

ISSN 1996-0948  
ISSN 2949-561X (Online)

**ПРИКЛАДНАЯ  
ФИЗИКА**

---

**3` 26**

**APPLIED  
PHYSICS**



**Прикладная физика®**  
**№ 3, 2026**

Журнал основан в 1994 году

**Научно-технический рецензируемый журнал предназначен для публикации статей о последних достижениях в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения.**

Периодичность – 6 номеров в год.

**Учредитель и издатель:**

Государственный научный центр  
Российской Федерации  
АО «НПО «ОРИОН»  
111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9

**Журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий – Белый список, индексируется в базах данных РИНЦ, SCOPUS, входит в базы данных Chemical Abstracts (CA), Russian Science Citation Index (RSCI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar.**

*Главный редактор:*

**Бурлаков Игорь Дмитриевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «ОРИОН»

*Адрес редакции:*

111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9,  
АО «НПО «Орион».  
Телефон: 8(499) 374-82-40  
E-mail: [advance@orion-ir.ru](mailto:advance@orion-ir.ru)  
Internet: [theappliedphysics.ru](http://theappliedphysics.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
ПИ № ФС 77-73641 от 21.09.2018

**Applied Physics**  
**2026, No. 3**

The journal was founded in 1994

**The scientific and technical peer-reviewed journal is intended for the publication of articles on the latest achievements in the field of physics with prospects for advancements (technical and scientific) applications.**

The periodicity is 6 issues per year.

**Founder and publisher:**

Research, Development and Production Center  
ORION, Joint-Stock Company – Russian Federation  
State Science Center  
(RD&P Center ORION, JSC)  
9, Kosinskaya st., Moscow, 111538 Russia

**The journal is included in the Unified State List of Scientific Publications. The Journal is included in Scientific Electronic Library eLIBRARY.RU, SCOPUS, Chemical Abstracts (CA), Russian Science Citation Index (RSCI), Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar.**

*Editor-in-Chief:*

**Igor Burlakov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Research, Development and Production Center  
ORION, Joint-Stock Company – Russian Federation  
State Science Center

*Editorial office address:*

9, Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia,  
RD&P Center ORION, JSC.  
Phone: 8(499) 374-82-40  
E-mail: [advance@orion-ir.ru](mailto:advance@orion-ir.ru)  
Internet: [theappliedphysics.ru](http://theappliedphysics.ru)

The registration PI No. FS 77-73641  
was issued in September 21, 2018  
by the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media of Russia

## Редакционная коллегия

<b>Андреев Степан Николаевич</b>	д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия
<b>Болтарь Константин Олегович</b>	д.ф.-м.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
<b>Василяк Леонид Михайлович</b>	д.ф.-м.н., профессор ( <i>зам. гл. ред.</i> ), Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Гусейн-заде Намик Гусейнович</b>	д.ф.-м.н., профессор, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Иванов Вячеслав Алексеевич</b>	к.ф.-м.н., доцент, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Иванов Виктор Владимирович</b>	д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия
<b>Конов Виталий Иванович</b>	д.ф.-м.н., академик РАН, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Климанов Евгений Алексеевич</b>	д.т.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
<b>Лебедев Юрий Анатольевич</b>	д.ф.-м.н., Институт нефтехимического синтеза Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Лямшев Михаил Леонидович</b>	к.ф.-м.н., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Майоров Сергей Алексеевич</b>	д.ф.-м.н., Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Никитов Сергей Аполлонович</b>	д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Пономаренко Владимир Павлович</b>	д.ф.-м.н., профессор, ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
<b>Попов Сергей Викторович</b>	д.т.н., Холдинг «Швабе», Москва, Россия
<b>Старцев Вадим Валерьевич</b>	к.т.н., АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия
<b>Холоднов Вячеслав Александрович</b>	д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Хомич Владислав Юрьевич</b>	д.ф.-м.н., академик РАН, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Москва, Россия
<b>Яковлева Наталья Ивановна</b>	д.т.н., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия
<b>Ямщиков Владимир Александрович</b>	д.т.н., член-корреспондент РАН, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Москва, Россия

## Editorial Board

<b>Andreev Stepan</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia
<b>Boltar Konstantin</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
<b>Gusein-zade Namik</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Ivanov Victor</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia
<b>Ivanov Vyacheslav</b>	PhD (Phys.-Math.), Associate Professor, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Kholodnov Vyacheslav</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Kotelnikov Institute of RadioEngineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Khomich Vladislav</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Klimanov Evgeniy</b>	Dr. Sci. (Eng.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
<b>Konov Vitaly</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Lebedev Yuri</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Lyamshev Michael</b>	PhD (Phys.-Math.), Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Mayorov Sergei</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Nikitov Sergei</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Kotelnikov Institute of RadioEngineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Ponomarenko Vladimir</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
<b>Popov Sergey</b>	Dr. Sci. (Eng.), Shvabe Holding, Moscow, Russia
<b>Startsev Vadim</b>	PhD (Eng.), POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, Russia
<b>Vasilyak Leonid</b>	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor ( <i>Deputy Editor-in-Chief</i> ), Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
<b>Yakovleva Natalia</b>	Dr. Sci. (Eng.), RD&P Center ORION, JSC, Moscow, Russia
<b>Yamshchikov Vladimir</b>	Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

# ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА®

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2026, № 3

Основан в 1994 г.

