваемых взаимодействий. Средняя множественность протонов в столкновениях p^{12}C больше, чем во взаимодействиях n^{12}C, что связано с различием вероятностей сохранения протона в первом случае и перезарядки первичного нейтрона на протон во втором.

Положительные корреляции наблюдались между средней множественностью протонов и наличием отрицательных пионов в рассматриваемых взаимодействиях. Эти

корреляции связаны с неупругой перезарядкой нейтрона на протон и $\pi-$ мезон и/или с образованием и последующим распадом изобары Δ^0.

Литература

1. *Olimov K. et al.* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
2. *Bekmirzaev R. N. et al.* Physics of Complex Systems. Vol. 2, No. 3 (2021).
3. *Olimov K. et al.,* International Journal of Modern Physics E Vol. 29, No. 6 (2020).

Comparison of Multiplicities of Protons and Charged Pions in $n^{12}C$ and $p^{12}C$ Collisions at 4.2 GeV/c

Rahmatilla Bekmirzaev, Zoir Mamasoliev[1], Nadirbek Eshpulatov[1],
Zafar Sharipov[1], Xajiakbar Turatov[1],
Kahramon Mamatkulov[1,2]

Jizzakh State Pedagogical Institute, 130100, Jizzakh, Sh.Rashidov 4, Uzbekistan,
E-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Received October 13, 2021 PACS: 82.90.+j

The results of a comparative analysis of the average multiple protons, π^+ and π^- mesons in $n^{12}C$ and $p^{12}C$ collisions at 4.2 GeV/c are presented. The correlations between the multiplicity of protons and the presence ($n(\pi^-) \geq 1$) (or absence ($n(\pi^-) = 0$)) in the event a negative pion were also investigated. The fractions of events with $n(\pi^-) = 0$ and $n(\pi^-) \geq 1$ are found. Positive correlations were found between the average multiplicity of protons and number of negative pions in both types of collisions. These correlations are related with inelastic charge exchange of a neutron into a proton and π^- meson and/or with the formation and subsequent decay of the Δ^0 isobar.

Keywords: bubble chamber, pions, neutron, proton, nucleus, multiplicity, correlations, inelastic charge exchange, Δ^0 isobar.

References

1. *Olimov K. et al.* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
2. *Bekmirzaev R. N. et al.* Physics of Complex Systems. Vol. 2, No. 3 (2021).
3. *Olimov K. et al.,* International Journal of Modern Physics E Vol. 29, No. 6 (2020).

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 538.945

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОГО 2G HTS-ПРОВОДА, С ИЗМЕНЕННОЙ СТЕХИОМЕТРИЕЙ СОСТАВА НА ОСНОВЕ Gd В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Бурхан Исмаилович Массалимов

Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)
119991 Россия, Москва, Ленинский проспект, 53; e-mail: b.massalimov@yandex.ru

Данная работа посвящена исследованию ВТСП провода GdBCO с измененной стехиометрией (+30%Gd) выращенного методом импульсного лазерного осаждения (PLD). Критическая плотность тока, определенная из вольт-амперных характеристик (VCC), была измерена четырехзондовым методом с измерительным током до 100 мА в диапазоне поля от 0 до 9 Тл и при температурах 65 и 77 К.
Ключевые слова: фокусированный ионный пучок, FIB, критический ток.

Крупномасштабное применения сверхпроводимости, такие как физика высоких энергий или термоядерная энергетика требуется создание проводов с высокими значениями плотности критического тока в сильных магнитных полях. Одним из возможных способов решения данной задачи является использование нового класса материалов – высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) проводов 2-го поколения на основе ReBCO (Re-редкая земля).

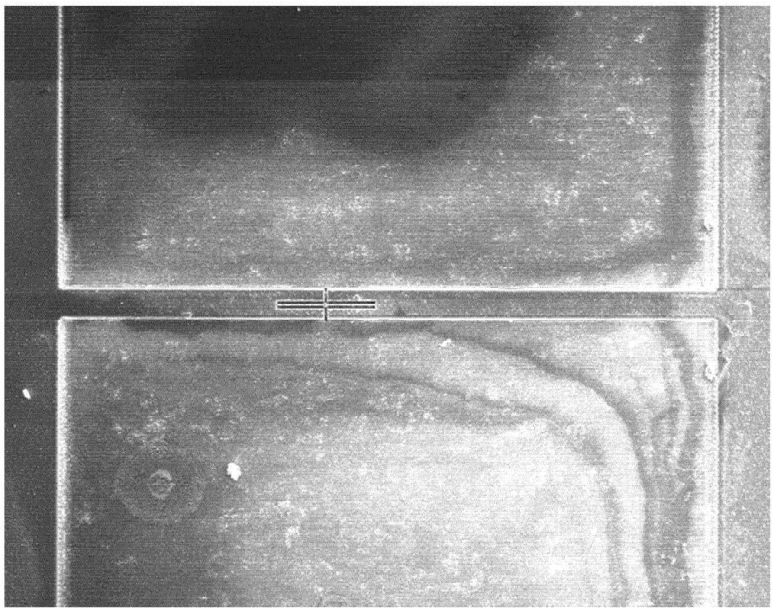


Рисунок 1. Микромостик GdBCO изготовленный из ВТСП провода.

В представленной работе исследовался образец ВТСП провода на основе GdBCO [1] с измененной стехиометрией (+30%). Изменение стехиометрии состава один из способов увеличения за счёт увеличения центров пининга ВТСП и как следствие повышения сверхпроводящих параметров. Исследуемый образец шириной 12 мм ленты модифицировался с помощью лазерной резки и фокусированного ионного пучка (FIB) для образования микромостика шириной 5 мкм и длиной 150 мкм. На полученных микромостиках измерялись ВАХ используя четырех-контактный метод в полях от 0 до 9Т. Магнитное поле направлено вдоль кристаллографической оси с.

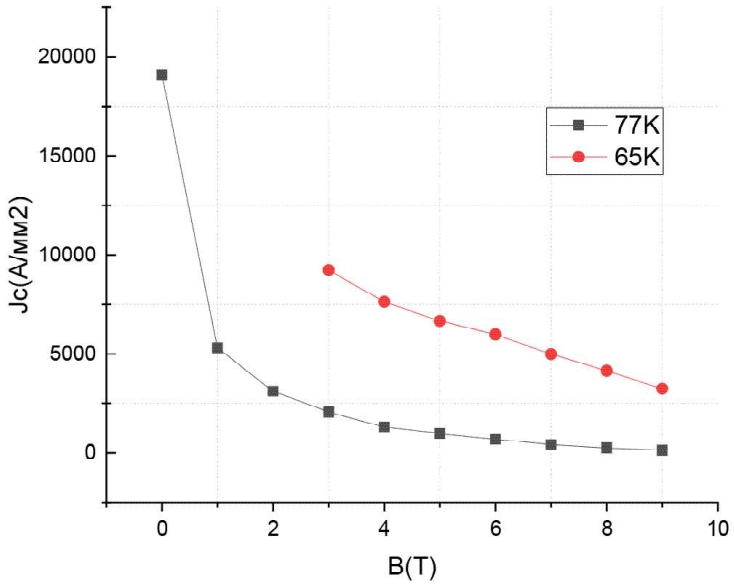


Рисунок 2. Зависимость плотности критического тока от магнитного поля при температурах 65 K и 77 K.

Литература

1. *A. Markelov et al.,* “2G HTS wire with enhanced engineering current density attained through the deposition of HTS layer with increased thickness,” Progress in Superconductivity and Cryogenics, vol. 21, no. 4, pp. 29–33, Dec. 2019.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Investigation of the Critical Current of an Industrial 2G HTS Wire with a Modified Composition Stoichiometry Based on Gd in Strong Magnetic Fields

B.I. Massalimov

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN)
119991 Russia, Moscow, Leninsky prospect, 53;
e-mail: b.massalimov@yandex.ru

Received October 25, 2021 PACS: 74.72.–h

This work is devoted to the study of HTSC wire GdBCO with a modified stoichiometry (+ 30% Gd) grown by pulsed laser deposition (PLD). The critical current density, determined from the current-voltage characteristics (VCC), was measured by a four-probe method with a measuring current of up to 100 mA in the field range from 0 to 9 T and at temperatures of 65 and 77 K.

Keywords: focused ion beam, FIB, critical current.

References

1. *A. Markelov et al.,* "2G HTS wire with enhanced engineering current density attained through the deposition of HTS layer with increased thickness," Progress in Superconductivity and Cryogenics, vol. 21, no. 4, pp. 29–33, Dec. 2019.

УДК 537.874.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КУБИТА В ВОЛНОВОДЕ

Григорий Александрович Матвеев

Национальный исследовательский технологический университет МИСиС
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 4; e-mail: gmatveev00@mail.ru

В работе были исследованы моды волновода, которые менялись на определенных частотах, если внутрь был помещен кубит. Кроме того, эти измененные моды возбуждали ток на СКВИДе и величина тока менялась при разной ориентации E компоненты моды и джозефсоновского перехода. Были исследованы резонансы при разных положениях чипа в волноводе и обнаружен эффект связанных состояний кубита и волновода.
Ключевые слова: кубит, джозефсоновский переход, связанные состояния в континууме.

Целью данной работы является теоретическое исследование запертых мод кубита, так называемых связанных состояний чипа и цилиндрического волновода, поведение резонансов кубита при разном положении в волноводе и определение мод волновода при разных частотах.

Для расчета кубит был представлен в виде двух сверхпроводящих пластин, развернутых в виде плоскопараллельного конденсатора, между которыми джозефсоновский переход был заменен на определенную ёмкость и индуктивность. Эти параметры заложены в дизайне образца.

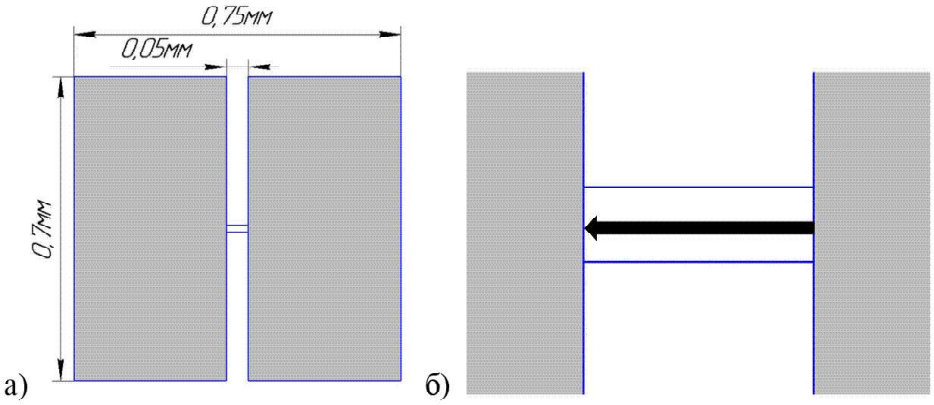


Рисунок 1. Исследуемый кубит: а) общий вид; б) Джозефсоновский переход, СКВИД.

Индуктивность можно оценить по формуле:

$$L = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c \cos(\theta_2 - \theta_1)}. \quad (1)$$

Данная формула показывает зависимость индуктивности от разности фаз волновых функций двух сверхпроводников и критического тока I_c. Параметр I_c равен максимальному току при нулевом напряжении на переходе. Из этого следует, что частота резонанса, при которой через СКВИД течет ток, должна смещаться при изменении индуктивности на чипе. Но кроме того, сдвиг резонанса будет незаметен, если чип будет обладать большой ёмкостью.

При сохраненной симметрии цилиндрического волновода моды кубита оказываются запертыми, то есть нет излучения и резонанса на данной частоте из-за деструктивной интерференции, но при нарушении симметрии, например, из-за сдвига чипа в волноводе от центра вдоль радиуса, такие моды начинают излучать и появляются резонансы. Причем чем дальше устанавливать чип от центра, тем сильнее резонанс, а частота немного сдвигается. Волновод без кубита на всем отрезке исследуемых частот имеет моду TM, но при добавлении кубита в волновод вблизи резонансов мода волновода меняется на TE так, что E компонента повернута вдоль джозефсоновского перехода. При вращении чипа вокруг его центра, таким образом, чтобы изменялась проекция компоненты поля E на джозефсоновский переход, привело к смещению резонансов и их ослаблению. Поэтому, можно сделать вывод, что именно E компонента волны возбуждает ток на СКВИДе.

Отдельный случай, когда чип расположен в центре, но повернут вокруг оси, проходящей вдоль джозефсоновского перехода, то TE мода возбуждается, но повернута E компонентой перпендикулярно переходу, потому что иначе симметрия волновода не нарушается, в итоге, ток через СКВИД не течет, то есть этот резонанс не сдвигается при изменении индуктивности.

Также были посчитаны дипольные разложения для резонансов. Основной вклад вносится электрическим диполем. Благодаря дипольному разложению, рядом с каждым основным резонансом был замечен еще один резонанс, который практически неразличим на спектре прохождения. Причем поле на этом резонансе повернуто на 90 градусов в плоскости перпендикулярной оси волновода, так что E компонента волны перпендикулярна переходу, но данный резонанс сдвигается при изменении индуктивности.

Литература

1. *Rasmus E. Jacobsen, Alex Krasnok, Samel Arslanagić, Andrei V. Lavrinenko, and Andrea Alù* // Boundary-Induced Embedded Eigenstate in a Single Resonator for Advanced Sensing // arXiv:2103.03685 – P. 13 Feb 2021
2. *Hanhee Paik, D.I. Schuster, Lev S. Bishop, G. Kirchmair, G. Catelani, A.P. Sears, B.R. Johnson, M.J. Reagor, L. Frunzio, L.I. Glazman, S.M. Girvin, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf* // Observation of

High Coherence in Josephson Junction Qubits Measured in a Three-Dimensional Circuit QED Architecture // Phys. Rev. Lett. 107, 240501 – Published 5 December 2011

3. *Шульга К.В.* Микроволновое исследование сверхпроводящих когерентных систем и квантовых метаматериалов. – 2016.

Investigation of a Superconducting Qubit in a Waveguide

G. A. Matveev

NUST MISIS
119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 4;
e-mail: gmatveev00@mail.ru

Received July 31, 2021 PACS: 03.75.Lm

In this work were studied the waveguide modes, which changed at certain frequencies if a qubit was placed inside. In addition, this changed mode excited a current on the SQUID and the current value changed with different orientations of the E component of the mode and the Josephson junction. Resonances at different positions of the chip in the waveguide were investigated and the effect of the bound states of the qubit and the waveguide was discovered.

Keywords: qubit, Josephson junction, bound states in the continuum.

References

1. *Rasmus E. Jacobsen, Alex Krasnok, Samel Arslanagić, Andrei V. Lavrinenko, and Andrea Alù* // Boundary-Induced Embedded Eigenstate in a Single Resonator for Advanced Sensing // arXiv:2103.03685 – P. 13 Feb 2021

2. *Hanhee Paik, D.I. Schuster, Lev S. Bishop, G. Kirchmair, G. Catelani, A.P. Sears, B.R. Johnson, M.J. Reagor, L. Frunzio, L.I. Glazman, S.M. Girvin, M.H. Devoret, and R.J. Schoelkopf* // Observation of High Coherence in Josephson Junction Qubits Measured in a Three-Dimensional Circuit QED Architecture // Phys. Rev. Lett. 107, 240501 – Published 5 December 2011

3. *Shulga K.V.* Microwave research of superconducting coherent systems and quantum metamaterials. – 2016.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 621.391, 621.396

СИНТЕЗ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ХАОТИЧЕСКИМ ПОВЕДЕНИЕМ

Ирина Николаевна Москвина

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; e-mail: iren.moskvina@mail.ru

В работе проводится изучение проблемы обнаружения хаотического сигнала в системах передачи данных. Предлагается аналитическое решение автоколебательной системы, в которой могут наблюдаться хаотические колебания, для разрешения поставленной проблемы. Рассмотренный в данной работе метод символического описания хаотических колебаний дает возможность перейти к представлению хаоса как «грубой» структуры сигнала, а не непрерывной последовательности. Результаты работы показали необходимость разрабатывать «грубые» методы приёма и обработки сигнала, а также бессмысленность развития подходов с точной формой хаотических сигналов.
Ключевые слова: хаос, хаотические колебания, автоколебательная система, метод символического описания.

Применение аналитических методов решения для проблемы обнаружения хаотического сигнала является оправданным с точки зрения получения результатов и реализации теоретически предельных характеристик приёма сигнала. Важным отличием исследуемого метода от классического приема регулярных сигналов, для которых благодаря их предсказуемости можно строить согласованные фильтры, опираясь на точную форму сигнала, является новое представление полученного сигнала, что позволяет реализовывать теоретически предельные характеристики приёма сигнала.

Построим модель генератора хаотических колебаний, состоящего из трёх подсистем, совокупность таких подсистем позволяет получить автоколебательную систему, в которой

- Подсистема 1: нелинейный элемент с амплитудным преобразованием $f(z)$ входного сигнала $z(t)$,
- Подсистема 2: RC-фильтр нижних частот,
- Подсистема 3: RLC-фильтр нижних частот.

Такой генератор включает в себя различные хаотические режимы с широкими зонами устойчивости в пространстве управляющих параметров. Каждая из подсистем является четырёхполюсником, значит, опираясь на правила Кирхгофа, можно составить систему уравнений, из которой в дальнейшем получить систему дифференциальных уравнений для описания динамических режимов генератора.

$$\begin{cases} \dot{x} = \dfrac{(mf(z)-x)}{T} \\ \dot{y} = \omega^2(x-z) \\ \dot{z} = y - \alpha z \end{cases}$$ – полученная система дифференциальных уравнений. (1)

$$f(z) = M\,|\,z+e_1\,|-|\,z-e_1\,|+\frac{1}{2}(|\,z-e_2\,|-|\,z+e_2\,|) \quad (2)$$

– кусочно-линейная функция, разбивающая систему на подобласти, где $e_1 = 1/2$, $e_2 = 1$.

Находим аналитическое решение в каждой из областей фазового подпространства отдельно, в которой представляется возможным описать систему посредством линейной системы дифференциальных уравнений (1), и совмещаем полученные решения (траектории) на границах зон нелинейности друг с другом [1]. Поиск решения осуществляется путем отыскания аналитического решения дифференциального уравнения третьего порядка. Решение системы строится по следующему алгоритму:

1. Определение стартовых условий в области $O^{(0)}$, путем решения уравнения:

$$\dddot{z}_0 + \varepsilon\ddot{z}_0 + \varphi\dot{z}_0 + (k+\mu)z_0 = 0.$$

2. Поиск значения времени $t_1^{(o)}$ в области $O^{(0)}$, для которого $z_0(t_1^{(o)}) = \frac{1}{2}$ или $z_0(t_1^{(o)}) = -\frac{1}{2}$.
3. Вычисление $x(t_1^{(o)})$, $y(t_1^{(o)})$, опираясь на $t_1^{(o)}$, $\dot{z}_0(t_1^{(o)})$, $\ddot{z}_0(t_1^{(o)})$.
4. Анализ следующей области, например $O^{(1)}$, для которой конечные условия в предыдущей области $O^{(0)}$ являются начальными. И так далее.
5. Получение троек значений $(x_i; y_i; z_i)$ при численном построении решения.
6. В соответствии с компактной формой записи алгоритма выстраиваем численное решение. Оно будет представлено в качестве последовательности точек пересечения траектории, т.е. как получение последовательности чисел $t_1^{(i)}$; $z_i(t_1^{(i)})$; $\dot{z}_i(t_1^{(i)})$; $\ddot{z}_i(t_1^{(i)}) = \ddot{z}_i(t_1^{(i)})$ и соответствующих им $(x_i; y_i; z_i)$.

Выбранный подход отличает исследуемый способ от классического приема регулярных сигналов, для которых благодаря их регулярности (предсказуемости) можно строить согласованные фильтры, опираясь на точную форму сигнала [2], возможностью их представления при помощи набора последовательности символов, которые описывают «грубую» структуру сигнала. Таким образом, удалось реализовать теоретически предельные характеристики приема, путём синтеза аналитического решения автоколебательной системы для разрешения проблемы обнаружения хаотического сигнала.

Литература

1. *Аникин В.М., Голубенцев А.Ф.* Аналитические модели детерминированного хаоса. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 328 с.

2. *Baptista M.S.* Wonders of chaos for wireless communication. – UK, Aberdeen, University of Aberdeen, AB24 3UX, May 11, 2020, 11 p.

Synthesis of an Analytical Solution of an Auto-Oscillatory System with Chaotic Behavior

I.N. Moskvina

Bauman Moscow State Technical University
(National Research University)
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1;
e-mail: iren.moskvina@mail.ru

Received July 30, 2021 PACS: 42.60.Fc

The paper studies the problem of detecting a chaotic signal in data transmission systems. An analytical solution of an auto-oscillatory system, in which chaotic oscillations can be observed, is proposed to solve the problem. The method of symbolic description of chaotic oscillations considered in this paper makes it possible to proceed to the representation of chaos as a «rough» signal structure, rather than a continuous sequence. The results of the work showed the need to develop «rough» methods of signal reception and processing, as well as the senselessness of developing approaches with the exact form of chaotic signals.

Keywords: chaos, chaotic oscillations, self-oscillating system, method of symbolic description.

References

1. *Anikin V.M., Golubentsev A.F.* Analytical models of deterministic chaos. – Moscow: FIZMATLIT, 2007. – 328 p. [in Russian].
2. *Baptista M.S.* Wonders of chaos for wireless communication. – UK, Aberdeen, University of Aberdeen, AB24 3UX, May 11, 2020, 11 p.

УДК 539.143.5

СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ $n^{12}C$ И $p^{12}C$ ПРИ 4,2 ГэВ/с

Маржона Мустафаева[1], Хаким Болиев[1], Хондамир Абдувахабов[1], Шерзод Халбутаев[1], Рахматилла Бекмирзаев[1], Кахрамон Маматкулов[1,2]

[1] Джизакский государственный педагогический институт
130100, Республика Узбекистан, г. Джизак, Ш. Рашидов, 4

[2] Объединенный Институт Ядерных Исследований
141980 Россия, Московская область, г. Дубна;
e-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Приведены результаты сравнительного анализа средних значений различных кинематических характеристик протонов в столкновениях $n^{12}C$ и $p^{12}C$ при 4,2 ГэВ/с. Обнаружено различие в средних значениях полного импульса протонов в рассматриваемых столкновениях. Обнаружено совпадение инклюзивных спектров протонов по быстроте в области фрагментации мишени.
Ключевые слова: пузырьковая камера, нейтрон, протон, ядро, неупругая перезарядка, изобара Δ^0, импульс, поперечный импульс, быстрота, угол вылета.

Взаимодействие протонов высоких энергий с нуклонами и ядрами достаточно хорошо изучено экспериментально в широком диапазоне первичных энергий, а из-за трудностей получения монохроматических пучков нейтральных частиц экспериментальная информация о столкновениях нейтронов с ядрами (nA), полученная в условиях 4π-геометрия очень редка [1] и основана на небольшой статистике. Поэтому получение экспериментальных данных о nA-столкновениях и сравнение их с данными о pA-взаимодействиях при той же энергии и для того же ядра-мишени представляет значительный интерес. Эта работа продолжает наши исследования и посвящена сравнительному анализу различных кинематических характеристик протонов в столкновениях $n^{12}C$ и $p^{12}C$ при импульсе 4,2 ГэВ/с.

Экспериментальный материал был получен с помощью двухметровой пузырьковой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия), облученной пучками протонов, ядер дейтронов ($d = {}^2H$) и гелия-4 на импульсом 4,2 ГэВ / с на нуклон на синхрофазотроне в Дубне Методологические особенности эксперимента и подробные данные по поправкам на потерю вторичных заряженных частиц обсуждаются в [2].

В работе получены средние значения полного и поперечного импульсов протонов с их средними углами вылета и быстротой в столкновениях $n^{12}C$ и $p^{12}C$ отдельно для событий

с отрицательными пионами и без них в конечном состоянии реакции.

Среднее значение полного импульса протонов, образующихся в столкновениях n^{12}C с n (π–) = 0, намного меньше, чем в столкновениях p^{12}C, поскольку большинство протонов в этом случае исходит из мишени. В случае, когда в событии образуются один или несколько отрицательных пионов, среднее значение полного импульса протонов в столкновениях n^{12}C больше, чем во взаимодействиях p^{12}C. Очевидно, это наблюдение можно объяснить вкладом протонов от процессов неупругой перезарядки исходного нейтрона в протон и π– мезон.

Средние значения поперечного импульса протонов больше в столкновениях p^{12}C, чем в столкновениях n^{12}C, независимо от наличия в событии отрицательных пионов. Более того, в столкновениях n^{12}C средние значения поперечного импульса протонов в пределах статистических ошибок не зависят от наличия отрицательного пиона в конечном состоянии.

В этой статье мы представили новые данные о взаимодействии нейтронов с ядрами углерода при 4,2 ГэВ/с. Проведен сравнительный анализ средних значений различных кинематических характеристик протонов, образующихся в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с.

Разница в средних импульсах протонов в n^{12}C и p^{12}C связана с различием вероятностей сохранения протона в первом случае и перезарядки первичного нейтрона на протон во втором. Совпадение инклюзивных сечений образования протонов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C в нижней части области фрагментации мишени может быть связано с образованием кумулятивных протонов, тогда как их совпадение в области фрагментации снаряда связано с эффектом лидирующей частицы в адронах – ядерные столкновения.

Литература

1. *Bekmirzaev R.N. et al.,* Yadernaya Fizika 40, 1477 (1984).
2. *Olimov K. et al.,* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
3. *Olimov K. et al.,* "Comparative analysis of characteristics of protons produced in n^{12}C and p^{12}C collisions at 4.2 GeV/*c*", submitted to *Intern. J. Mod.Phys. E*(2020).

Comparison of Some of the Kinematic Characteristics of Protons in Collisions $n^{12}C$ and $p^{12}C$ at 4,2 GeV/c

R. Bekmirzaev[1], M. Mustafaeva[1], X. Boliev[1], X. Abduvaxabov[1],
Sh. Xalbutaev[1], K. Mamatkulov[1,2]

Jizzakh State Pedagogical Institute, 130100, Jizzakh, Sh.Rashidov 4, Uzbekistan,
e-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Received October 13, 2021 PACS: 82.90.+j

The results of a comparative analysis of the average values of various kinematical characteristics of protons in $n^{12}C$ and $p^{12}C$ collisions at 4.2 GeV/c are presented. A difference is found in the average values of the total momentum of protons in the collisions under consideration. The coincidence of the inclusive spectra of protons in the rapidity in the region of target fragmentation was found.

Keywords: bubble chamber, neutron, proton, nucleus, inelastic charge exchange, Δ^0 isobar, momentum, transverse momentum, rapidity, emission angle.

References

1. *Bekmirzaev R.N. et al.,* Yadernaya Fizika 40, 1477 (1984).
2. *Olimov K. et al.,* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
3. *Olimov K. et al.,* "Comparative analysis of characteristics of protons produced in $n^{12}C$ and $p^{12}C$ collisions at 4.2 GeV/*c*", submitted to *Intern. J. Mod.Phys. E*(2020).

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 544.431.2+539.198

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ РЕАКЦИЙ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ C_4H_6 С ВЫСОКО-РЕАКЦИОННЫМ РАДИКАЛОМ CH

Анатолий Александрович Николаев[1,2], Валерий Николаевич Азязов[1,2]

[1] Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34
[2] Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221
E-mail: nikolayev_tolya57@inbox.ru

Было проведено полное теоретическое исследование реакций четырех молекулярных систем C_4H_6 (1,3-бутадиен, 1,2-бутадиен, 2-бутин, 1-бутин) + CH. Квантово-механические вычисления высокого уровня точности, сопоставимой или даже превышающей химическую точность в 4 кДж·моль$^{-1}$, позволили на качественном уровне проанализировать диаграммы поверхности потенциальной энергии (ППЭ) реакций, тогда как расчеты кинетики реакций с помощью метода Райса-Рамспергера-Касселя-Маркуса (РРКМ) в статистической физике дали возможность получить вероятность протекания многочисленных путей химических реакций. Проведение таких столь трудоемких расчетов было возможно лишь на суперкомпьютере «Сергей Королев» Самарского университета. Одной из первых предпосылок для всеобъемлющего исследования рассматриваемых реакций было обнаружение пятичленного углеводородного кольца, циклопентадиена (c-C_5H_6), в качестве доминирующего продукта реакций в системах C_5H_7. Работа вносит ценный вклад в раздвижение горизонтов человеческих познаний в таких сферах науки, как астрофизика и астрохимия.
Ключевые слова: квантовая механика, статистическая физика, астрофизика, астрохимия, физика и химия горения, химические реакции, реагенты, продукты, интермедиаты, переходные состояния, поверхность потенциальной энергии, циклопентадиен.

Основной целью работы является поиск возможных путей взаимодействия в молекулярных системах C_4H_6 + CH. Исходя из этого, теоретический анализ реакций заключался в оптимизации геометрий реагентов, продуктов, интермедиатов и переходных состояний; вычислению первых приближений и уточнению относительных энергий для всех найденных молекулярных структур; расчету кинетических констант реакций.

Учитывая квантово-механические исследования на уровне теорий CCSD(T)-F12/cc-pVTZ-F12//B3LYP,ωB97X-D/6-311G**, были построены подробные ППЭ [1, 2]. Принимая во внимание статистические расчеты РРКМ, были отмечены наиболее выгодные пути во всех реакциях и, соответственно, построена более емкая схема, показанная на рисунке 1, где сверху вниз расположены следующие изомеры C_4H_6: 1,3-бутадиен, 1,2-бутадиен, 2-бутин и 1-бутин.

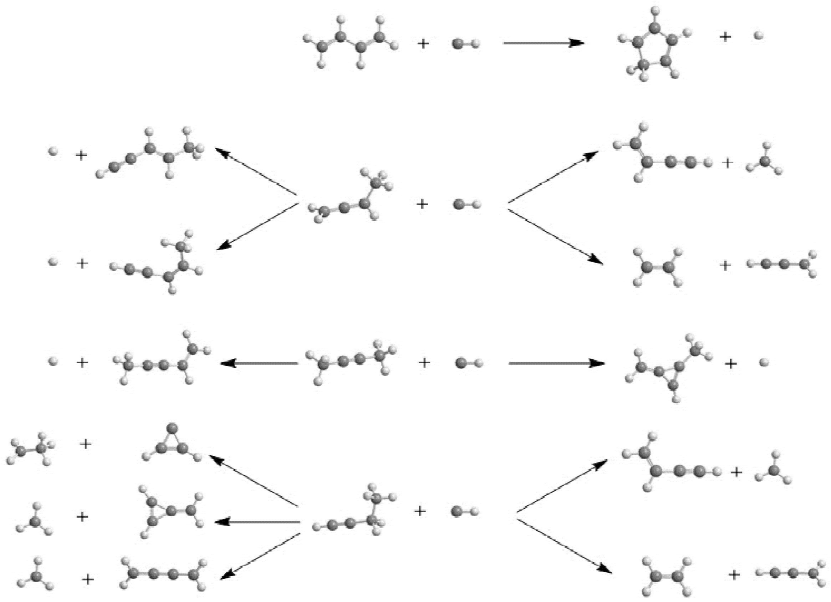


Рисунок 1. Схема химических реакций C_4H_6 + CH.

В реакции 1,3-бутадиен+CH [1] было выявлено доминирование циклопентадиена, тогда как когда отрыв более тяжелых радикалов абсолютно не вносил вклад в реакцию. Более того, циклопентадиен превалировал независимо от начального механизма реакции: π-присоединения или σ-внедрения. Если для реакций 1,2-бутадиена+CH [2] и 1-бутина+CH теория РРКМ еще показывала циклопентадиен как второстепенный продукт реакции с достаточно малым относительным выходом, то для реакции 2-бутина+CH циклопентадиен вовсе не наблюдался.

Научно-исследовательская работа в Самарском университете выполнена в рамках гранта № 14.Y26.31.0020 («Разработка физически обоснованных моделей горения»), а в СФ ФИАН – № 075-15-2021-597 («Происхождение и эволюция органических молекул в нашей Галактике»).

Литература

1. *Nikolayev A.A., Azyazov V.N., et al.* Gas-Phase Synthesis of 3-Vinylcyclopropenevia the Crossed Beam Reaction of the Methylidyne Radical (CH; $X^2\Pi$) with 1,3-Butadiene ($CH_2CHCHCH_2$; X^1A_g). – ChemPhysChem, 2020. v. 21. p. 1295-1309.
2. *Nikolayev A.A., Azyazov V.N., et al.* Gas-Phase Formation of C_5H_6 Isomers via the Crossed Molecular Beam Reaction of the Methylidyne Radical (CH; $X^2\Pi$) with 1,2-Butadiene (CH_3CHCCH_2; X^1A'). – The Journal of Physical Chemistry A., 2021. Vol. 125. p.126-138.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Theoretical Analysis of the Mechanisms of Reactions of Unsaturated C_4H_6 Hydrocarbons with a Highly Reactive CH Radical

A.A. Nikolayev[1,2], V.N. Azyazov[1,2]

[1] *Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, 443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34*
[2] *Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 443011, Samara, Novo-sadovaya str., 221*
E-mail: nikolayev_tolya57@inbox.ru

Received October 22, 2021 PACS: 34.35.+a

Chemical reactions on the C_5H_7 potential energy surface have a significant role in the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation. This detailed theoretical study is associated with the investigation of the reactions between the various acyclic C_4H_6 isomers and the methylidyne radical (CH).

Keywords: quantum mechanics, statistical physics, astrophysics, astrochemistry, physics and chemistry of combustion, chemical reactions, reagents, products, intermediates, transition states, potential energy surface, cyclopentadiene.

References

1. *Nikolayev A.A., Azyazov V.N., et al.* Gas-Phase Synthesis of 3-Vinylcyclopropenevia the Crossed Beam Reaction of the Methylidyne Radical (CH; $X^2\Pi$) with 1,3-Butadiene ($CH_2CHCHCH_2$; X^1A_g). – ChemPhysChem, 2020. Vol. 21. p. 1295-1309 [in English].
2. *Nikolayev A.A., Azyazov V.N., et al.* Gas-Phase Formation of C_5H_6 Isomers via the Crossed Molecular Beam Reaction of the Methylidyne Radical (CH; $X^2\Pi$) with 1,2-Butadiene (CH_3CHCCH_2; X^1A'). – The Journal of Physical Chemistry A., 2021. Vol. 125. p.126-138 [in English].

УДК 544.032.2; 54.03

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА pH ВОДНОЙ РЕАКЦИОННОЙ СРЕДЫ

Егор Игоревич Пентюхин[1,2]
Никита Алексеевич Богатов[1,2]

[1] Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047, Москва, Миусская площадь, 9; e-mail: egorpentyukhin@yandex.ru

[2] Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1

Представленная работа относится к области исследования сонохимических превращений в акустических полях малой интенсивности и частоты воздействия. Экспериментально установлено, что инфразвуковое воздействие оказывает влияние не только на исследуемые химические соединения и реакции, но и на физико-химические параметры воды (являющейся реакционной средой), в частности на ее pH.
Ключевые слова: сонохимические реакции, низкочастотное воздействие, инфразвук, реакционная среда, вода.

В настоящее время исследования в области низкочастотных аксиальных малоэнергетических акустических воздействий сводились к исследованию состояния растворенных веществ в дистиллированной воде и реакций, протекающих в этой среде [1–3]. Последние результаты, представленные в настоящей работе, показывают, что инфразвуковые воздействия могут оказывать влияние на растворитель, в частности на его pH.

Экспериментальный стенд, в котором проводилось акустическое воздействие низкочастотного диапазона создан на основе схемы, предложенной М.А. Маргулисом, и представляет собой линейный колебательный контур с зафиксированным на нем вибропоршнем, который погружен в реакционную среду [4].