Москва

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩАЯ ФИЗИКА

- Влияние взаимодействия наночастиц на их пространственное распределение в жидкости в однородном световом поле**  
*Крылов В. И., Вихтенко Э. М.* 7
- Черенковское рентгеновское излучение в спектральном диапазоне окна прозрачности воды**  
*Куделя С. А., Малышевский В. С., Фомин Г. В.* 14

### ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

- Бортовая оптико-телевизионная система подводного видения через границу раздела «воздух–морская вода»**  
*Грузевич Ю. К., Альков П. С., Балясный Л. М., Волков Д. В., Чистов О. В., Хуснетдинов Т. Р.* 21
- Определение параметров легких и тяжелых дырок в монокристаллах  $p$ -GaSb на основе комплексного анализа эффекта Холла**  
*Овешников Л. Н., Давыдов А. Б., Чернощцкий М. А., Фельде А. А., Минаев И. И., Клековкин А. В., Кривобок В. С.* 31

### ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ

- Удержание микрочастиц в квадрупольной ловушке с прямоугольной формой напряжения в условиях атмосферного давления**  
*Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я.* 41
- Пароводяная конверсия метана с использованием плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности**  
*Ребров С. Г., Кошлаков В. В., Голиков А. Н., Федоров И. А., Голубев В. А., Гоза Д. А.* 47
- Влияние диаметра кристалла на направленный электрический разряд в воде по тонкому следу с ионами соли NaCl**  
*Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М.* 54

## ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Нейросетевая оптимизация параметров ионно-плазменного осаждения термоэмиссионных покрытий</b> <i>Жабин Г. А.</i>	61
<b>Оптическая когерентная томография в качестве метода обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах</b> <i>Злобина И. В., Алонова М. В., Бекренев Н. В., Зимняков Д. А., Пасечная А. В., Нефедов В. О.</i>	68
<b>Увеличение проводимости пленки на основе металлоорганических соединений при воздействии УФ-излучением</b> <i>Тютюник А. С., Орленсон В. Б., Мазинов А. С., Гусев А. Н.</i>	75

---

## ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

<b>Применение нейросетевых методов в программно-аппаратные комплексы контроля оптических систем</b> <i>Зарипов Ш. И., Полесский А. В., Семенченко Н. А., Медведев О. А.</i>	82
<b>Биоцидные свойства двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода</b> <i>Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Дешева Е. А., Новиков Н. Д.</i>	91
<b>Исследование устойчивости периметра кольцевого лазера к вибрационным перегрузкам</b> <i>Синельников А. О., Романов П. С., Тихменев Н. В., Ушанов А. А.</i>	98
<b>Исследование изменений адсорбционных свойств L-аспарагиназы на слюде при тепловом воздействии для разработки нанопорового детектора</b> <i>Важенкова Е. Е., Шумов И. Д., Жданов Д. Д., Шумянцева В. В., Зиборов В. С., Аблеев А. Н., Ваулин Н. В., Лебедев Д. В., Букатин А. С., Мухин И. С., Афонин О. Н., Татур В. Ю., Лукьяница А. А., Пономаренко Е. А., Арчаков А. И., Иванов Ю. Д.</i>	105

---

## ИНФОРМАЦИЯ

Правила для авторов	112
---------------------	-----

# APPLIED PHYSICS [in Russian]

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

---

2026, No. 3

Founded in 1994

Moscow

---

## CONTENTS

### GENERAL PHYSICS

**Influence of Nanoparticle Interactions on Their Spatial Distribution in Liquid under a Uniform Light Field**

*Krylov V. I. and Vikhtenko E. M.*

7

**Cherenkov X-ray radiation in the area of the water transparency window with broken azimuthal symmetry**

*Kudelya S. A., Malyshevsky V. S., and Fomin G. V.*

14

---

### PHOTOELECTRONICS

**On-board optical television system for underwater vision across the air-sea interface**

*Gruzevich Yu. K., Alkov P. S., Balyasny L. M., Volkov D. V., Chistov O. V., and Khusnetdinov T. R.*

21

**Determination of light and heavy hole parameters in *p*-GaSb single crystals on the basis of complex analysis of the Hall effect**

*Oveshnikov L. N., Davydov A. B., Chernopicskiy M. A., Fel'de A. A., Minaev I. I., Klekovkin A. V., and Krivobok V. S.*

31

---

### PLASMA PHYSICS AND PLASMA METHODS

**Confinement of microparticles in a quadrupole trap with rectangular voltage at atmospheric pressure**

*Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., and Pecherkin V. Ya.*

41

**Steam-water reforming of methane using a AC plasmatron of megawatt power**

*Rebrov S. G., Koshlakov V. V., Golikov A. N., Fedorov I. A., Golubev V. A., and Goza D. A.*

47

**The influence of crystal diameter on the directed electric discharge in water along a thin trace with NaCl salt ions**

*Panov V. A., Saveliev A. S., and Kulikov Yu. M.*

54

---

## PHYSICAL SCIENCE OF MATERIALS

- Application of artificial neural networks to optimization the parameters of ion-plasma deposition of thermionic coatings**  
*Zhabin G. A.* 61
- The possibilities of using optical coherence tomography as a method for detecting defects in polymer composites**  
*Zlobina I. V., Alonova M. V., Bekrenev N. V., Zimnyakov D. A., Pasechnaya A. V., and Nefedov V. O.* 68
- Increase in conductivity in 2-(4-peridil)-5-phenyl-1,3,4-oxadiazolium (triphenylphosfine) copper iodide films when exposed to UV radiation**  
*Tyutyunik A. S., Orlenson V. B., Mazinov A. S., and Gusev A. N.* 75
- 

## PHYSICAL EQUIPMENT AND ITS ELEMENTS

- Neural network-based methods for optical system measurement**  
*Zaripov Sh. I., Polesskiy A. V., Semenchenko N. A., and Medvedev O. A.* 82
- Bactericidal properties of two-dimensional ordered linear-chain carbon**  
*Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Deshevaya E. A., and Novikov N. D.* 91
- Investigation of the perimeter stability of a ring laser to vibration overloads**  
*Sinelnikov A. O., Romanov P. S., Tikhmenev N. V., and Ushanov A. A.* 98
- Study of changes in the adsorption properties of L-asparaginase on mica under thermal action for the development of a nanopore-based detector**  
*Vazhenkova E. E., Shumov I. D., Zhdanov D. D., Shumyantseva V. V., Ziborov V. S., Ableev A. N., Afonin O. N., Vaulin N. V., Lebedev D. V., Bukatin A. S., Mukhin I. S., Tatur V. Y., Lukyanitsa A. A., Ponomarenko E. A., Archakov A. I., and Ivanov Yu. D.* 105
- 

## INFORMATION

- Rules for authors 112

УДК 517.956.4  
EDN: KAARML

PACS: 47.57.ef+02.60.Lj

**Влияние взаимодействия наночастиц на их пространственное распределение в жидкости в однородном световом поле**© В. И. Крылов<sup>1\*</sup>, Э. М. Вихтенко<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»,  
Хабаровск, 680021 Россия

\* E-mail: krylov\_vladimir@mail.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, 680035 Россия

Статья поступила в редакцию 26.02.2026; после доработки 11.03.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 1.3.19

*Статья посвящена исследованию процесса осаждения взаимодействующих наночастиц в жидкости под действием сил светового давления. Предложена модель, описывающая изменение концентрации наночастиц вдоль направления действия постоянного внешнего поля с учётом сил их взаимного притяжения и отталкивания. Согласно результатам проведённых исследований, в неоднородной суспензии взаимодействующих наночастиц под действием интенсивного лазерного излучения возможно существование пространственных областей с разными фазами — по аналогии с различными фазами газа Ван-дер-Ваальса. Полученные результаты свидетельствуют о возможности управления наночастицами в жидкой среде для формирования тонкоплёночных структур.*

*Ключевые слова:* наносуспензия, световое давление, осаждение наночастиц, неоднородная концентрация, взаимодействие частиц.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-7-13

**Введение**

Проблема формирования неоднородных распределений наночастиц в жидких суспензиях под действием внешних полей, включая давление света, является ключевой для приложений в биофотонике, экологическом мониторинге и нанотехнологиях осаждения. Спектр практических задач чрезвычайно широк: от направленной доставки лекарств с использованием магнитных наночастиц [1] и образования биопленок [2] до очистки водных растворов от микрочастиц полиэтилена [3]. В работе [4] проведен обзор методов управления разделением частиц, в том числе с использованием оптического лазера. В настоящее время активно проводятся экспериментальные и теоретические исследования по изучению влияния лазера на наносуспензии [5–7]. В большинстве работ авторы фокусиро-

вались на горизонтальной динамике частиц в лазерных лучах или термодиффузии [8, 9], а вертикальная геометрия с учетом гравитации недостаточно изучена. В то же время задача исследования поведения наносуспензии под внешним воздействием в вертикально расположенной кювете достаточно актуальна. В частности, в работе [10] рассматриваются возможности образования различных структур на подложке, которая представляет собой дно кюветы, содержащей наносуспензию.