Изучение влияния низкочастотных воздействий проводилось следующим образом. Дистиллированную воду в объеме 50 мл наливали в мерный цилиндр на 100 мл. Проводили измерение pH непосредственно в цилиндре, предварительно промывая электрод и промакивая его фильтровальной бумагой. Далее вибропоршень погружали в цилиндр так, чтобы объем исследуемого растворителя, заключенный между нижнем краем поршня и дном сосуда составлял 30 мл. Внутрь исследуемой среды подавался синусоидальный сигнал с частотой 15 Гц и амплитудой колебания поршня 2,2 см в течение 30 минут. После воздействия проводилось повторное измерение pH.

Измерения проводились на pH-метре pH-420, который был откалиброван по стандартным буферным растворам с точно известным pH. Для исключения возможности

случайных изменений в системе в ходе работы производилась длительная промывка поршня, а также его замена на новый. Также стоит отметить, что параллельно с измерением значений pH озвученных образцов проводилась фиксация pH контрольных образцов, значение которых не изменялось от начальных.

В ходе представленного исследования для каждого образца была проведена серия экспериментов, усреднённые данные которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение pH различных образцов

	Дистиллированная вода, полученная из медицинского аквадистиллятора АЭ-25	Дистиллированная вода фирмы «Sibiria»	Дистиллированная вода фирмы «H_2O»
Значение pH до воздействия	5,91	5,53	5,98
Значение pH после воздействия	6,73	6,55	6,47
ΔpH	0,82	1,02	0,55

Исходя из полученных результатов следует, что инфразвуковое воздействие может оказывать влияние на реакционную среду. Полученные различные изменения в pH могут объясняться влиянием сопутствующих гидродинамических явлений, таких как: образование течений, гидродинамические удары, сила Бьеркнеса, оказывающая влияние на растворенный газ и т.д. Данные эффекты в свою очередь могут как усиливать, так и ослаблять влияние малоэнергетических воздействий на состояние исследуемой реакционной среды.

Из экспериментальных данных можно сделать предварительные выводы, что результатом воздействия на воду является увеличение концентрации ионов OH^- или связывание и, как следствие, понижение концентрации ионов H^+, однако настоящее исследование уже сейчас позволяет пересмотреть и дополнить выводы предыдущих работ по влиянию инфразвука на растворы и реакции, протекающие в воде.

Литература

1. Обработка поверхности металлов в поле низкочастотного воздействия / Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А. // Цветные металлы. – 2019. – № 10. – С. 74-77.

2. Ингибирование окислительно-восстановительной реакции в поле низкочастотных воздействий / Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А., Николаев А.Л. // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 487, № 3. – С. 275-278.
3. Особенности окислительно-восстановительного процесса в поле низкочастотного воздействия / Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А., Николаев А.Л. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 80-92.
4. *Маргулис М.А.* Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. – М., Высш. шк., 1984. – 272 с., илл.

The Influence of Low-Frequency Low-Energy Exposures on the pH of an Aqueous Reaction Medium

E.I. Pentyukhin[1,2]
N.A. Bogatov[1,2]

[1] Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
125047, Moscow, Miusskaya square, 9;
E-mail: egorpentyukhin@yandex.ru
[2] Engineering Center «Automation and Robotics» of Bauman MSTU
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya, 5, bldg. 1

Received October 13, 2021 PACS: 82.90.+j

The present work covers the field of research of sonochemical transformations in acoustic fields of low intensity and frequency of exposure. It has been experimentally established that the infrasound effect affects not only the studied chemical compounds and reactions, but also the physico-chemical parameters of water (which is a reaction medium), in particular its pH.

Keywords: sonochemical reactions, low-frequency exposure, infrasound, reaction medium, water.

References

1. Metal surface treatment in the field of low-frequency exposure / Fadeev G.N., Boldyrev V.S.,

Bogatov N.A. // Non-ferrous metals. – 2019. – No. 10. – pp. 74-77.

2. Inhibition of the redox reaction in the field of low-frequency effects / Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., Nikolaev A.L. // Reports of the Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 487, No. 3. – pp. 275-278.
3. Features of the redox process in the field of low-frequency exposure / Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., Nikolaev A.L. // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural sciences. – 2020. – No. 1. – pp. 80-92.
4. *Margulis M.A.* Fundamentals of sound chemistry (chemical reactions in acoustic fields): Textbook for chemical chemistry and chemical.-technol. spec. universities. – M., Higher School, 1984. – 272 p., ill.

УДК 544.431

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКОМБИНАЦИИ РАДИКАЛОВ БЕНЗИЛА И ПРОПАРГИЛА

Павел Сергеевич Пивоваров, Валерий Николаевич Азязов

Самарский национальный исследовательский университет им ак. С.П. Королева
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34; e-mail: Zond2010@mail.ru

Одним из основных загрязнителей окружающей среды является сажа или же полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Механизмы их роста до сих пор слабо изучены, что не позволяет в должной мере учитывать экологический фактор при проектировании систем. Исследуемая в данной работе реакция $C_3H_3 + C_7H_7$ является одним из возможных шагов роста ПАУ, а именно образования второго бензольного кольца.

Ключевые слова: пропаргил, бензил, горение, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), диаграмма потенциальной энергии, сажа, ab initio.

Экспериментальные исследования на углеводородном пламени [1] и пиролизе толуола при низком давлении [2] показали значительный вклад этой реакции в образование нафталина. Целью работы является построение диаграммы поверхности потенциальных энергий (ППЭ) реакции $C_3H_3 + C_7H_7$. Геометрии и колебательные частоты реагентов, барьеров, промежуточных

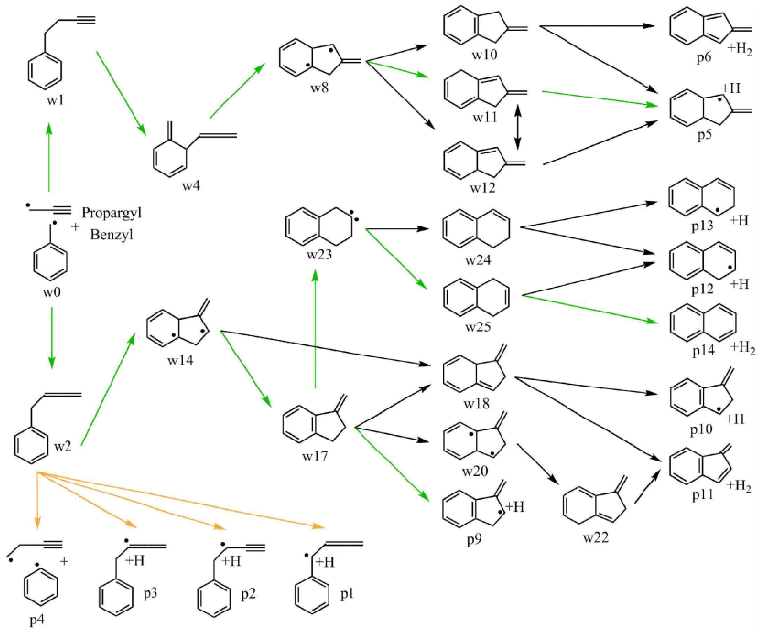


Рисунок 1. Упрощённая схема реакции.

состояний и продуктов рассчитывались по теории функционала плотности методом B3LYP/6–311G**. Также на этом же уровне теории проводились IRC расчёты. Энергии дополнительно уточнялись по схеме CASPT2(10e, 10o)/cc pVDZ//CCSD(T)/6 311G** для бирадикалов, и комбинированной схеме G3(MP2, CC)//B3LYP в случае остальных соединений.

На рисунке 1 представлена итоговая схема реакции. В зависимости от изомеризации пропаргила реакция может пойти по двум каналам, почти не связанными между собой. Присоединение идёт к концевой группе CH_2; остальные пути неблагоприятны вследствие потери ароматичности. Верхний канал приводит к замыканию пятичленного кольца, и по относительным энергиям барьеров можно предположить, что основным продуктом будет p5. Нижний канал сразу приводит к четырём продуктам, что довольно выгодно по энтропийному критерию. Реакционные пути, начинающиеся с w2 на w14, также ведут к замыканию в пятичленное кольцо (наиболее выгодный продукт p9) и к формированию шестичленного кольца через w17-w23 (наиболее выгодный продукт p14 – нафталин).

Литература

1. *Blanquart, G.; Pepiot-Desjardins, P.; Pitsch, H.* Chemical mechanism for high temperature combustion of engine relevant fuels with emphasis on soot precursors // Combust Flame–2009, 156, 588–607.
2. *Zhang, L.; Cai, J.; Zhang, T.; Qi, F.* Kinetic modeling study of toluene pyrolysis at low pressure // Combust Flame–2010, 157, 1686–1697.

Benzyl and Propargyl Radicals Process of Recombination Theoretical Study

P.S. Pivovarov, V.N. Azyazov

Samara University
443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34
E-mail: Zond2010@mail.ru

Received October 15, 2021 PACS: 34.35.+a

One of the main environmental pollutants is soot or polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The mechanisms of its growth are still studied poorly, which doesn't allow to maintain proper level of ecological safety in the engine's designs. The reaction $C_3H_3 + C_7H_7$ studied in this work is one of the possible steps of PAHs growth, namely the formation of a second benzene ring.

Keywords: propargyl, benzyl, combustion, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), potential energy surface, soot formation, ab initio

References

1. *Blanquart, G.; Pepiot-Desjardins, P.; Pitsch, H.* Chemical mechanism for high temperature combustion of engine relevant fuels with emphasis on soot precursors // Combust Flame–2009, 156, 588–607.
2. *Zhang, L.; Cai, J.; Zhang, T.; Qi, F.* Kinetic modeling study of toluene pyrolysis at low pressure // Combust Flame–2010, 157, 1686–1697.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 533.9.08

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Андрей Всеволодович Сандомирский

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Новосибирск, Пирогова, 2; e-mail: RockerAVS@mail.ru

Измерение функции распределения ионов плазмы в линейных магнитных ловушках важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления УТС в открытой магнитной ловушке. В данной работе был использован спектроскопический метод, основанный на перезарядки ионов плазмы на пучке инжектируемых атомов, представляющем собой искусственную мишень. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с альтернативными.

Ключевые слова: газодинамическая ловушка, продольный перенос частиц и энергии, амбиполярный электростатический потенциал плазмы, активная перезарядная спектроскопия, эффект Доплера.

Измерение электростатического потенциала плазмы в линейных магнитных ловушках важно для изучения процессов продольного переноса частиц и энергии. Именно уменьшение продольных потерь является критическим условием осуществления УТС в открытой ловушке. В данной работе был использован спектроскопический метод, который имеет ряд преимуществ по сравнению с альтернативными.

Эксперименты проводились в газодинамической ловушке (ГДЛ) [1], которая представляет собой линейную систему для удержания плазмы с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. При создании и нагреве плазмы в ГДЛ, формируется положительный электростатический потенциал, называемый амбиполярным, спадающий вдоль каждой силовой линии от максимума в центре до нуля на стенке. Такой потенциал определяется квазинейтральностью плазмы в каждой точке, а также равенством продольных токов электронов и ионов на торцевую стенку. Потенциал формирует барьер для покидающих ловушку электронов, а также ускоряет ионы, вытекающие в потоке плазмы через магнитную пробку.

В основе метода диагностики использовался эффект Доплера, основанный на изменении регистрируемой длины волны вследствие движения источника излучения относительно детектора. Чтобы конвертировать ускоренные ионы плазмы в возбуждённые атомы с последующим излучением света, использовалась водородная газовая мишень. Излучение при перезарядке на мишени собиралось оптической системой, поступало в спектрометр схемы Черни-Тёрнера с дифракционной решёткой и регистрировалось

быстродействующей ПЗС-камерой. Перед измерениями в плазме ГДЛ была произведена калибровка спектральной дисперсии и аппаратной функции прибора при помощи лабораторных газоразрядных ламп H и Ne.

Были проведены измерения потенциала и ионной температуры различных компонент плазмы: основной (водородной и дейтериевой) и примеси гелия. В работе представлены спектры излучения линий H-α (656.28 нм) He-I (667.8 нм). Впервые были проведены измерения пространственного профиля амбиполярного потенциала в ГДЛ.

Литература

1. *Иванов А. А., Приходько В. В.* Газодинамическая ловушка: обзор концепции и экспериментальных результатов. // Физика плазмы и управляемый синтез. – 2013. – Т. 55. – № 6. – С. 063001.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Measurement of Plasma Potential in the Gas Dynamic Trap by Doppler Spectroscopy

A.V. Sandomirsky

Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Pirogova Street, 2
E-mail: RockerAVS@mail.ru

Received October 15, 2021 PACS: 52.70.Kz

Measurement of the distribution function of plasma ions in linear magnetic traps is important for studying the processes of axial transport of particles and energy. The decrease in longitudinal losses is the critical condition for the implementation of the fusion power in an open magnetic trap. In this work the spectroscopic method was used which based on the charge exchange of plasma ions on an artificial target (in a stream of injected atoms). This method has several advantages over alternative ones.

Keywords: Gas Dynamic Trap, longitudinal transfer of particles and energy, ambipolar electrostatic potential of plasma, active charge exchange spectroscopy, Doppler effect.

References

1. *Ivanov A.A., Prikhodko V.V.* Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results – Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2013. – Vol. 55. – No. 6. – P. 063001 [in Russian].

УДК 539.143.5

СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ p^{12}C И n^{12}C ПРИ 4,2 ГэВ/с

Ориф Эшбоев[1], Маржона Мустафаева[1], Жахонгир Мажидов[1], Зулайхо Фархаджанова[1], Рахматилла Бекмирзаев[1], Кахрамон Маматкулов[1,2]

[1] Джизакский государственный педагогический институт
130100 Республика Узбекистан, г. Джизак, Ш. Рашидов, 4

[2] Объединенный Институт Ядерных Исследований
141980 Россия, Московская область, г. Дубна;
e-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Приведены новые экспериментальные данные по различным характеристикам вторичных заряженных пионов, образующихся в столкновениях n^{12}C при 4,2 ГэВ/с. Проведен сравнительный анализ средних множественностей и различных кинематических характеристик заряженных пионов, рожденных в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с. Систематически сравниваются экспериментальные данные с предсказаниями модифицированной модели FRITIOF.
Ключевые слова: нейтрон-углеродные столкновения, протон-углеродные столкновения, промежуточные энергии, рождение пионов, средние множественности, полное и поперечное импульсные распределения, распределения по быстроте, распределения по углам вылета.

Сравнительный анализ экспериментальных данных о протон-ядерном и нейтрон-ядерном взаимодействиях при одинаковых энергиях и для одного и того же ядра-мишени позволяет получить информацию о различных механизмах образования частиц в конечном состоянии. В [1] проведен сравнительный анализ импульсных характеристик отрицательных пионов во взаимодействиях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с. Было обнаружено, что средние значения поперечного импульса отрицательных пионов для обоих типов столкновений совпадают в пределах погрешностей. Что касается средних значений полного импульса π–мезонов, то наблюдаемое различие в этих двух типах столкновений было объяснено процессами неупругой перезарядки превращения исходного нейтрона в протон и отрицательный пион и/или распад резонанса Δ^0, образовавшегося из-за его (нейтронного) возбуждения.

Данная работа является продолжением серии работ [1, 2] и посвящена сравнительному анализу различных характеристик заряженных пионов, образующихся в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с. Экспериментальные данные сравниваются с результатами расчетов методом Монте-Карло в рамках модифицированной версии модели.

Эксперимент проводился с использованием 2-метровой пузырьковой камеры на пропане (C_3H_8) Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия). Столкновения n^{12}C были выбраны из взаимодействий d^{12}C и ^{4}He^{12}C в соответствии с процедурами, подробно описанными в [2].

Средняя множественность отрицательных (положительных) пионов совпадает со средней множественностью положительных (отрицательных) пионов в столкновениях p^{12}C и n^{12}C соответственно. Этот результат очевиден из изотопической инвариантности рассматриваемых нами сильных взаимодействий. Модель завышает средние множественности по сравнению с экспериментальными данными примерно на 10%, как для отрицательных, так и для положительных пионов, переоценивает экспериментальное продольное распределение быстроты отрицательных пионов в области средней скорости (центральная скорость) вокруг максимумов в обоих проанализированных типах столкновений. В целом модель качественно описывает форму распределения по продольной быстроте заряженных пионов в столкновениях n^{12}C и p^{12}C при 4,2 ГэВ/с.

Показано, что использованная в настоящей работе модифицированная версия модели FRITIOF хорошо описывает экспериментальные значения парциальных коэффициентов неупругости заряженных пионов, что свидетельствует о правильном учете в этой модели процессов перераспределения падающая (первичная) энергия среди заряженных частиц, образующихся в конечном состоянии в анализируемых столкновениях.

Литература

1. *Olimov, K. et al.* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
2. *Bekmirzaev R. N. et al.* Physics of Complex Systems. Vol. 2, No. 3 (2021).

Comparison of Some Characteristics of Charged Pions in p^{12}C and n^{12}C Collisions at 4.2 GeV/c

R. Bekmirzaev[1], M. Mustafaevna[1], O. Eshboev[1], J. Majidov[1],
Z. Farxadjanova[1], K.Mamatkulov[1,2]

Jizzakh State Pedagogical Institute, 130100, Jizzakh, Sh.Rashidov 4, Uzbekistan,
E-mail: bekmirzaev@mail.ru, kahramon@lhe.jinr.ru

Received October 13, 2021 PACS: 82.90.+j

The new experimental data on various characteristics of the secondary charged pions produced in n^{12}C collisions at 4.2 GeV/c are presented. A comparative analysis of the average multiplicities and various kinematic characteristics of the charged pions produced in n^{12}C and p^{12}C collisions at 4.2 GeV/c is made. The experimental data are compared systematically with the predictions of the modified FRITIOF model.

Keywords: neutron-carbon collisions, proton-carbon collisions, intermediate energies, pion production, average multiplicities, total and transverse momentum distributions, rapidity distributions, emission angle distributions.

References

1. *Olimov, K. et al.* Reports of Uzbek Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk Uzbekistana) **4** (2011) 29.
2. *Bekmirzaev R. N. et al.* Physics of Complex Systems. Vol. 2, No. 3 (2021).