В работах [11, 12] оптическое осаждение наночастиц анализировалось в модели идеального газа, т. е. в этих работах пренебрегалось размерами наночастиц и их взаимодействием друг с другом. Однако очевидно, что при достаточно большой концентрации наночастиц пренебрегать их взаимодействием нельзя. В работе [14] рассматривалось стационарное распределение частиц наносуспензии,

имеющих конечный объем, в однородном силовом поле, что соответствует силам отталкивания между наночастицами.

В данной работе учтено не только отталкивание между наночастицами суспензии, на которые действует внешняя сила (сила светового давления), но и их притяжение друг к другу.

Как известно (см., например, [15]), в уравнении состояния реального разреженного газа взаимодействие его молекул во втором вириальном коэффициенте описывается двумя параметрами  $a$  и  $b$ , где  $b$  «отвечает» за отталкивание молекул, а  $a$  – за притяжение. Параметр  $b$  является величиной порядка объема молекулы, параметр  $a$  выражается через интеграл от потенциальной энергии парного взаимодействия молекул, взятый по расстоянию между молекулами с весом, равным квадрату этого расстояния. При рассмотрении реального газа с произвольной плотностью эти величины становятся подгоночными параметрами в каком-либо интерполяционном уравнении (см., например, [15, 16]).

Подобный подход применен и в настоящей работе, так же, как и в [14], к взаимодействующим наночастицам, которые находятся в жидкости в равновесном состоянии.

Действительно, наночастицы, находящиеся в макроскопическом, но малом по сравнению с объемом кюветы объеме  $V$ , можно рассматривать как квазизамкнутую и статистически независимую подсистему с переменным числом частиц. Вероятность найти подсистему в некотором состоянии с точным числом частиц  $N$  определяется большим каноническим распределением [15], содержащим потенциальную энергию взаимодействующих наночастиц. Если ее можно представить в виде парных, тройных и т. д. взаимодействий между частицами, то термическое уравнение состояния  $P = P(V, T, \bar{N})$  для достаточно разреженного «газа» наночастиц можно записать в вириальной форме также, как и для обычного реального газа. Здесь  $T$  – температура (в дальнейшем используем энергетические единицы),  $\bar{N}$  – среднее число частиц. При переходе к произвольной плотности наночастиц уравнение состояния, содержащее вириальные коэффициенты, по аналогии с реальным газом можно заменить одним из ин-

терполяционных уравнений [15, 16]. Наиболее известные из таких уравнений – это уравнение Ван-дер-Ваальса, первое и второе уравнения Дитеричи и уравнение Бергло [16].

В настоящей работе воспользуемся уравнением Ван-дер-Ваальса:

$$\left( P + a \left( \frac{\bar{N}}{V} \right)^2 \right) (V - b\bar{N}) = \bar{N}T, \quad (1)$$

которое позволяет определить связь между концентрацией наночастиц  $n$  и координатой  $z$ , вдоль которой на наночастицы действует постоянная и однородная сила  $F$ .

### Постановка задачи и основные результаты

Пусть  $N$  наночастиц находятся в кювете с жидкостью. Ее объем равен  $Sh$  ( $S$  – площадь основания,  $h$  – высота). Сначала наножидкость однородна с концентрацией наночастиц  $\tilde{n} = N / Sh$ . В некоторый момент времени на каждую наночастицу начинает действовать внешняя постоянная сила  $\mathbf{F} = (0, 0, -F)$ , направленная антипараллельно оси  $\bar{z}$  декартовой системы координат, причем плоскость  $\bar{z} = 0$  соответствует основанию кюветы. Очевидно, что после «включения» внешней силы концентрация наночастиц начнет изменяться, и за достаточно большой интервал времени (физически бесконечно большой) установится термодинамическое равновесие. Причем для наножидкости, находящейся в тонком слое  $Sd\bar{z}$ , где ее можно считать однородной, будет выполняться уравнение состояния (1), если в нем заменить  $V$  на  $Sd\bar{z}$  и  $\bar{N}$  на  $dN$ . Тогда, обозначив  $n = dN / Sd\bar{z}$  – концентрацию наночастиц в сечении наножидкости с координатой  $\bar{z}$ , перепишем (1) в виде

$$P = \frac{nT}{(1 - bn)} - an^2.$$

Считая  $T = const$ , получим

$$dP = T \frac{dn}{(1 - bn)^2} - 2andn. \quad (2)$$

Введем обозначения  $z = \tilde{z} / h$ ,  $x(z) = bn(z)$ ,  $x_0 = x(0)$ ,  $x_1 = x(1)$ ,  $\tilde{x} = b\tilde{n}$ .

Здесь и далее  $\tilde{n}$  – средняя концентрация наночастиц в кювете.

Подставляя (2) в очевидное выражение

$$dP = -nFhdz,$$

получим

$$\frac{dx}{x(1-x)^2} - \frac{2a}{bT} dx = -\frac{Fh}{T} dz.$$

Интегрируя это выражение от произвольного значения  $x$  до  $x_1$  слева и от произвольного  $z$  до единицы справа, после несложных преобразований приходим к уравнению

$$z = 1 + \frac{1}{q} \left\{ \frac{1}{1-x_1} - \frac{1}{1-x} + \ln \left| \frac{1-x}{1-x_1} \right| + \ln \frac{x_1}{x} + \frac{2a}{Tb} (x-x_1) \right\}, \quad (3)$$

где  $q = Fh/T$  – безразмерный параметр.

Если в (3) положить  $a$  и  $b$  равными нулю, то получим формулу Больцмана (для концентрации идеального газа), которую можно записать как

$$\frac{1}{q} \ln \left( \frac{n_0}{n} \right) = z. \quad (4)$$

Подставив в (3)  $z = 0$ , получим связь между  $x_0$  и  $x_1$ :

$$1 = \frac{1}{q} \left\{ \frac{1}{1-x_0} - \frac{1}{1-x_1} + \ln \left| \frac{1-x_1}{1-x_0} \right| + \ln \frac{x_0}{x_1} - \frac{2a}{Tb} (x_0-x_1) \right\}. \quad (5)$$

Для определения через  $a$ ,  $b$  и  $q$  концентрации частиц при  $z = 0$  и  $z = 1$ , воспользуемся очевидным соотношением

$$Shd(zn(z)) = Shn(z) dz + Shzdn.$$

Интегрируя последнее выражение по  $z$  от нуля до единицы, а по  $n$  от  $n_0 = n(0)$  до  $n_1 = n(1)$ , и учитывая, что  $N = Sh \int_0^1 n(z) dz$ , получим

$$\bar{x} = x_1 - \int_{x_0}^{x_1} z dx. \quad (6)$$

Подставим в (6) выражение (3) и вычислим интегралы по  $x$ . В результате получим равенство

$$\bar{x} = x_1 - \frac{1}{q} \left[ \frac{x_1 - x_0}{1-x_0} + x_1 \ln \frac{x_0(1-x_1)}{x_1(1-x_0)} + \frac{a}{Tb} (x_0-x_1)^2 \right]$$

или (после сокращения  $b$ )

$$\bar{n} = n_1 - \frac{1}{q} \left[ \frac{n_1 - n_0}{1-bn_0} + n_1 \ln \frac{n_0(1-bn_1)}{n_1(1-bn_0)} + \frac{a}{T} (n_0 - n_1)^2 \right]. \quad (7)$$

Из (7) и (5) при  $a = 0$  нетрудно выразить  $n_0$  и  $n_1$  через  $\bar{n}$ , как это было сделано в [14]:

$$n_0 = \frac{q\bar{n}}{1 + bq\bar{n} - \exp[-q(1-b\bar{n})]} \quad (8)$$

и

$$n_1 = \frac{q\bar{n} \exp[-q(1-b\bar{n})]}{1 + (bq\bar{n} - 1) \exp[-q(1-b\bar{n})]}. \quad (9)$$

Однако, при  $a \neq 0$  получить выражения, аналогичные (8) и (9), в аналитическом виде, по-видимому, невозможно. Поэтому в настоящей работе исследуем влияние притяжения наночастиц, т. е. параметра  $a$ , на их равновесное распределение графически, используя выражение (3). Считаем, что при  $z = 1$  притяжением между наночастицами можно пренебречь и, следовательно, величину  $n_1$  определять формулой (9).

### Анализ полученных результатов

Для графического исследования выражения (3) при конечном значении параметра  $a$  введем безразмерные величины:  $y = n/\bar{n}$ ,  $y_1 = n_1/\bar{n}$ ,  $y_0 = n_0/\bar{n}$ ,  $g = \bar{n}b$ ,  $k = 2a\bar{n}/T$ .

Тогда (3) запишется в следующем виде:

$$z = 1 + \frac{1}{q} \left\{ \frac{1}{1-gy_1} - \frac{1}{1-gy} + \ln \left| \frac{1-gy}{1-gy_1} \right| + \ln \frac{y_1}{y} + k(y-y_1) \right\}, \quad (10)$$

т. е. зависимость концентрации от глубины будет определяться тремя параметрами:  $q$ ,  $g$ ,  $k$ .