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.874.4

ЭФФЕКТ БОКОВОГО РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СФЕРОИДНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Михаил Михайлович Бухарин

Национальный исследовательский технологический университет МИСиС
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 4; e-mail: m1805338@edu.misis.ru

В данной работе проведено исследование рассеяния электромагнитных волн сфероидными частицами на основе $SrTiO_2$ методом мультипольного разложения. Данный метод позволяет понять свойства и вид диаграмм направленности рассеяния. Исследование данной частицы позволит создать метаповерхности с уникальными свойствами, позволяющие рассеивать электромагнитные волны в определенных направлениях.

Ключевые слова: рассеяние электромагнитной волны, метод мультипольного разложения, излучение мультиполей.

В данной работе методом мультипольного разложения показано, что при рассеянии ЭМВ на диэлектрическом сфероиде, рассеяние формируется исключительно в боковые направления, в то время как рассеяние вперед и назад сведено к минимуму. Этот эффект является результатом конструктивной интерференции излучений электрического диполя и магнитного квадруполя. Данное уникальное свойство можно использовать для эффективного перенаправления падающей волны с возможностью запасания ее энергии, что может стать основой для создания солнечных панелей с более высоким КПД, маскирующих поверхностей и плоских лазеров.

Мультипольное разложение – это представление падающих и рассеянных волн с помощью осциллирующих зарядов и токов. Данный метод – это мощный инструмент позволяющий объяснить причину рассеяния по определенным направлениям по принципу интерференции излучений отдельных моментов (электрических и магнитных).

$$E = \frac{k^2}{4\pi R\varepsilon_0} e^{ikR}([\boldsymbol{n}\times(\boldsymbol{p}+ik\boldsymbol{T}^{(e)})\times\boldsymbol{n}]+\frac{ik}{2}[\boldsymbol{n}\times(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{Q}^{(e)})\cdot\boldsymbol{n}]+\frac{1}{c}[\boldsymbol{m}\times\boldsymbol{n}]+\frac{ik}{2c}[\boldsymbol{n}\times(\boldsymbol{Q}^{(m)}\cdot\boldsymbol{n})]). \quad (1)$$

Эта формула представляет собой неполное разложение электрического поля по мультиполям от электрического диполя $\boldsymbol{p}$ до магнитного квадруполя $\boldsymbol{Q}^{(m)}$, где k – волновое число, $\boldsymbol{R}$ – радиус вектор, $\boldsymbol{T}^{(e)}$ – тороидальный диполь, $\boldsymbol{Q}^{(e)}$ – электрический квадруполь, $\boldsymbol{m}$ – магнитный диполь.

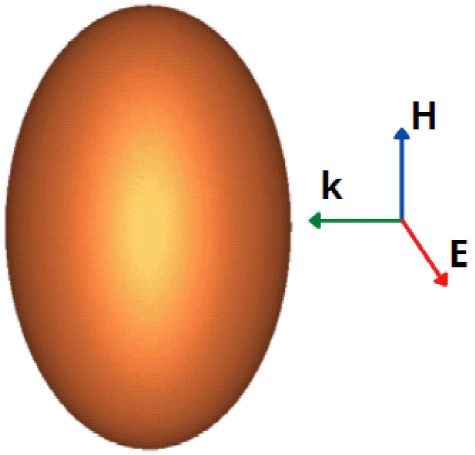


Рисунок 1. Исследуемая сфероидная частица $r = 6.25$ mm, $R = 9.75$ mm, $\varepsilon = 150$.

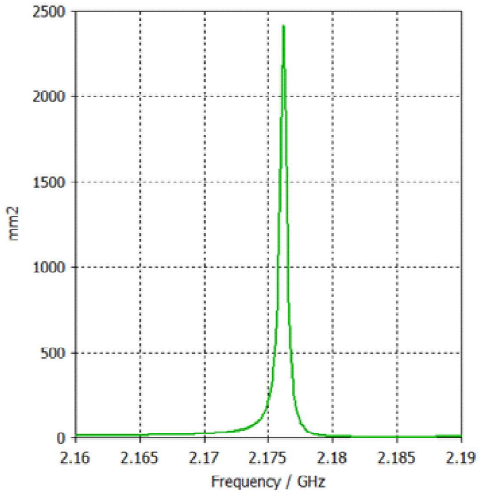


Рисунок 2. Total RCS.

Применим метод мультипольного разложения к данному сфероиду, чтобы понять из каких мультиполей состоит диаграмма направленностей на резонансной частоте 2.176 ГГц.

Для того чтобы найти мультиполи достаточно знать распределение плотностей токов в рассеивателе, их можно найти с помощью данной формулы, предварительно импортировав или рассчитав значения электрического поля.

$$\boldsymbol{J} = -iw\varepsilon_0(n^2 - 1)\boldsymbol{E}\,. \tag{2}$$

Здесь w – циклическая частота волны, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, n – коэффициент преломления, в нашем случае $n = \sqrt{\mu\varepsilon} = \sqrt{150}$.

Непосредственно мультиполи можно найти следующим образом:

$$\boldsymbol{p} = \frac{i}{w}\int \boldsymbol{J}d\boldsymbol{r},\ \ \boldsymbol{m} = \frac{1}{2}\int (\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{J})d\boldsymbol{r}\,, \tag{3}$$

$$Q^{(e)}_{\alpha\beta} = \int[3(\boldsymbol{r}_\beta\boldsymbol{J}_\alpha + \boldsymbol{r}_\alpha\boldsymbol{J}_\beta) - 2(\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{J})\delta_{\alpha\beta}]d\boldsymbol{r},\ \ Q^{m}_{\alpha\beta} = \int[\boldsymbol{r}_\alpha(\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{J})_\beta + \boldsymbol{r}_\beta(\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{J})_\alpha]d\boldsymbol{r}\,.$$

В результате расчетов мультиполей, становится ясно, что резонансный пик представляет собой суммарный вклад электрического диполя и магнитного квадруполя. Диаграммы рассеяния, полученные в результате интерференции этих мультиполей, рассчитанных методом мультипольного разложения соответствуют результатам, полученным методом моделирования CST MICROWAVE STUDIO.

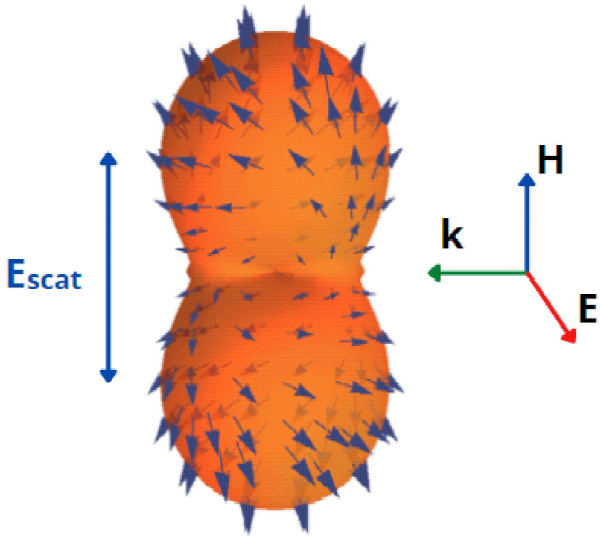


Рисунок 3. Диаграмма рассеяния методом мультипольного разложения, где E_{scat} – рассеянное поле.

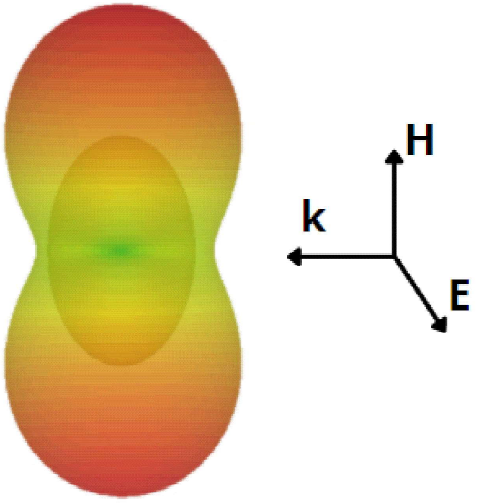


Рисунок 4. Диаграмма рассеяния в CST.

Наблюдается совпадение диаграммы направленности, рассчитанной методом мультипольного разложения, с диаграммой в CST.

Выводы:

Это уникальное свойство можно использовать для перенаправления энергии, что позволит создать маскирующие поверхности, солнечные панели с более высоким КПД; также данный сфероид обладает еще одной диаграммой рассеяния в форме восьмерки, которая ортогональна данной, переключение между этими двумя диаграммами позволит запасать энергию и потом резко, как конденсатор, отдавать ее.

Литература

1. *Гурвиц Е.А.* Оптические свойства слабопоглощающих наночастиц с высоким показателем преломления, обусловленные тороидальными мультипольными моментами. – 2020.

The Effect of Lateral Scattering of an Electromagnetic Wave by Dielectric Spheroid Particles

M.M. Bukharin

National University of science and technology MISIS
119991 Moscow, Leninsky prospect, 4;
e-mail: m1805338@edu.misis.ru

Received July 31, 2021 PACS: 03.65.Nk

In this paper we study the scattering electromagnetic waves by spheroidal particles based on $SrTiO_2$ by multipole expansion method. This method allows us to understand properties and view of scattering pattern. These particles allow to create metasurfaces with unique properties, which can scatter electromagnetic waves in certain directions.

Keywords: multipole expansion, electromagnetic wave scattering, multipole radiation patterns.

References

1. *Gurvits E.A.* Optical properties of weakly absorbing nanoparticles with a high refractive index due to toroidal multipole moments. – 2020.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 534.01

О ПРОБЛЕМЕ СОХРАНЕНИЯ ЧАСТОТ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ, ЛЕЖАЩЕЙ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Гульнара Фриловна Сафина, Елена Сергеевна Валишина

Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета
452680, Нефтекамск, Трактовая, 1; e-mail: safinagf@mail.ru

В работе рассмотрена задача поперечных колебаний балки, лежащей на упругом основании. Поставлена и исследована задача сохранения заданного безопасного диапазона частот колебаний балки. Приведен метод решения поставленной проблемы путем соответствующих изменений в опорах концов балки. Получены аналитические модели для коэффициентов жесткости пружин на кручение обоих опор балки с основанием, позволяющие сохранять заданные частоты ее колебаний.
Ключевые слова: балка, упругое основание, частоты колебаний, сохранение частот, опоры балки.

Рассмотренная в статье проблема сохранения безопасных частот колебаний балки на основании возникает как продолжение исследований и решений обратных спектральных задач по свободным колебаниям механических систем и их частей [1, 2].

Поперечные колебания балки описываются известным дифференциальным уравнением [2]:

$$\rho A\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+EJ\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}+ku=0. \qquad (1)$$

Здесь: $u=(x,t)$ – прогиб с осевой координатой x и временем t, L и ρ – длина и плотность балки, A и I – площадь и момент инерции поперечного сечения балки, k –жесткость упругого основания.

Переход от размерных параметров к безразмерным $\xi=\frac{x}{L}$, $\upsilon=\frac{u}{L}$, $\tau=\sqrt{\frac{k}{\rho A}}t$ приводит (1) к следующему уравнению: $\frac{\partial^4\upsilon}{\partial\xi^4}+\alpha^4\left(\frac{\partial^2\upsilon}{\partial\tau^2}+\upsilon\right)=0$, в котором $\alpha^4=\frac{kL^4}{EJ}$. Решения же $\upsilon=W(\xi)\sin(\omega\tau+\varphi)$ (ω – собственная частота колебания балки) разделяют последнее уравнение относительно переменных ξ и τ, приводят к виду:

$$W^{(4)}(\xi)+\lambda^4 W(\xi)=0 \qquad (2)$$

со спектральным параметром $\lambda^4=\alpha^4\left(1-\omega^2\right)$. Уравнение (2) имеет стандартные решения:

$$W(\xi)=C_1 ch\lambda\xi+C_2 sh\lambda\xi+C_3\cos\lambda\xi+C_4\sin\lambda\xi, \qquad (3)$$

в которых C_i – амплитуды колебаний балки на основании.

Рассмотрим также условия опор балки с пружинами кручения с жесткостями k_1 и k_2, которые в безразмерных параметрах ($K_1=k_1/EI$, $K_2=k_2/EI$) примут вид:

$$\begin{cases} W(0)=0; \;\; W''(0)-K_1W'(0)=0; \\ W(1)=0; \;\; W''(1)+K_2W'(1)=0. \end{cases} \tag{4}$$

Для задачи (2), (4) найдено вековое уравнение в виде определителя четвертого порядка, по которому при известных физических характеристиках балки и основания определяются однозначно частоты ω_i ее поперечных колебаний. Причем численные программные расчеты с частотным уравнением показывают влияние изменения физических характеристик на значения собственных частот колебаний.

Рассмотрим теперь возникающую при изменениях характеристик балки проблему сохранения ее частот колебаний в прежнем безопасном диапазоне. И представим метод решения такой задачи. Преобразуем вековой определитель к виду:

$$f_1(\lambda_i)A+f_2(\lambda_i)B+f_3(\lambda_i)=0, \tag{5}$$

в котором $A=K_1+K_2$, $B=K_1K_2$, а функции $f_j(\lambda_i)$ $(j=1;2;3;\, i=1;2)$ выражаются через физические характеристики балки и основания. При известных значениях двух частот ω_i колебаний балки (известных параметрах λ_i) получим систему из уравнений вида (5):

$$\begin{cases} f_1(\lambda_1)A+f_2(\lambda_1)B=-f_3(\lambda_1); \\ f_1(\lambda_2)A+f_2(\lambda_2)B=-f_3(\lambda_2). \end{cases} \tag{6}$$

Из (6) следуют аналитические модели:

$$A=\frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad B=\frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad \Delta=\begin{vmatrix} f_1(\lambda_1) & f_2(\lambda_1) \\ f_1(\lambda_2) & f_2(\lambda_2) \end{vmatrix}\neq 0, \; \Delta_1=\begin{vmatrix} -f_3(\lambda_1) & f_2(\lambda_1) \\ -f_3(\lambda_2) & f_2(\lambda_2) \end{vmatrix}, \; \Delta_2=\begin{vmatrix} f_1(\lambda_1) & -f_3(\lambda_1) \\ f_1(\lambda_2) & -f_3(\lambda_2) \end{vmatrix}, \tag{7}$$

которые ведут к следующим выражениям для искомых параметров:

$$K_1=\frac{1}{2}\left(A\pm\sqrt{A^2-4B}\right), \;\; K_2=\frac{1}{2}\left(A\mp\sqrt{A^2-4B}\right). \tag{8}$$

Приведенный метод, сведенный к решению системы нелинейных уравнений, позволяет получить двойственные модели для коэффициентов жесткости пружин кручения опор балки, лежащей на упругом основании. Вывод аналитических формул приводит с справедливости следующей теоремы.

Теорема (о сохранении частот колебаний): *Если известны собственные частоты ω_i (и значения λ_i), которые необходимо сохранить при изменениях характеристик балки на основании, то при $\Delta\neq 0$ коэффициенты K_1 и K_2 краевых условий определяются формулами (7), (8).*

Приведены примеры разрешения проблемы сохранения частот колебаний балки на основании с помощью изменений в жесткостях пружин кручения опор балки, соответствующих моделям (7), (8).

Литература

1. *Бидерман В.Л.* Теория механических колебаний. – М.: Ленанд, 2017. – 416 с.
2. *Доев В.С.* Поперечные колебания балок / В.С. Доев. – М.: КНОРУС, 2016. – 412 с.

On the Problem of Maintaining the Transverse Oscillation Frequencies of the Beam Lying on the Elastic Base

G.F. Safina, E.S. Valishina

Neftekamsk branch of the Bashkir state university
452680, Neftekamsk, Traktovaya St., 1; e-mail: safinagf@mail.ru

Received October 14, 2021 PACS: 02.90

The task of transverse oscillations of the beam lying on the elastic base is considered in the work. The task of maintaining the specified safe range of beam oscillation frequencies is set and investigated. Here is a method of solving the problem by changing the beam end supports accordingly. Analytical models are obtained for coefficients of stiffness of springs on torsion of both supports of beam with base, which allow to maintain preset frequencies of its oscillations.

Keywords: beam, elastic base, oscillation frequencies, preservation of frequencies, beam supports.

References

1. *Biederman V.L.* Theory of mechanical oscillations. – M.: Lenand, 2017. – 416 p.
2. *Doev V.S.* Transverse vibrations of beams. / V.S. Doev. – M.: KNORUS, 2016. – 412 p.

УДК 535.31

ПЕРЕНАСТРАИВАЕМЫЕ ЛИНЗЫ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Никита Владимирович Васильев[1], Ольга Михайловна Алыкова[1], Алексей Владимирович Рыбаков[1], Владимир Вячеславович Смирнов[1,2]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет»
414056, Астрахань, Татищева, 20а; e-mail: nv_vasilyev20@mail.ru

[2] Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО "ВГУВТ", 414014, Астрахань, ул. Костина, 2

В работе проведена экспериментальная проверка возможности использовать линзы с переменным фокусным расстоянием в качестве элементов технического зрения. Модель линзы с изменяющейся кривизной поверхности была изготовлена на основе двух пластиковых обкладок канцелярских клипс, и прозрачных латексных салфеток. Полученные результаты следует рассматривать как предварительные для разработки конкретного устройства технического зрения.
Ключевые слова: линза с изменяющейся кривизной поверхности, система технического зрения.

Оптические элементы систем технического зрения во многом определяют их стоимость [1]. Так, объективы с фиксированным фокусным расстоянием, содержат от 3 до 7 линз, в трансфокаторах или вариофокаторах количество оптических элементов может превышать 20 [2]. Отдельные линзы при этом по сложным законам перемещаются внутри корпуса объектива и относительно друг друга, меняя фокусное расстояние всей системы при неизменном положении фокальной плоскости. Вариообъективы по сравнению с трансфокаторами, позволяют достичь лучшего исправления многих аберраций при меньшем числе линз и компонентов, а также добиться повышенной геометрической светосилы во всём диапазоне фокусных расстояний [3].

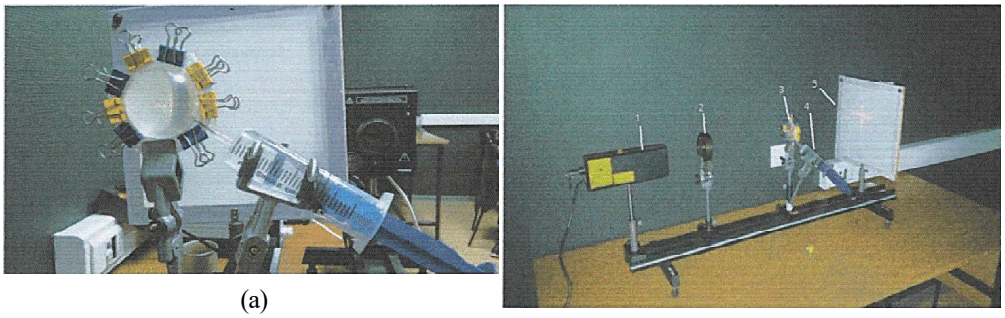
Отметим, что цена на трансфокаторы и вариообъективы заметно превышает стоимость объективов с фиксированным фокусным расстоянием. Так, средние цены на последние, колеблются в районе 15 тысяч рублей (например, **Tamron 35HB**), вариофокаторы – порядка 50 тысяч рублей (например, **Computar MLM-3XMP**), трансфокаторы –170 тысяч рублей (например, **Computar TEC-V7X**) [4].

В качестве возможной альтернативы предлагается использовать устройство (линзу) с изменяющейся кривизной поверхности (переменным фокусным расстоянием), с помощью чего и осуществляется настройка на резкость.

Информация о таких линзах появилась не позже 1958 г. Это патент США № 2,836,101, полученный deSwart. Более поздние примеры могут быть найдены в статье “Плакированные жидкие линзы с динамически реконфигурируемым жидким ядром в микроструйном канале” [5], в Международной публикации патентных заявок №WO 2008/063442, озаглавленной “LiquidLenseswithPolycyclicAlkanes” (“Жидкие линзы с полициклическими парафинами”), в патентах США №5,684,637 и №6,715,876, выданные Floyd, патент США №7,085,065, выданный Silver и ряде других. Эти жидкие линзы обычно ориентированы на фотонику, технологию цифровых телефонов и камер, микроэлектронику, а также на потребительское офтальмологическое применение.

В настоящей работе была предпринята попытка понять возможности жидких линз и перспективы их использования для различных конструкций технического зрения.

Модель линзы с изменяющейся кривизной поверхности была изготовлена на основе двух пластиковых обкладок канцелярских клипс, и прозрачных латексных салфеток (рис. 1, а). Изменение объема линзы, а, следовательно, кривизны ее поверхностей, осуществлялось путем закачивания между салфетками с помощью шприца воды. Фокусное расстояние линзы определялось непосредственным его измерением на установке, показанной на рис. 1, б.



(а) (б)

Рисунок 1. Модель линзы с изменяющейся кривизной поверхности (а) и установка для измерения ее фокусного расстояния (б).

Установка состоит из оптической оси, на которой закреплены: 1 – лазер; 2 – дифракционный объект; 3 – линза с изменяющейся кривизной; 4 – шприц с жидкостью; 5 – экран. Дифракционный объект позволяет разбить луч лазера на множество лучей, упрощая, таким образом, дальнейшее проведение эксперимента. Полученная зависимость фокусного расстояния линзы от ее объема приведена на рис. 2.

Необходимо отметить, что получению качественного изображения при помощи предложенной модели линзы, препятствовали: недостаточная прозрачность латексной пленки, что приводило к размытости получаемого изображения; значительный объем

моделированной линзы, что приводило к искажениям поверхности пленки за счет силы тяжести, и, как следствие, к искажениям получаемого изображения.

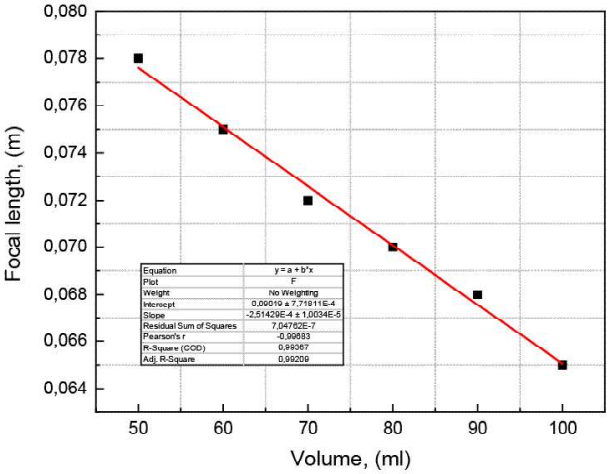


Рисунок 2. График зависимости фокусного расстояния линзы от ее объёма.

В целом, результаты проведённых исследований позволяют утверждать о возможности применения линз с переменной кривизной поверхности в качестве оптических элементов системы технического зрения.

Литература

1. Введение в систему технического зрения https://kipia.ru/upload/iblock/d78/Auton_sist_tech_zrn.pdf
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Объектив_переменного_фокусного_расстояния
3. Теория оптических систем, 1992, с. 264.
4. https://videoglaz.ru/obektivy-dlya-sistem-mashinnogo-zreniya
5. *Tang, S.K.Y.; Stan, C.A.; Whitesides, G.M.* Dynamically reconfigurable liquid-core liquid-cladding lens in a microfluidic channel. LabChip 2008, 8, 395–401.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Reconfigurable Lenses in Technical Vision Systems

N.V. Vasilyev, O. M. Alykova, A.V. Rybakov, V.V. Smirnov

Astrakhan State University
414056 Astrakhan, Tatishcheva st., 20a, Russia
Caspian Institute of Sea and River Transport the affiliation of Volga State University of Water Transport, the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education (hereinafter referred to as the Affiliation),
414024, Astrakhan, st. B. Khmelnitsky, d.3, Russia;
e-mail: nv_vasilyev20@mail.ru

Received October 21, 2021 PACS: 87.64.Je.78.67.-н

An experimental verification of the possibility of using lenses with variable focal length as elements of technical vision is carried out in this work. The lens model with variable surface curvature was made on the basis of two plastic covers of stationery clips, and transparent latex napkins. The results obtained should be considered as preliminary for the development of a specific vision device.

Keywords: lens with variable surface curvature, computer vision system.

References

1. Introduction to the system of technical vision https://kipia.ru/upload/iblock/d78/Auton_sist_tech_zrn.pdf
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Lens_vari_focal_length
3. Optical systems theory, 1992, p. 264.
4. https://videoglaz.ru/obektivy-dlya-sistem-mashinnogo-zreniya
5. *Tang, S.K.Y.; Stan, C.A.; Whitesides, G.M.* Dynamically reconfigurable liquid-core liquid-cladding lens in a microfluidic channel. LabChip 2008, 8, 395–401.

УДК 544.032.2

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» ПРИ ПОМОЩИ ИНФРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Александр Павлович Зоткин[1,2]
Никита Алексеевич Богатов[1,2]

[1] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева"
125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9; e-mail: zotkin.working@gmail.com

[2] Инжиниринговый центр «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5, с. 1

В данной работе представлено сравнение методов интенсификации массообмена в системе «газ-жидкость». Рассматривается метод инфразвуковой интенсификации массообмена, описана техническая реализация опытной модельной установки, приведены опытные данные сравнения интенсивности поглощения диоксида углерода (CO_2) при различных физических воздействиях.
Ключевые слова: инфразвук, массообменные процессы, граница раздела фаз, интенсификация, перемешивание, барботаж, малоэнергетическое воздействие.

Массообменные процессы широко распространены в химической технологии. Они используются для разделения систем с целью изменения концентрации содержащихся в фазах веществ. Массообмен в системе «газ-жидкость» используется в промышленности в том числе для очистки газовых технологических сред от вредных примесей, для выделения целевого газообразного продукта из смеси с инертным носителем. Массообмен протекает при контакте фаз, поэтому в химической технологии существует задача увеличения площади контакта фаз в массообменном аппарате.

В настоящее время основными физическими воздействиями на разделяемую систему являются перемешивание сред и барботаж газовой фазы через жидкую. Использование перемешивающих устройств в массообменных аппаратах затруднено, перемешивание в потоках вещества требует сложной геометрии аппарата, а эффективный барботаж влечёт за собой высокое гидравлическое сопротивление в аппарате. В промышленности применяется большое количество различных реализаций массообменных аппаратов с различными достоинствами и недостатками.

В настоящей работе для увеличения площади контакта фаз предлагается воздействие на границу раздела фаз (ГРФ) низкочастотными (инфразвуковыми) аксиальными колебаниями. Воздействие создаёт возмущение жидкой среды с последующим захватом

жидкой средой пузырьков газа, находящегося на ГРФ, и дальнейшим движением их в жидкой среде. Таким образом, увеличивается общая площадь контакта фаз.

Для проверки работоспособности вышеприведённого метода использовалась опытная модельная установка, предложенная М.А. Маргулисом [1–4], состоящая из электромеханического преобразователя, преобразующего электрический сигнал в механические колебательные движения поршня определённой формы. Поршень погружен в жидкость, находящуюся в высоком узком сосуде. Газовая фаза подаётся сверху к ГРФ из баллона через трубку-форсунку.

Для сравнения эффективности массообмена при воздействии различными методами на систему «газ-жидкость» проводился эксперимент. В мерный цилиндр с 50 мл дистиллированной воды в течение некоторого времени подавался различными способами CO_2. Опыты проводились следующим образом. В первом опыте газ подавался со дна сосуда (барботаж) в течение одной минуты. Во втором опыте газ подавался в течение двух минут в пространство над жидкой средой, без возмущений ГРФ или механического внесения в жидкую фазу, тем самым создавая область вблизи ГРФ, насыщенную CO_2. В третьем опыте газ в течение одной минуты подавался в пространство над поршнем и жидкостью, и в течение следующей минуты на систему дополнительно оказывалось инфразвуковое воздействие с частотой 15 Гц и амплитудой 2.2 см. В четвёртом опыте газ подавался со дна сосуда (барботаж) в течение одной минуты, параллельно с подачей газа жидкость перемешивалась якорем магнитной мешалки со скоростью 900 мин-1. В рамках опытов изучалась зависимость pH водного раствора угольной кислоты от метода введения CO_2 в жидкую водную среду. Опыты проведены троекратно. Результаты приведены в таблице 1:

Таблица 1

Результаты эксперимента

pH	**Барботаж**	**Слой газа**	**Инфразвук**	**Барб.+Меш.**
До возд.	6.03			
После возд.	3.89±0.03	4.92±0.2	3.96±0.13	3.92±0.06

Исходя из опытных данных, делаются следующие выводы. Хуже всего массообмен протекает при формировании газового слоя CO_2 над поверхностью воды. Массообмен в этом случае ограничен диффузией газа через ГРФ. Эффективность инфразвукового воздействия сравнима с эффективностью барботажа в рамках проведённого эксперимента. Отличий для барботажа с перемешиванием магнитной мешалкой от барботажа без перемешивания в рамках опыта не обнаружено.

Литература

1. *Маргулис М.А.* Основы звукохимии. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.
2. *Фадеев, Г.Н.* Обработка поверхности металлов в поле низкочастотного воздействия / Г.Н. Фадеев, В.С. Болдырев, Н.А. Богатов. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2019. – № 10. – С. 74-77.
3. Ингибирование окислительно-восстановительной реакции в поле низкочастотных воздействий / Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А., Николаев А.Л. // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 487, № 3. – С. 275-278.
4. Особенности окислительно-восстановительного процесса в поле низкочастотного воздействия / Фадеев Г.Н., Болдырев В.С., Богатов Н.А., Николаев А.Л. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2020. – № 1. – С. 80-92.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Intensification of the Mass Transfer Process in the «Gas-Liquid» System Using Infrasonic Action

A.P. Zotkin[1, 2]
N.A. Bogatov[1, 2]

[1] Mendeleev University of Chemical Technology
125047, Miusskaya sq., 9; e-mail: zotkin.working@gmail.com
[2] Engineering Center "Automation and Robotics"
of Bauman Moscow State Technical University
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5, bld. 1

Received October 15, 2021 PACS: 82.90.+j

This paper presents a comparison of methods for intensifying mass transfer in the «gas-liquid» system. A method of infrasonic intensification of mass transfer is considered, the technical implementation of a model setup is described, and experimental data are given for comparing the intensity of absorption of carbon dioxide (CO2) under various physical influences.

Keywords: infrasound, mass transfer processes, phase interface, intensification, mixing, bubbling, low-energy impact.

References

1. *Margulis M.A.* Fundamentals of sound chemistry. – M.: Higher school, 1984. – 272 p.
2. *Fadeev, G.N.* Treatment of the surface of metals in the field of low-frequency impact. / G.N. Fadeev, V.S. Boldyrev, N.A. Bogatov. – Text: direct // Non-ferrous metals. – 2019. – No. 10. – P. 74-77.
3. Inhibition of the redox reaction in the field of low-frequency influences. / Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., Nikolaev A.L. // Reports of the Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 487, No. 3. – P. 275-278.
4. Features of the redox process in a low-frequency field. / Fadeev G.N., Boldyrev V.S., Bogatov N.A., Nikolaev A.L. // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Natural Sciences. – 2020. – No. 1. – P. 80-92.

УДК 629.7.054.07

ВКЛАД КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДРЕЙФ ПЕРИМЕТРА ЗЕЕМАНОВСКОГО ЛАЗЕРНОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Ярослав Андреевич Зубарев[1], Антон Олегович Синельников[1,2], Александр Анатольевич Катков[1]

[1] АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»
117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: zubyar@mail.ru

[2] ФГАОУ высшего образования «Российский университет дружбы народов»
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния конструкционных элементов зеемановского лазерного датчика угловой скорости (ДУС) на величину температурного дрейфа периметра его резонатора. Показано, что результирующий вклад конструкционных элементов зеемановского ДУС приводит к снижению температурого дрейфа его периметра благодаря собственным температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР), отличным от ТКЛР материала моноблока резонатора.
Ключевые слова: зеемановский датчик угловой скорости, резонатор, температурные деформации, температурный коэффициент линейного расширения.

Введение

Лазерный датчик угловой скорости (ДУС) с магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана [1] является чувствительным элементом многих гироскопических систем, измеряющих угловую скорость движения объекта и угол его поворота в абсолютном пространстве [2]. Одной из характеристик зеемановского ДУС, определяющих время его непрерывной работы, является стабильность периметра кольцевого лазера в широком температурном диапазоне. Эта характеристика определяет способность лазера эффективно поддерживать постоянство частоты генерации излучения с помощью активной системы регулировки периметра (СРП). благодаря чему обеспечивается режим работы на заданной моде.

Пассивная термокомпенсация заключается в применении материалов с ультранизким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) при изготовлении корпусов резонаторов и подложек зеркал лазерных ДУС [3]. В России наиболее используемым материалом является ситалл СО-115М [4]. При этом в диапазоне температур, соответствующим рабочим температурам зеемановского ДУС (от –55 °С до 75 °С) вследствие нелинейного характера ТКЛР ситалла, периметр датчика увеличивается

при положительных температурах и уменьшается при отрицательных, что ограничивает динамический диапазон работы СРП.

В ранних исследованиях проводились исследования собственных температурных дрейфов периметра зеемановских ДУС [5]. Однако конструкция датчика, помимо резонатора, включает в себя различные элементы, имеющие собственные ТКЛР, отличные от ТКЛР ситалла. К этим элементам относятся пьезоэлектрические блоки (ПБ) (активные элементы СРП) и их крепежи, основание и прижим, удерживающий резонатор, и магнитный экран, защищающий элементы датчика от влияния электромагнитных полей.

Данная работа посвящена исследованию вклада в температурный уход периметра как самого ситаллового корпуса, так и основных конструкционных элементов зеемановского ДУС, что определяет ее актуальность.

Экспериментальная часть

В рамках задачи повышения устойчивости резонатора зеемановского ДУС к температурным воздействиям были проведены эксперименты согласно ранее разработанной методике, позволяющей оценить дрейф периметра с точностью до четверти длины волны излучения гелий-неонового лазера [2, 5]. Для лазера в зеемановском ДУС длина волны излучения составляет 0,633 мкм.

В начале эксперимента был определен собственный дрейф резонатора зеемановского ДУС и определена точка смены знака направления его изменения. Далее на резонатор последовательно устанавливались конструкционные элементы, перечисленные ранее, до этапа полной сборки датчика.

Основные результаты ухода периметра в зависимости от конфигурации датчика представлены в таблице 1.

Таблица 1

Дрейф периметра зеемановского ДУС в зависимости от его конфигурации

Конфигурация датчика	Резонатор без конструкционных элементов	Резонатор с закрепленными ПБ	Резонатор с закрепленными ПБ, прижимом и основанием	Датчик в полной сборке
Сжатие периметра Δ_-, мкм	1,250	1,430	1,395	1,260
Расширение периметра Δ_+, мкм	1,187	0,909	0,881	0,820
Результирующее изменение периметра Λ_Σ, мкм	2,437	2339	2,276	2,080
Температура в точке перегиба, °С	Минус 9	7	10	12

Обсуждение полученных результатов

Согласно данным, полученным в ходе эксперимента, сделаны следующие выводы:

1.Экспериментально установлено наличие точки смены направления дрейфа резонатора зеемановского ДУС вследствие нелинейного ТКЛР ситалла при температуре минус 9 °С. При этом с увеличением количества конструкционных элементов в датчике точка смены направления смещается в сторону положительных температур на 21 °С, что стоит учитывать при выборе типа активных элементов СРП [3].

2.Собственное сжатие периметра резонатора составило 1,250 мкм. После установки ПБ наблюдалось увеличение данного значения на 0,18 мкм. Последующая установка прижима, основания и магнитного экрана позволили снизить эту величину до исходного значения.