Соотношение (9) в новых обозначениях имеет вид

$$y_1 = \frac{q \exp[-q(1-g)]}{1+(gq-1)\exp[-q(1-g)]}. \quad (11)$$

В работе [14] показано, что зависимость  $z = z(y)$  (или  $y = y(z)$ ) заметно отличается от случая, когда  $b = 0$  при  $q = 10^7$ , а  $g = 10^{-5}$ , поэтому целесообразно рассмотреть влияние притяжения между наночастицами для этих же значений  $q$  и  $g$ .

На рисунке 1 показаны зависимости  $z = z(y)$  при  $y \in (1, y_0)$ , когда  $q = 10^7$ ,  $g = 10^{-5}$ , а параметр  $k$  принимает значения 0; 0,0001; 0,0002; 0,0003; 0,0004; 0,0005.

Кривая, соответствующая  $k = 0$ , совпадает с графиком, полученным в работе [14].

Из полученных графиков видно, что у дна кюветы создается относительная концентрация частиц с чрезвычайно большим градиентом в очень тонком слое. При этом с ростом  $a$  миграция частиц вниз усиливается, кривые достигают большего максимума при большем расстоянии от дна кюветы.

На рисунке 2 изображены те же зависимости  $z = z(y)$ , что и на рисунке 1, но при  $y \in [y_0, 99334,51654]$ . Анализ полученных результатов показывает, что с ростом  $a$  концентрация наночастиц на дне кюветы растет (авторы не показывают функции  $z = z(y)$  при отрицательных  $z$ , не имеющих физического смысла в выбранной постановке задачи).

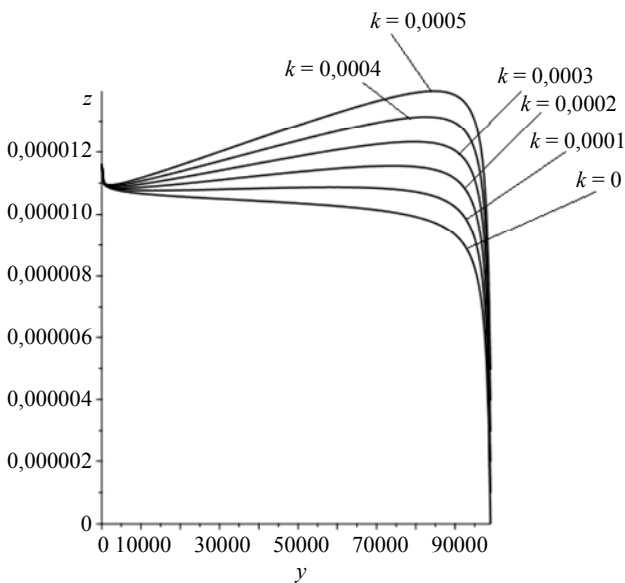


Рис. 1. Функции  $z = z(y)$  при  $g = 10^{-5}$  и  $q = 10^7$ ,  $y \in (1, y_0)$

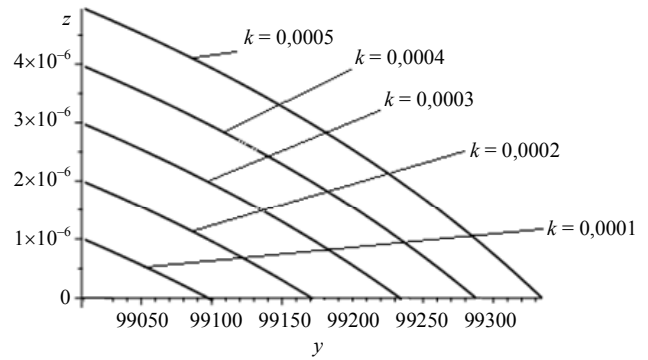


Рис. 2. Функции  $z = z(y)$  при  $g = 10^{-5}$  и  $q = 10^7$ ,  $y \in (y_0, 99334,51654)$

На рисунке 3 представлена производная  $dz/dy = u(y)$  (умноженная на  $10^9$ ) при  $k = 0,0000675$ . Уравнение  $u(y) = 0$  имеет два кратных действительных корня (в области неотрицательных  $z$ ), равных 33333,3333. Следовательно, при таком  $k$  у функции  $z = z(y)$  есть точка перегиба (рис. 4).