3.Собственное расширение периметра резонатора составило 1,187 мкм. Последующая установка конструкционных элементов уменьшила это значение на 0,367 мкм. Из этого можно судить о худшей собственной термостабильности резонатора при положительных температурах.

Таким образом, результирующий вклад конструкционных элементов приводит к снижению суммарного дрейфа периметра зеемановского ДУС на 0,357 мкм в рабочем диапазоне температур благодаря собственным температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР), отличным от ТКЛР материала моноблока резонатора.

Литература

1. *Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И.И.* Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 2(512). – С. 171-179.
2. *Голяев Ю.Д., Запотылько Н.Р., Недзвецкая А.А., Синельников А.О., Тихменев Н.В.* Лазерные гироскопы с увеличенным временем непрерывной работы // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 49-51.
3. *Запотылько Н.Р., Катков А.А., Синельников А.О.* Пассивная термокомпенсация оптического периметра лазерных гироскопов, изготовленных с использованием различных конструкционных материалов // Датчики и системы. 2014. № 1 (176). С. 8-13.
4. *Игнатов А.Н., Крехова Е.Ю.* Создание технологии производства крупногабаритных заготовок оптического ситалла СО-115М // АО ЛЗОС. 5 с. URL: https://www.oop-ros.org/maket/part2/2_20.doc
5. *Синельников А.О., Катков А.А., Запотылько Н.Р., Савельев И.И.* Влияние свойств конструкционных материалов на выходные характеристики зеемановских датчиков угловых скоростей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 1. С. 45-51.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Contribution of Structural Elements to the Temperature Drift of the Zeeman Laser Angular Velocity Sensors Perimeter

Y.A. Zubarev[1], A.O. Sinelnikov[1,2], A.A. Katkov[2]

[1] JSC «Research Institute «Polyus» named after M.F. Stelmakh»
117342, Moscow, Vvedenskogo st., 3, building 2
[2] People's Friendship University of Russia
11978, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6;
e-mail: zubyar@mail.ru

Received August 6, 2021 PACS: 06.30.Gv

The paper presents the results of experimental research of the influence of structural elements of a Zeeman laser angular velocity sensors (ZLS) on the value of the temperature drift of the perimeter of its resonator. It is shown that the resulting contribution of the structural elements leads to decrease in the temperature drift of its perimeter due to the intrinsic thermal coefficient of linear expansion (TCLE) which are different from the TCLE of the resonator monoblock material.

Keywords: Zeeman laser angular velocity sensors, resonator, thermal deformations, thermal coefficient of linear expansion.

References

1. *Azarova V.V., Golyayev Yu.D., Savelyev I.I.* // Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 45, No. 2 (512). pp. 171-179.
2. *Golyaev Y.D., Zapotylko N.R., Nedzvetskaya A.A., Sinelnikov A.O., Tikhmenev N.V* // 18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS, 2011. – Proceedings, 2011, p. 53.
3. *Zapotylko N.R., Katkov A.A., Sinelnikov A.O* // Sensors and systems. 2014. № 1 (176). p. 8-13.
4. *Ignatov A.N., Krekhova E.Yu.* // JSC LZOS. P.5. URL: https://www.oop-ros.org/maket/part2/2_20.doc.
5. *Sinelnikov A.O., Katkov A.A., Zapotylko N.R., Saveliev I.I.* // News of the Tula State University. Technical science. 2020. № 1. pp. 45-51.

УДК 537.63

МАГНИТНЫЕ НАНОКОНТЕЙНЕРЫ ДЛЯ ДОСТАВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ

Артем Алексеевич Лактионов, Ольга Михайловна Алыкова,
Алексей Владимирович Рыбаков, Владимир Вячеславович Смирнов

Астраханский государственный университет
414056, Астрахань, Татищева, 20а; e-mail: artemchiklak@mail.ru

В данной работе рассмотрена возможность доставки лекарств с помощью использования магнитных наноконтейнеров. Данный метод основан на использовании метода гипертермии. С помощью данного метода возможно дальнейшее развитие методик лечения онкологических заболеваний и других злокачественных образований.
Ключевые слова: магнитные наночастицы, ферромагнетики, гипертермия, опухоль, медицина.

Магнитные наночастицы обладают рядом отличительных свойств среди которых: зависимость проницаемости ферромагнетиков от напряженности внешнего магнитного поля; сохранение намагниченности ферромагнетиков после снятия внешнего поля, причем зависимость магнитной индукции от напряжения имеет характерный вид, называемый петлей гистерезиса; мелкий размер частиц позволяет им проникнуть в расширенные сосуды, находящиеся около опухоли, диаметр которых 150÷300 нанометров.

Характеристики нагрева под действием внешнего переменного магнитного поля зависят от физико-химических характеристик магнитных наночастиц, которые влияют на магнитные свойства, процессы релаксации и гистерезисные потери. На характеристики магнитной гипертермии наночастиц влияют такие физико-химические характеристики как: химический состав, их структура, размеры магнитных ядер, размеры частиц и свойства среды, в которой растворены частицы, а так же частота и амплитуда создаваемого магнитного поля [1].

Установка для первого эксперимента состоит из кюветы с суспензией, содержащей магнитные частицы (магнитной жидкости на основе декстрана или глицерина), системы измерения температуры (термопары подключенной к мультиметру) и системы генерации и контроля магнитного поля (катушек, соединительных проводов, лабораторного источника питания с возможностью регулировки напряжения и силы тока). В качестве основы для магнитной жидкости изначально был выбран реополиглюкин. Он представляет собой декстран с молекулярной массой от 30000 до 40000 – 10 г, натрия хлорид – 0,9 г, и воду для инъекций – до 100 мл). На образцах, использующих эту основу, были проведены эксперименты по индукционному нагреву.

Дополнительные эксперименты были проведены с использованием глицерина. Это решение было обусловлено желанием повысить вязкость получаемого для эксперимента раствора и увеличить время осаждения частиц, что позволило увеличить время воздействия магнитного поля. В первом эксперименте на катушки подавалось синусоидальное напряжение амплитудой от 2÷15 В при токе 5 А от генератора переменного источника питания. Частота переменного тока – 50 Гц. Измерения температуры проводились с использованием термопары ETP-02A, предназначенной для работы в диапазоне –50… +400°C подключённой к мультиметру.

Образцы магнитных жидкостей были помещены в переменное магнитное поле. Эксперименты проводились в комнате с низкой влажностью при температуре 25 градусов Цельсия, что исключало побочное действие окружающей среды на нагрев. Действие переменного магнитного поля оказывалось на протяжении 20 минут при каждом отдельном измерении с разными показателями напряжения.

В результате проведенных исследований при использовании двух параллельно подключенных катушек и магнитной жидкости на основе декстрана, нагреть частицы при заданном напряжении и силе тока не удалось, в случае со вторым экспериментом, проведенным с использованием магнитной жидкости на основе глицерина, результат оказался мал – 1–1,5 градуса Цельсия. При использовании максимально возможных параметров экспериментального оборудования, благодаря большей вязкости и времени осаждения частиц (260 секунд), был получен лучший результат.

Произведенные на практике опыты показали свою возможную эффективность, в планируемом экспериментальном исследовании с учетом предыдущего опыта, предполагается увеличить мощность магнитного переменного поля и уменьшить размер полученных наночастиц феррита. Что позволит увеличить время осаждения и сделать раствор более равномерным, что, в свою очередь, позволит увеличить нагрев получаемой магнитной жидкости.

Литература

1. *Rosensweig, Ronald. (2002).* Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 252. 370-374.

Magnetic Nanocontainers for Drug Delivery

A. A. Laktionov,
O. M. Alykova, A.V. Rybakov, V.V. Smirnov

Astrakhan State University
414056, Astrakhan, Tatishcheva, 20a;
e-mail: artemchiklak@mail.ru

Received October 15, 2021 PACS: 42.60.Fc

In this paper, the possibility of drug delivery using magnetic nanocontainers is considered. This method is based on the use of hyperthermia. With the help of this method, it is possible to further develop methods of treating oncological diseases and other high-quality formations.

Keywords: magnetic nanoparticles, ferromagnets, hyperthermia, tumor, medicine.

References

1. *Rosensweig, Ronald. (2002).* Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 252. 370-374.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 537.9

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК СО СТРУКТУРОЙ ФЕРРИТОВ ГРАНАТОВ

Глеб Сергеевич Максимов

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Вернадского, 4;
e-mail: neondreamer00@gmail.com

Работа посвящена рентгендифракционному исследованию ряда структурных характеристик и величин коэффициентов теплового расширения эпитаксиальной пленки и подложки и их изменению в температурном интервале (20–500) °С. Показано, что с увеличением температуры параметры элементарной решетки пленки и подложки растут, а величина их рассогласования уменьшается. Установлено, что коэффициент теплового расширения α пленки на интервалах от 100 до 200 °С и от 300 до 400 °С значительно больше, чем коэффициент α подложки.
Ключевые слова: феррит-гранатовые пленки, эпитаксия, рентгеноструктурный анализ, тепловое расширение.

Эпитаксиальные структуры висмутсодержащих феррит-гранатов, выращиваемые на подложках из гадолиний-галлиевого граната обладают высокими магнитооптическими характеристиками и используются для изготовления различных магнитооптических устройств: оптических элементов для волоконно-оптических линий связи, магнитооптических модуляторов, бесконтактных датчиков магнитного поля.

Главным критерием совершенства кристаллической структуры эпитаксиальных пленок является величина несоответствия размеров элементарных ячеек кристаллических решеток подложки и пленки: $\Delta a = a_{\text{подложки}} - a_{\text{пленки}}$. Это несоответствие в сочетании с различными коэффициентами теплового расширения пленки и подложки приводит к возникновению деформаций и напряжений в растущей пленке, вызывая ее кристаллическое несовершенство и влияя на ее свойства, [1].

В работе исследовалась феррит-гранатовая висмутсодержащая пленка толщиной 4 мкм, выращенная методом жидкофазной эпитаксии из раствора в расплаве, на подложке из галлий-гадолиниевого граната $Gd_3Ga_5O_{12}$ кристаллографической ориентации (111) с величиной параметра элементарной ячейки a = 12,382 Å и толщиной 0,5 мм. Структурное исследование образца проводили на рентгеновском дифрактометре Shimadzu с использованием высокотемпературной камеры. Съемка производилась в медном (Cu) K_α-излучении с использованием графитового монохроматора при температурах 20, 100, 200, 300, 400 и 500 °С с шагом по углу 0,02°.

Величина несоответствия Δa рассчитывалась по формуле:

$$\Delta a = \frac{\lambda}{2}\sqrt{h^2+k^2+l^2}\left(\frac{1}{\sin\theta_{\text{подложка}}} - \frac{1}{\sin\theta_{\text{пленка}}}\right), \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, θ – угол положения дифракционного пика; h, k, l – его индексы.

Зависимость Δa от температуры, рассчитанная для отражения (444), приведена на графике, рис. 1.

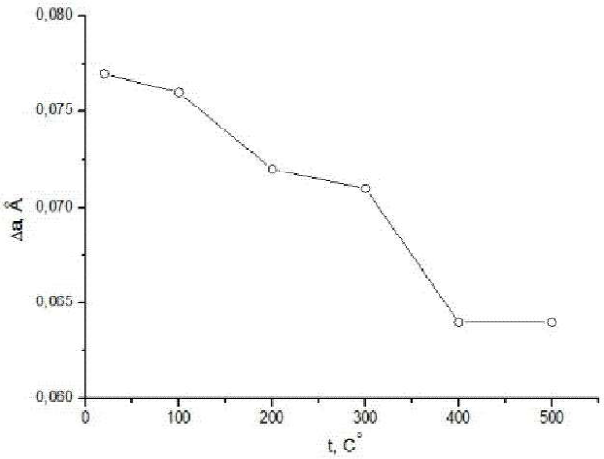


Рисунок 1. Уменьшение разницы параметров элементарных ячеек подложки и пленки с ростом температуры.

Величина рассогласования особенно резко спадает на двух температурных участках: 100–200 °С и 300–400 °С.

По формуле (2) были рассчитаны коэффициенты теплового расширения (КТР), табл. 1.

$$\alpha = \frac{1}{a_{\text{н}}}\frac{a_{\text{к}} - a_{\text{н}}}{\Delta t}, \quad (2)$$

где $a_{\text{к}}$ и $a_{\text{н}}$ – конечная и начальная величина параметра элементарной ячейки на температурном интервале Δt.

Таблица 1

Коэффициенты теплового расширения пленки и подложки

Δt,°C	20-100	100-200	200-300	300-400	400-500
$\alpha_{\text{пленки}}$ 10^{-6}, 1/°C	5,99	9,83	8,85	13,20	10,3
$\alpha_{\text{подложки}}$ 10^{-6}, 1/°C	5,65	5,97	7,83	7,82	10,55
$\alpha_{\text{пленки}}/\alpha_{\text{подложки}}$	1,06	1,65	1,1	1,68	0,98

Видно, что на интервалах 100–200 °С и 300–400 °С коэффициент теплового расширения пленки в 1,7 раза больше, чем у подложки. В то время как для других интервалов это отношение приблизительно равно 1. Резкое возрастание КТР пленки на этих участках, скорее всего, связано с тем, что в этих температурных интервалах находятся температуры фазовых переходов, связанных с изменением магнитного порядка в пленке.

Литература

1. *Высоких Ю.Е., Краснобородько С.Ю., Шевяков В.И., Бержанский В.Н., Михайлова Т.В., Шапошников А.Н., Прокопов А.Р., Недвига А.С.* Магнитно-силовая микроскопия доменной структуры феррит-гранатовых пленок – носителей термомагнитной записи. – Известия вузов. Электроника, 22, 6 (2017), с. 596-601.

Specificity of Thermal Expansion of Epitaxial Films with Garnet Ferrite Structure

G.S. Maksimov

Vernadsky Crimean Federal University
295007, Simferopol, Vernadsky, 4;
e-mail: neondreamer00@gmail.ru

Received October 14, 2021 PACS: 68.55.J-

An X-ray diffraction study of structural characteristics and values of the thermal expansion coefficients of the epitaxial film and substrate and their change in the temperature range (20–500) °C was carried out. It is shown that with an increase in temperature, the lattice parameters of the film and substrate increase, and the magnitude of their mismatch decreases. It was found that the coefficient of thermal expansion б of the film in the intervals from 100 to 200 °C and from 300 to 400 °C is greater than the coefficient б of the substrate.

Keywords: ferrite-garnet films, epitaxy, X-ray structural analysis, thermal expansion.

References

1. *Vysokikh Yu.E., Krasnoborodko S.Yu., Shevyakov V.I., Berzhansky V.N., Mikhailova T.V., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Nedviga A.S.* Magnetic force microscopy of the domain structure of ferrite-garnet films – carriers of thermomagnetic recording. – Proceedings of universities. Electronics, 22, 6 (2017), pp. 596-601 [in Russian].

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Александр Александрович Сатаев, Александр Максимович Самойлов, Алексей Алексеевич Блохин, Вячеслав Викторович Андреев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24; e-mail: sancho_3685@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования влияния динамических воздействий, определяемых в виде периодического изменения пространственной ориентации объекта (качки), на теплогидравлические процессы в судовой ядерной энергетической установке.
Ключевые слова: судовая ядерная энергетическая установка, смешение, неизотермические потоки, качка.

Процессы смешения неизотермических потоков существенно определяют параметры теплоносителя на входе в активную зону в режимах с неполным составом работающего оборудования и, как следствие, – теплотехническое состояние активной зоны. При работе ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в переходных режимах должны выполняться требования по надежности теплоотвода от активной зоны реактора и ее безопасность.

Основными переходными режимами работы реакторов с водой под давлением является работа при внезапном уменьшении расхода теплоносителя вследствие отключения циркуляционного насоса 1 контура и работа ЯЭУ при сбросе электрической нагрузки или отключении турбогенератора.

Также стоит отметить, что все судно, а также реакторная установка, установленная на нем, практически постоянно находится под воздействием различных внешних динамических сил, оказывающих влияние на его пространственную ориентацию, как в нормальной эксплуатации, так и особенно в аварийных ситуациях.

Целью данного исследования является построение экспериментальной и расчетной модели для исследования теплогидравлических процессов, нахождение путей интенсификации этих процессов, с учетом влияния внешних динамических сил (качка, крен), присущих судовой ЯЭУ.

На сегодняшний день основным методом исследования теплогидравлических процессов до сих пор остается эксперимент. Хочется отметить, что большинство явлений, происходящих в рассматриваемых системах, с достаточной степенью представительности могут быть исследованы на мелкомасштабных моделях, из них возможно получить значительный объем информации [1].

Для моделирования процессов неизотермического смешения был изготовлен экспериментальный стенд, представляющий собой четырехпетлевую модель проточной части судовой ядерной энергетической установки. В качестве объекта исследования были выбраны опускной кольцевой участок циркуляционного тракта, а также модель-имитатор активной зоны. В качестве метода исследования был применен метод температурного зондирования, что реализовано с помощью установки сетки из термодатчиков непосредственно на стенке модели вдоль опускного кольцевого участка.

Для инициирования колебаний в одной/двух плоскостях модель помещается на качающуюся платформу, изготовленную в виде крестообразного подвеса. Модель может осуществлять колебания в заданной плоскости, подобно математическому маятнику [2].

Обработка данных, полученных в экспериментах, показала, что при качке может возникнуть необходимость снижения мощности установки из-за перегрева отдельных узлов реактора.

Периодические колебания повлияли на процессы, происходящие внутри модели. Основное влияние они оказали на время переходного процесса, температурный градиент, вертикальную составляющую проекции скорости. В дальнейшем данные параметры будут уточняться, будет более детально исследовано влияние других факторов на смешение неизотермических потоков в судовой ЯЭУ.

Литература

1. *Крапивцев В.Г., Солонин В.И.* Модельные исследования межпетлевого перемешивания теплоносителя во внутриреакторном напорном тракте ВВЭР-1000 // Атомная энергия 2018. – Т. 125, № 5. – С. 271–277.
2. *Андреев В.В., Сатаев А.А.* Патент на полезную модель № 202079; Двухплоскостной стенд для испытаний на качку и способ его применения для испытания теплогидравлических моделей: № 2020136082: заявл. 03.11.2020: опубл. 29.01.2021

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Investigation of the Influence of Dynamic Influences on Thermohydraulic Processes

A. A. Sataev, A. M. Samoilov, A. A. Blokhin, V. V. Andreev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Minin Street, 24;
e-mail: sancho_3685@mail.ru

Received July 21, 2021 PACS: 42.60.Fc

This paper presents the results of an investigation of the effect of dynamic influences, defined as a periodic change in the spatial orientation of the object (pitching), on the thermohydraulic processes in a ship's nuclear power plant.

Keywords: ship nuclear power plant, mixing, non-isothermal flows, pitching.

References

1. *Krapivtsev V.G., Solonin V.I.* Model studies of interloop mixing of the coolant in the in-core pressure path of VVER-1000 // Atomic Energy 2018. – Vol. 125, No. 5. – P. 271–277 [in Russian].
2. *Andreev V. V., Sataev A. A.* Patent for utility model No. 202079 Two-plane test bench for pitching tests and method of its use for testing thermohydraulic models. Filed 03.11.2020, Issued 29.01.2021 [in Russian].

УДК 66.086.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОЧИСТКИ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Ирина Александровна Теслюк, Сергей Васильевич Бурдюх, Павел Федорович Прокопович

Институт геологии КарНЦ РАН
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11; e-mail: burduch@gmail.com

Существующие на данный момент методы очистки кварцевого сырья с целью получения особо чистого диоксида кремния не способны в полной мере удовлетворить требованиям по глубине очистки, сопутствующим энергетическим затратам и технологичности реализации, а также характеризуются малой универсальностью. Одним из наиболее перспективных методов, способных осуществить глубокую очистку кварца является плазменная обработка. В данной работе описывается сконструированный безэлектродный сверхвысокочастотный плазмотрон, апробация его работы на тестовом материале – порошке аморфного диоксида кремния.
Ключевые слова: безэлектродный сверхвысокочастотный плазмотрон, кварцевое сырье, плазменная обработка.

В настоящее время в мире наблюдается быстрый рост потребления промышленностью кварцевых концентратов высокой чистоты с сопутствующим развитием технологий по их получению [1]. Тем не менее, несмотря на стремительный научно-технический прогресс, по-прежнему острой остается проблема удаления субмикронных газово-жидких включений и структурных примесей, а также снижение уровня “технологического” загрязнения. Одним из перспективных методов финишной очистки является плазменная обработка, отличительной чертой которой является высокоскоростной нагрев сырья. При этом процессы ионного травления и термическое воздействие приводят к удалению поверхностных загрязнений, а быстрый нагрев частиц и последующее резкое охлаждение стимулируют вскрытие газово-жидких включений с последующими газификацией и удалением содержимого пор [2].

Предметом оригинального исследования явились разработка, создание и апробация работы безэлектродного сверхвысокочастотного плазмотрона. Отличительной чертой собранного прототипа является получение разряда в воздухе при атмосферном давлении, что позволило исключить из конструкции вакуумное оборудование. Сконструированная установка содержит магнетрон, блок питания, волноводный тракт, волновой трансформатор, концентратор поля, плазменную горелку с устройством завихрения потока газа, бункер загрузки для введения порошковых материалов и резервуар для сбора очищенного сырья. Предполагая, что разрядом поглощается около 90% генерируемого излучения, оценочное значение температуры плазмы в данной реализации конструкции составило величину порядка 4000 К [3]. На данный момент авторами ведется уточнение параметров плазмы с

использованием бесконтактных спектральных методов.

Апробация работы установки проводилась на ультрадисперсном высокопористом порошке аморфного диоксида кремния, синтезированном путем преципитации из 25% раствора метасиликата натрия («ЧДА») насыщенным раствором гидрокарбоната натрия («ХЧ»). Общий химизм протекающей при этом реакции отражен в уравнении (1). После отделения супернатанта полученный гель высушивался на воздухе и подвергался механическому размолу. Частичное удаление побочного продукта реакции (карбоната натрия) и непрореагировавших реагентов осуществлялось путем многократных повторений операций промывки порошка водой с последующими вакуумным фильтрованием через воронку Шотта класса S5 и отделением ретентата.

$$mNa_2O \cdot nSiO_2 + 2mNaHCO_3 \rightarrow 2mNa_2CO_3 + nSiO_2 \cdot mH_2O\downarrow \quad (1)$$

Исследование химического состава исходного и обработанного материала проводилось методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Было установлено, что синтезированный порошок характеризовался содержанием загрязнителя в пересчете на Na_2O ~5.9 wt.%, а однократная плазмохимическая обработка позволила уменьшить содержание примесей более чем в четыре раза (~1.3 wt.% Na_2O). Морфология поверхности частиц анализировалась методом сканирующей (растровой) электронной микроскопии. Обработанные частицы обнаруживали ярко выраженную пористость (рис. 1), что может являться косвенным свидетельством удаления примесной фазы. Побочным эффектом обработки явилось заметное спекание отдельных мелкодисперсных частиц.

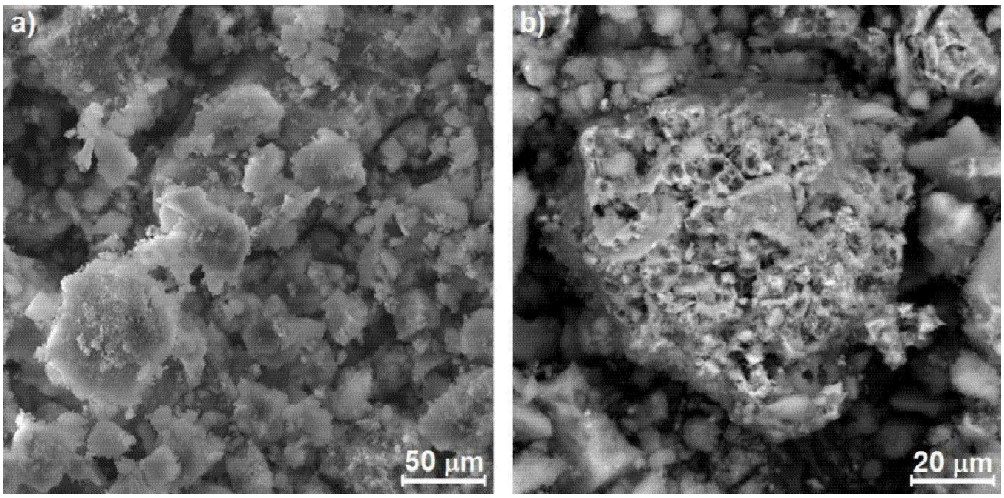


Рисунок 1. Морфология поверхности исходного (a) и обработанного (b) порошка аморфного диоксида кремния.

Согласно нашим предположениям, очистка исходного материала обусловлена прежде всего термическими реакциями исходных реагентов (2) и последующим переводом побочных продуктов в газовую фазу (температуры кипения Na_2O и NaOH составляют 1950 и 1403 °C, соответственно). Для достижения большей степени очистки за один цикл плазмохимической обработки, в данный момент проводится поиск способа предотвращения конденсации паров загрязнителя в контейнере сбора сырья. Перспективным и гармонично дополняющим конструкцию установки методом представляется использование промежуточного устройства очистки коронным (электростатическим) разрядом.

$$NaHCO_3 \xrightarrow{T \sim (140 \div 160)^\circ C} Na_2CO_3 + H_2O + CO_2 \uparrow$$

$$Na_2CO_3 \xrightarrow{T = 1000^\circ C} Na_2O + CO_2 \uparrow \qquad (2)$$

$$mNa_2O \cdot nSiO_2 + 2mH_2O \xrightarrow{T} 2mNaOH + nSiO_2 \cdot mH_2O$$

Таким образом, можно с уверенностью говорить о том, что апробация плазменного метода удаления примесей на синтетическом тестовом материале прошла успешно. Последующие шаги будут направлены на обработку кварцевого сырья природного происхождения, которое является более сложным для очистки материалом, однако авторы испытывают полную уверенность в том, что сочетание стандартных и плазмохимических методов позволит получать кварцевые концентраты пригодные для использования в отраслях, связанных с различными Hi-Tech технологиями.

Исследования проведены в рамках государственного задания ИГ КарНЦ РАН.

Литература

1. *Серых Н.М., Борисов Л.А., Федотов В.К.* Минерально-сырьевая база пьезооптического и кварцевого сырья. – Горный журнал, 2009. – № 6. – с. 34-37.
2. *Гришин Ю.М., Козлов Н.П., Кулагин А.Ю.* Экспериментальное исследование финишного этапа обогащения кварца в плазменных потоках. – Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. – № 10. Режим доступа: https://rucont.ru/efd/276680
3. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

Electrodeless Discharge for the Final Treatment of Quartz Raw Materials

I.A. Teslyuk, S.V. Burdyukh, P.F. Prokopovich

Institute of Geology, KarRC RAS
185910, Petrozavodsk, st. Pushkinskaya, 11;
e-mail: burduch@gmail.com

Received October 5, 2021 PACS: 06.30.Gv

The currently existing methods of quartz purification in order to obtain highly pure silicon dioxide are not able to fully satisfy the requirements for the depth of purification, energy costs and manufacturability, and are also characterized by low versatility. Plasma treatment is one of the most promising methods of deep quartz raw materials treatment. This paper describes the designed electrodeless microwave plasmatron, approbation of its operation on a amorphous silicon dioxide powder.

Keywords: electrodeless microwave plasmatron, quartz raw materials, plasma treatment.

References

1. *Serykh N.M., Borisov L.A., Fedotov V.K.* Mineral resource base of piezo-optical and quartz raw materials. – Gornyi Zhurnal, 2009. – No. 6. – p. 34-37 [in Russian].
2. *Grishin Yu.M., Kozlov N.P., Kulagin A.Yu.* Experimental investigations of the finish stage of quartz purification within plasma flows. – Engineering Journal: Science and Innovation, 2013. – № 10. https://rucont.ru/efd/276680 [in Russian].
3. *Raizer Yu.,* Gas Discharge Physics. – Berlin, Springer-Verlag, 1991. – 450 p.

УДК 534.01

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТЕЙ УПРУГИХ КРАЕВЫХ РЕБЕР ПОЛОЙ КРУГОВОЙ ТРУБЫ ПО ЧАСТОТАМ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Гульнара Фриловна Сафина, Гузель Зуфаровна Тухбатова

Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета
452680, Нефтекамск, Трактовая, 1; e-mail: safinagf@mail.ru

Работа посвящена краевой задаче осесиммеричных колебаний полой тонкостенной круговой трубы с упругими краевыми ребрами. Исследована задача восстановления жесткостей краевых ребер трубы по известным значениям частотам ее осесимметричных колебаний. Алгоритм решения задачи позволяет получить однозначное восстановление коэффициентов упругих краевых ребер трубы, учитывая и абсолютно жесткие их закрепления. Приведена соответствующая теорема.
Ключевые слова: тонкостенная круговая труба, осесимметричные колебания, коэффициенты упругих краев, диагностирование, частоты колебаний.

Представленная и решенная задача восстановления коэффициентов жесткостей упругих краевых ребер полой тонкостенной круговой трубы относится к задачам акустического диагностирования механических систем [1–3]. Математическое содержание осесимметричных колебаний тонкостенной круговой трубы как цилиндрической оболочки с упругими рёбрами сводится к краевой спектральной задаче

$$y^{(4)}(x) - \lambda^4 y(x) = 0, \tag{1}$$

$$y''(x) = y''(l) = 0\,, \quad y'''(0) + B_0 l^{-3} y(0) = 0\,, \quad y'''(l) - B_l l^{-3} y(l) = 0\,. \tag{2}$$

Здесь x – осевая координата, $y(x)$ и l – прогиб и длина трубы, λ – параметр, связанный с собственной частотой ω осесимметричных колебаний, B_0 и B_l – коэффициенты жесткости ребер трубы в сечениях $x = 0$ и $x = l$.

При двух мнимых и двух действительных корнях характеристического уравнения, соответствующего уравнению (1), имеем ее решение в виде:

$$y(x) = C_1 ch\lambda x + C_2 \cos\lambda x + C_3 sh\lambda x + C_4 \sin\lambda x\,. \tag{3}$$

Подставляем (3) в краевые условия (2) и с помощью определителя полученной системы находим частотное уравнение спектральной задачи (1), (2):

$$\alpha^6(1 - ch\alpha\cos\alpha) + \alpha^3(B_0 + B_l)(sh\alpha\cos\alpha - ch\alpha\sin\alpha) + 2B_0B_l sh\alpha\sin\alpha = 0\,, \tag{4}$$

в котором $\alpha = \lambda l$ – безразмерный параметр. Из (4) при различных значениях жесткостей краевых ребер определяются собственные значения рассматриваемой трубы.

Поставим и решим обратную задачу восстановления коэффициентов жесткостей краевых ребер трубы. Учитывая возможность и абсолютно жесткого закрепления краев

трубы, т.е. $0 \le B_{0,l} \le \infty$, условия (2) перепишем в виде:

$$y''(x) = y''(l) = 0, \quad a_1 y'''(0) + a_0 l^{-3} y(0) = 0, \quad b_1 y'''(l) - b_0 l^{-3} y(l) = 0. \tag{5}$$

Здесь $B_0 l^{-3} = a_0 a_1^{-1}$, $B_l l^{-3} = b_0 b_1^{-1}$ и при абсолютно жестком закреплении ребер в условиях (2) остаются только вторые слагаемые, чему соответствует случай $a_1 = 0$, $b_1 = 0$ в условиях (5).

Введем в рассмотрение следующую матрицу и ее миноры, составленные из *i*-го и *j*-го столбцов матрицы: $A = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_0 & b_1 \end{pmatrix}$, M_{ij}, $(i = 1;2;3;\ j = 2;3;4)$. В такой математической постановке задача восстановления коэффициентов жесткостей краевых ребер полой круговой трубы сводится к восстановлению матрицы A с точностью до линейной эквивалентности.

Частотное уравнение для краевой задачи (1), (5) принимает вид:

$$M_{13} f_1(\alpha_k) + (M_{14} - M_{23}) f_2(\alpha_k) + M_{24} f_3(\alpha_k) = 0, \quad k = 1;2. \tag{6}$$

где

$$f_1(\alpha_k) = 2sh\alpha_k \sin\alpha_k, \quad f_2(\alpha_i) = \alpha_k^{\,3}(ch\alpha_k \sin\alpha_k - sh\alpha_k \cos\alpha_i),$$

$$f_3(\alpha_k) = \alpha_k^{\,6}(ch\alpha_k \cos\alpha_k - 1).$$

Пусть α_1 и α_2 – два собственных значения задачи (1), (5), соответствующие двум частотам осесимметричных колебаний трубы, тогда (6) – система двух уравнений от трех неизвестных M_{13}, $M_{14} - M_{23}$, M_{24}. Справедлива теорема.

Теорема: *Если известны собственные значения* α_k $(k = 1;2)$ *задачи (1), (5), ранг матрицы системы уравнений (6) равен двум, то система имеет единственное решение относительно миноров* M_{ij}, $(i = 1;2;3;\ j = 2;3;4)$ *с точностью до постоянного множителя, по которым восстанавливается матрица* A *с точностью до линейных эквивалентных матриц.*

Полученный метод позволяет восстанавливать матрицу краевых условий, а значит и закрепления полой круговой тонкостенной трубы по известным значениям двух собственных частот ее осесимметричных колебаний. Алгоритм можно применить к безразборной диагностике любой механической системы, составляющей которой являются подобные трубы.

Литература

1. *Бабаков И.В.* Теория колебаний / И.В. Бабаков. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с.
2. Вибрации в технике: Справочник. Т.1. Колебания линейных систем. / Под ред. В.В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. *Сафина Г.Ф.* Метод определения характеристик тонкостенной круговой цилиндрической оболочки // Фундаментальные исследования. 2017. № 3. – С. 72-76.

Restoring Stiffness of Elastic Edge Ribs of Hollow Circular Pipe by Frequencies of Axisymmetric Oscillations

G.F. Safina, G.Z. Tukhbatova

Neftekamsk branch of the Bashkir state university
452680, Neftekamsk, Traktovaya St., 1;
e-mail: safinagf@mail.ru

Received October 14, 2021 PACS: 02.90

The work is devoted to the edge problem of axisimmeric oscillations of a hollow thin-walled circular pipe with elastic edge ribs. The task of restoring stiffness of edge ribs of pipe by known values of frequencies of its axisymmetric oscillations is investigated. The algorithm for solving the problem makes it possible to obtain unambiguous restoration of the coefficients of the elastic edge ribs of the pipe, taking into account their absolutely rigid fixations. The corresponding theorem is given.

Keywords: thin-walled circular pipe, axisymmetric oscillations, elastic edge coefficients, diagnostics, oscillation frequencies

References

1. *Babakov I.V.* Theory of oscillations. / I.V. Babakov. – M.: Drofa, 2004. – 591 p.
2. Vibrations in technology: Reference book. T.1. Oscillations of linear systems / Under ed. V.V. Bolotin. – M.: Machine building, 1978. – 352 p.
3. *Safina G.F.* Method for determining the characteristics of a thin-walled circular cylindrical shell // Basic research. 2017. № 3. – P. 72-76.

Специальный выпуск журнала
Физическое образование в вузах. Т. 27, № 4С, 2021

УДК 629.7.054.07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ШИРИНЫ ЗОНЫ ЗАХВАТА ЧАСТОТ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН В ЗЕЕМАНОВСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ДАТЧИКАХ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Иван Николаевич Хохлов[1,3], Антон Олегович Синельников[2,3]

[1] ФГБОУ высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

[2] ФГАОУ высшего образования «Российский университет дружбы народов»
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

[3]АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»
117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: ivan.xoxlov9769@gmail.com

В работе представлены основные результаты сравнительного анализа двух принципиально разных методов измерения ширины зоны захвата в зеемановских лазерных датчиках угловой скорости (ДУС). Показано, что применение «Метода нелинейных искажений масштабного коэффициента» (МК) дает значительные преимущества по сравнению с «Методом входа в зону захвата», позволяя автоматизировать процесс и снизить погрешность.
Ключевые слова: масштабный коэффициент, ширина зоны захвата, частотная подставка, зеемановский лазерный датчик угловой скорости.