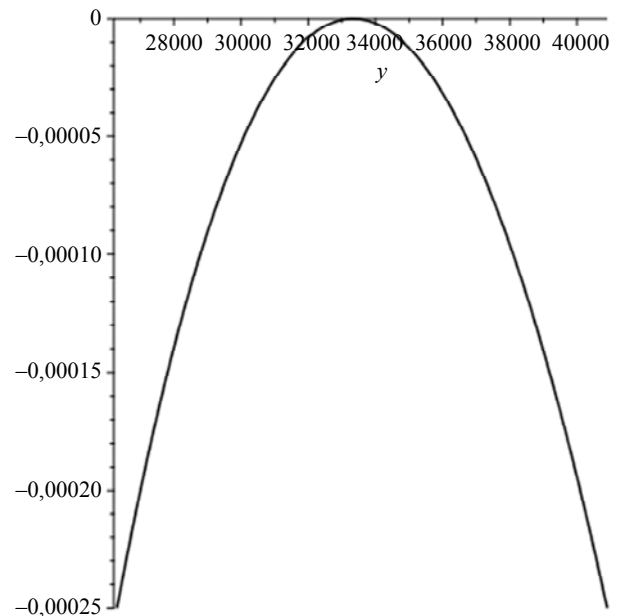


Рис. 3. Функция  $u = u(y)$  при  $k = 0,0000675$ ,  $g = 10^{-5}$  и  $q = 10^7$

Если при выбранных здесь  $q$  и  $g$  параметр  $k$  больше 0,0000675, то у уравнения  $u = 0$  будет уже два разных корня, причем меньший корень соответствует минимуму функции  $z(y)$ , а больший – ее максимуму. На рисунке 5 показаны функции  $z$  и  $u$  (для большей наглядности последняя умножена на  $10^9$ ) при  $k = 0,0000676$ . На этом рисунке функция  $z = z(y)$  изображена горизонтальным отрезком, на самом деле это – иллюзия. Просто  $z(y_{\max}) - z(y_{\min}) \ll 0,00001$ .

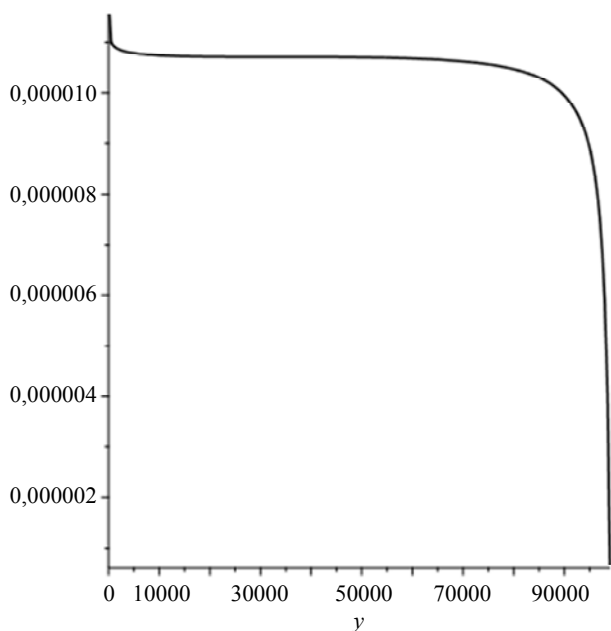


Рис. 4. Функция  $z = z(y)$  при  $g = 10^{-5}$  и  $q = 10^7$ ,  $k = 0,0000675$ ,  $y \in (1, y_0)$

Таким образом, получаем, что при достаточно больших  $q$  и, начиная с некоторых  $a$ , функция  $y = y(z)$  (обратная к функции  $z = z(y)$ ) будет многозначна на некоторых интервалах координаты  $z$ . Физически это может соответствовать различным «фазам» наносуспензии по аналогии с газом Ван-дер-Ваальса.

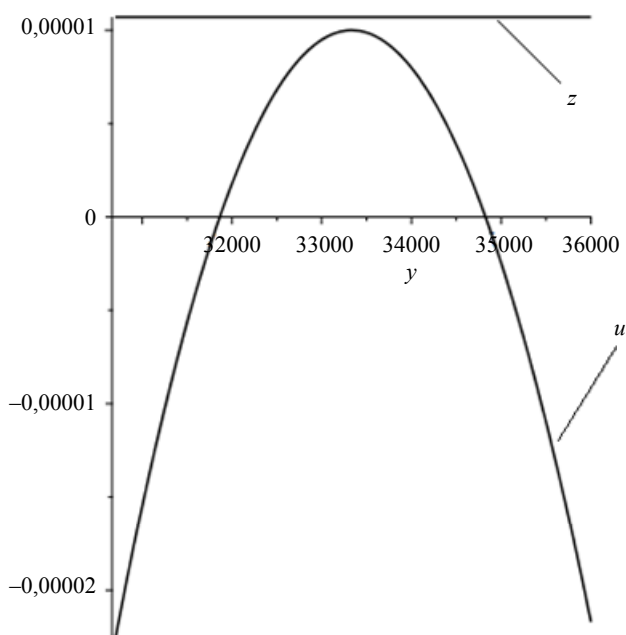


Рис. 5. Функции  $z = z(y)$  и  $u = u(y)$  при  $g = 10^{-5}$  и  $q = 10^7$ ,  $k = 0,0000675$ ,  $y \in (26302.32..40899.1)$