Введение

Синхронизация встречных волн через обратное рассеяние или захват частот является хорошо известным физическим эффектом, существенно ограничивающим точность гироскопических систем на базе лазерных ДУС [1, 2]. К данным типам устройств относятся зеемановские ДУС и лазерные гироскопы на их основе [3], поэтому задача контроля ширины зоны захвата является актуальной.

«Метод входа в зону захвата» заключается в регистрации максимального тока I_i, протекающего в невзаимном устройстве (НУ) зеемановского ДУС, при котором частоты встречных волн синхронизируются [4]. Магнитное поле, создаваемое соленоидами НУ при протекании через них тока I_i, приводит к расщеплению частот встречных волн в кольцевом резонаторе зеемановского ДУС. Напряженность магнитного поля эквивалентна угловой скорости реального вращения. Данная особенность зеемановского ДУС позволяет измерить ширину зоны захвата без применения реального вращения.

Направление «искусственного вращения» зависит от направления протекания тока (I_1 или I_2) в соленоидах НУ. Плавное уменьшение тока I_i создает эффект «искусственного

вращения» с уменьшающейся угловой скоростью. При определенном значении тока I_i угловая скорость «искусственного вращения» становится настолько мала, что проявляется эффект захвата частот. Это позволяет определить границы, а следовательно, и ширину зоны захвата Ω_L [Гц], по формуле (1):

$$\Omega_L = \frac{f}{I_0}(|I_1| + |I_2|), \tag{1}$$

Где: f – разность частот выходного сигнала [Гц], I_0 – рабочий ток НУ [А], $I_{1,2}$ – токи разной полярности, при которых наблюдается синхронизация частот встречных волн [А].

«Метод нелинейных искажений МК» заключается в измерении трех МК (угол поворота, соответствующий одному периоду выходного сигнала ДУС) в результате реального вращения зеемановского ДУС на фиксированный угол в двух направлениях, при определенных угловых скоростях [5]. МК K_i [″/Т] рассчитывается по формуле (2):

$$K_i = \frac{2\Phi}{|N_1 - N_2|} \tag{2}$$

Где: 2 – коэффициент, учитывающий поворот ДУС на фиксированный угол в двух направлениях, Ф – угол поворота ДУС, выраженный в угловых секундах, N_1 – число импульсов с учетом знака, накопленных программой обработки информации за время измерения при повороте по часовой стрелке, N_2 – против часовой стрелки.

При этом должно соблюдаться следующее неравенство угловых скоростей (3), при которых измеряются МК K_1, K_2, K_3 соответственно:

$$\Omega_1 >> \Omega_0 > \Omega_2 > \Omega_3 \tag{3}$$

Где: Ω_0 – разность частот выходного сигнала [°/с].

Ширина зоны захвата Ω_L [Гц] вычисляется по формуле (4):

$$\Omega_L = \frac{\left(b + \sqrt{b^2 - 4a\left(c - \left(\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_1}{K_3}\right)10^6\right)}\right)3600}{2aK_{\text{ср}}} \tag{4}$$

Где: a, b, c – эмпирические коэффициенты, 3600 – коэффициент перевода градусов в угловые секунды, $K_{\text{ср}}$ – среднее значение МК [″/Т].

Сравнительный анализ методов и обсуждение результатов

Для данного исследования было отобрано 66 зеемановских ДУС. Измерения ширины зоны захвата проводились двумя методами, описанными выше. Гистограмма полученных данных представлена на рисунке 1.

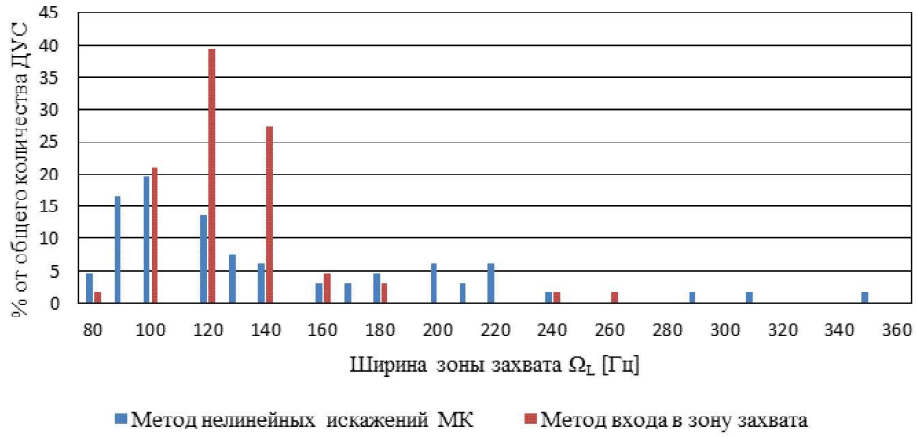


Рисунок 1. Гистограмма распределения процентного количества ДУСов по значениям ширины зоны захвата.

Средние значения ширины зоны захвата: $<\Omega_L>$ = 128 Гц (Метод входа в зону захвата), $<\Omega_L>$ = 141 Гц (Метод нелинейных искажений МК). Данные значения совпадают более чем на 90%, что позволяет судить о высокой достоверности «Метода нелинейных искажений МК». При этом, более широкий диапазон значений ширины зоны захвата, измеренных «Методом нелинейных искажений МК», говорит о его более высокой чувствительности, обусловленной автоматизированным процессом измерения с применением реального вращения ДУС, что соответствует штатному режиму его работы.

Литература

1. *Бекетов С.А., Бессонов А.С., Петрухин Е.А., Хохлов И.Н., Хохлов Н.И.* Влияние обратного рассеяния на нелинейные искажения масштабного коэффициента лазерного гироскопа с прямоугольной подставкой // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 11. С. 1059–1067.
2. *Петрухин Е.А., Хохлов И.Н., Хохлов Н.И.* О корреляционной связи диссипативных и консервативных составляющих обратного рассеяния в кольцевом резонаторе лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 4. С. 359–364.
3. *Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И.* Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 2. С. 171–179.
4. *Синельников А. О., Ермак Е. М., Коржавый А. П.* Особенности захвата частот в лазерном гироскопе с частотной подставкой на эффекте Зеемана. Наукоемкие технологии, № 10, т. 13, с. 40-45, 2012.
5. *Khokhlov I.N., Sinelnikov A.O.* A method for measuring the lock-in zone in laser gyro sensors. 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russia, 30 May – 03 June, 2021. DOI: 10.23919/icins43216.2021.9470854

Comparative Analysis of Methods for Measuring Lock-in Zone in Zeeman Laser Angular Velocity Sensors

I.N. Khokhlov[1,3], A.O. Sinelnikov[2,3]

[1] *Moscow Aviation Institute (National Research University)*
125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4

[2] *Peoples' Friendship University of Russia*
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6

[3] *JSC «Research Institute «Polyus» named after M.F. Stelmakh»*
117342, Moscow, Vvedenskogo str., 3, building 2
e-mail: ivan.xoxlov9769@gmail.com

Received August 6, 2021 PACS: 06.30.Gv

The paper presents the main results of a comparative analysis of two fundamentally different methods of measuring lock-in zone in Zeeman laser angular velocity sensors. It's shown that the application of the «Method of nonlinear distortions of the scale factor» gives significant advantages compared to the «Method of entering the lock-in zone», allowing you to automate the process and reduce the error.

Keywords: scale factor, lock-in zone, frequency bias, Zeeman laser angular velocity sensor.

References

1. *Beketov, S.E., Bessonov, A.S., Petrukhin, E.A., Khokhlov, I.N., Khokhlov, N.I.* Effect of backscattering on nonlinear distortions of the scale factor of a laser gyro with a rectangular bias // Quantum Electronics, 2019, 49(11), p. 1059–1067
2. *Petrukhin, E.A., Khokhlov, I.N., Khokhlov, N.I.* Correlation relationship between the dissipative and conservative backscattering components in the ring resonator of a laser gyroscope // Quantum Electronics, 2021, 51(4), p. 359 – 364 Kvantovaya Elektronika and IOP Publishing Limited https://doi.org/10.1070/QEL17466
3. *Azarova, V.V., Golyaev, Y.D., Savelyev, I.I.* Zeeman laser gyroscopes // Quantum Electronics, 2015, 45(2), pp. 171–179

4. *Sinelnikov, A.O., Ermak, E.M., Korzhavyi, A.P.* Features of capture of frequenies in the laser gyroscope with the frequency support on effect Zeemann //Naukoyomkie tehlologii, № 10(13), p. 40-45, 2012.
5. *Khokhlov I.N., Sinelnikov A. O.* A method for measuring the lock-in zone in laser gyro sensors. 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russia, 30 May – 03 June, 2021. DOI: 10.23919/icins43216.2021.9470854

ИННОВАЦИИ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО В ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 629.7.054.07

СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ ЗЕЕМАНОВСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Наталия Евгеньевна Фетисова[1], Синельников Антон Олегович[1,2]

[1] АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»
117342, Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: nemerzlikina.polus@mail.ru

[2] ФГАОУ высшего образования «Российский университет дружбы народов»
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В работе рассмотрена задача уточнения системы параметров лазерных гироскопов на примере зеемановских лазерных датчиков угловых скоростей. Даны представления о взаимосвязи параметров датчика, режима его работы и эксплуатации с характеристиками конечных систем назначения. Описаны преимущества внедрения гибкой информационно-коммуникационной системы в процесс производства лазерных гироскопов.
Ключевые слова: система параметров, лазерный гироскоп, зеемановский лазерный гироскопический датчик, датчик угловой скорости, информационно-коммуникационная система.

Введение

Отсутствие единой терминологии в какой-либо области специальных научных знаний создает значительные трудности при ее изучении, а также анализе существующих разработок и создании новых изделий.

Так в 1992 году была создана специальная научная комиссия, организованная Комитетом в области фундаментальных наук РАН совместно с Секцией навигационных систем и их чувствительных элементов, для вопроса упорядочивания терминологии в области гироскопии. Итогом двухлетней работы комиссии стал сборник научно-нормативной терминологии, выпущенный в 1994 г. и вобравший в себя основные рекомендуемые к употреблению термины в области гироскопии. Представленная в сборнике система терминов и определений смогла охватить не только специфические понятия самой гироскопии, но и необходимые понятия из смежных наук [1].

Однако, бурное развитие гироскопических приборов и расширение областей их применения, привело к соответствующему расширению требований к точностным и эксплуатационным характеристикам и как следствие появлению новых параметров.

Сегодня вновь встает задача уточнения, обновления и дополнения используемой в гироскопии терминологии. Единый терминологический подход призван облегчить согласование взаимных требований между смежниками, составление технической документации, разработку методик испытаний, позволить поднять уровень преподавания наук данной области и как следствие, улучшить качество выпускаемых предприятиями продуктов.

В представленной работе рассмотрен вопрос актуальной задачи уточнения системы параметров лазерных гироскопов (ЛГ) на примере лазерных датчиков угловых скоростей с магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана.

Ключевые особенности системы параметров зеемановских ДУС

Лазерные датчики угловой скорости (ДУС) являются одноосными чувствительными элементами ЛГ, предназначенного для измерения угловых перемещений и угловых скоростей вращения в инерциальном пространстве. При этом лазерные датчики могут применяться как в составе одноосных измерительных приборов (гирокомпас, датчик угловых перемещений), так и в составе трехосных гироскопов для инерциальных измерительных блоков.

На сегодняшний день в АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» разработан типоряд лазерных ДУС с магнитооптической частотной подставкой, обладающих унифицированной конструкцией и предназначенных для применения в различных измерительных системах [2].

В общем виде основные параметры датчика можно разделить на конструкционные, электрические, временные, функциональные и показатели надежности. Каждой из основных характеристик соответствуют дополнительные параметры, общее число которых может достигать 40 и более показателей. Таким образом, датчик является более информативным прибором, чем системы, в которых он применяется.

В зависимости от конечного назначения один и тот же тип зеемановского ДУС может эксплуатироваться в различных режимах работы, обладая при этом собственным набором ключевых параметров, определяющих его конечные точностные и эксплуатационные характеристики [3–5]. В таблице 1 обобщенно представлены возможные режимы работы датчика в зависимости от области его применения.

Таблица 1

Вид системы и режимы работы ДУС

Тип системы	**Трехосный ЛГ, одноосный ЛГ**				
Режим работы ДУС	**Двухчастотный**		**Квазичетырехчастотный**		**Четырехчастотный**
Время работы ДУС	1 час	4 часа	1 час	8 часов	48 часов
	8 часов	48 часов	неограниченно		

Как видно из Таблицы 1, зеемановские ДУС эксплуатируются в двух видах ЛГ: одноосных и трехосных. При этом возможна их эксплуатация в трех режимах работы: двухчастотный, четырехчастотный и квазичетырехчастотный. Для каждого вида ЛГ при разных режимах работы ДУС могут предъявляться различные требования как ко времени их работы, так и к точностным и прочим выходным характеристикам.

Например, для трехосного ЛГ с двухчастотным режимом работы ДУС, точность прибора будет зависеть от дрейфа нуля, конечная величина которого будет определяться суммой его токовой и магнитной составляющих. Следовательно, к этим параметрам будут предъявляться особо строгие требования. При квазичетырехчастотным режиме работы ДУС конечная точность прибора будет зависеть в большей степени от токового дрейфа, благодаря вычитанию магнитной составляющей. А наибольшей точности возможно достичь при четырехчастотном режиме работы.

Таким образом, можно констатировать, что система параметров лазерных ДУС гораздо разнообразнее и информативнее, чем система параметров ЛГ. Если описать взаимосвязь имеющихся параметров ДУС с конечными измерительными приборами, то можно создать гибкую и эффективную систему их комплектования. Такая система, ещё на этапе производства датчиков, сможет сама определять их оптимальные режимы работы и подбирать для какого вида ЛГ он наиболее подходит.

Подобная информационно-коммуникационная система (ИКС) в настоящий момент разрабатывается и частично введена в производство ЛГ на этапе технологических испытаний зеемановких ДУС [6]. Принцип её работы заключается в анализе получаемых в процессе испытаний датчиков данных. В режиме реального времени данные поступают в ИКС, в которую заложены нормы параметров ДУС и конечные характеристики ЛГ. Анализируя параметры каждого конкретного ДУС, система присваивает ему квалификацию соответствующую характеристикам ЛГ и дает рекомендации по режиму его работы. В процессе испытаний ДУС может менять свою квалификацию исходя из изменения своих параметров. Таким образом, ИКС реализует принцип гибкости: подстраивается под быстро изменяющиеся требования, предъявляемые к датчикам, позволяет оперативно работать с данными и своевременно принимать решения о корректировке проведения испытаний.

Заключение

Исходя из вышесказанного, очевидно, что уточнение характеристик лазерных ДУС и их взаимосвязи с параметрами систем назначения, следует учитывать на ранних этапах производства ЛГ.

Литература

1. *Отв. редактор Новожилов И.В.* // Гироскопия, терминология. Сборник научно-нормативной терминологии, выпуск 118, М.: Институт проблем передачи информации РАН, 1994. – 38 С.
2. *Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И.* // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 2(512). – С. 171-179.
3. *Синельников А.О., Товстопят А.В., Морозов А.Д.* // Физическое образование в вузах. 2019. Т. 25. № 2С, С. 335-338.
4. *Синельников А.О., Савельев И.И., Медведев А.А.* // Физическое образование в вузах. 2018. Т. 24, № 1, С. 228-230.
5. *Голяев Ю.Д., Запотылько Н.Р., Недзвецкая А.А., Синельников А.О., Тихменев Н.В.* // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 49-51.
6. *Мерзликина Н.Е., Синельников А.О., Голубев В.Д.* // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 5. С. 114-120.

Parameter System of Zeeman Laser Gyro Sensors

N.E. Fetisova[1], A.O. Sinelnikov[1,2]

[1] JSC «Research Institute «Polyus» named after M.F. Stelmakh»
117342, Moscow, Vvedenskogo st., 3, building 2;
e-mail: nemerzlikina.polus@mail.ru

[2] People's Friendship University of Russia
11978, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6

Received September 30, 2021 PACS: 06.30.Gv

The paper considers the problem of refining the system of parameters of laser gyroscopes using the example of Zeeman laser angular velocity sensors. The idea of the relationship between the parameters of the sensor, its mode of operation and operation with the characteristics of the final destination systems are given. The advantages of introducing a

flexible information and communication system into the manufacturing process of laser gyroscopes are described.

Keywords: system of parameters, laser gyro, Zeeman laser gyroscopic sensor, angular velocity sensor, information and communication system.

References

1. *Resp. editor Novozhilov I.V. //* Gyroscopy, terminology. Collection of scientific and normative terminology, issue 118, Moscow: Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, 1994. – 38 pp.
2. *Azarova V.V., Golyayev Yu.D., Savelyev I.I.* // Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 45, No. 2 (512). – pp. 171-179.
3. *Sinelnikov A.O., Tovstopyat A.V., Morozov A.D.* // Physical education in universities. – 2019. – Vol. 25, No. 2S, pp. 335-338.
4. *Sinelnikov A.O., Savelyev I.I, Medvedev A.A.* // Physical education in universities. – 2018. – Vol. 24, No. 1, pp. 228-230.
5. *Golyaev Y.D., Zapotylko N.R., Nedzvetskaya A.A., Sinelnikov A.O., Tikhmenev N.V.* // 18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2011. – Proceedings, 2011, p. 53.
6. *Merzlikina N.E., Sinelnikov A.O., Golubev V.D. //* News of the Tula State University. Technical science. 2018. № 5. pp. 114-120.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Подписано в печать 17 декабря 2021 г.
Формат 70x100/16. Заказ № . Тираж 100 экз. П.л. 5,5.
Отпечатано в типографии ООО «Издательский Дом МФО».
Москва, В-333, Ленинский проспект, 53. Тел.: (499) 132 66 51