### Заключение

Проблема осаждения наночастиц в жидкости под действием внешнего воздействия привлекает значительный научный интерес благодаря широкому кругу практических приложений. Полученные результаты показывают, что учет взаимодействия наночастиц кардинально меняет картину их распределения в жидкости. На основании выполненных исследований можно ожидать, что в неоднородной суспензии взаимодействующих наночастиц, находящихся под действием интенсивного лазерного излучения, могут существовать пространственные области, в которых будут находиться различные фазы суспензии подобно различным фазам газа Ван-дер-Ваальса

Кроме того, появляется возможность целенаправленно формировать слои с повышенной концентрацией частиц под действием лазерного излучения. Полученные выражения (3) и (10) демонстрируют возможность управления наночастицами в жидкости для формирования тонкопленочных структур, что представляет интерес для разработки оптических методов управления частицами, а также для методов нелинейной оптики и диагностики жидкофазных сред.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Субсидии на выполнение программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Дальневосточный центр математических исследований» (дополнительное соглашение от 27 февраля 2025 г. № 075-02-2025-1538).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayorova O. A., Gusliakova O. I., Prikhozhdenko E. S., Verkhovskii R. A., Bratashov D. N. / *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15. № 1. P. 214. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010214>.
2. Camba C., Walter-Lakes B., Digal P., Taheri-Araghi S., Bezryadina A. / *Biomedical Optics Express*. 2024. Vol. 15. № 2. P. 1181–1191. <https://doi.org/10.1364/BOE.510836>.
3. Филинкова М. С., Бахтеева Ю. А., Медведева И. В., Бызов И. В., Минин А. С., Курмачев И. А. / *Коллоидный журнал*. 2024. Т. 86. № 6. С. 824–837. <https://doi.org/10.31857/S0023291224060146>.

4. Евстратов А. А. / Научное приборостроение. 2005. Т. 15. № 1. С. 3–20.
5. Afanas'ev A. A., Novitsky D. V., Rubinov A. N. / Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2017. Vol. 20. № 2. P. 194–198.
6. Huang H., Xu Y., Luo G., Xie Z., Ming W. / Nanomaterials. 2022. Vol. 12. P. 1524. <https://doi.org/10.3390/nano12091524>.
7. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., Oshurko V. B., Strel'tsov V. N. / Physics of Wave Phenomena. 2025. Vol. 33. № 6. P. 458–462. <https://doi.org/10.3103/S1541308X25700360>.
8. Ta V., Carter R., Esenturk E., Connaughton C., Wasley T., Li J., Kay R., Stringer J., Smith P., Shephard J. / Soft Matter. 2016. № 12. P. 4530–4536. <https://doi.org/10.1039/c6sm00465b>.
9. Pin C., Fujiwara H., Sasaki K. / Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2022. Vol. 52. P. 100534. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2022.100534>.
10. Егоришин И. Н., Иванов В. И. / Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2025. № 17. С. 52–58. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2025.17.052>.
11. Duhr S., Braun D. / Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86. P. 131921. <https://doi.org/10.1063/1.1888036>.
12. Иванов В. И., Пячин С. А. / Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. Вып. 13. С. 146–155. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2025.17.052>.
13. Иванов В. И., Иванова Г. Д., Крылов В. И., Хе В. К. / Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 286–290. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2018.10.286>.
14. Крылов В. И., Иванова Г. Д., Егоришин И. Н. / Прикладная физика. 2020. № 3. С. 11–16.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964.
16. Базаров И. П. Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1991.

PACS: 47.57.ef+02.60.Lj

## Influence of Nanoparticle Interactions on Their Spatial Distribution in Liquid under a Uniform Light Field

V. I. Krylov<sup>1\*</sup> and E. M. Vikhtenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, 680021 Russia

\*E-mail: krylov\_vladimir@mail.ru

<sup>2</sup> Pacific National University, Khabarovsk, 680035 Russia

\*krylov\_vladimir@mail.ru

Received 26.02.2026; revised 11.03.2026; accepted 5.06.2026

*The article investigates the sedimentation process of interacting nanoparticles in a liquid under the action of light pressure forces. A model is proposed that allows determining the dependence of nanoparticle concentration on the coordinate along which a constant external influence acts, taking into account the interaction forces (attraction and repulsion) between nanoparticles. The study showed that this dependence can significantly differ from the result predicted by the classical model of an ideal gas of nanoparticles. The obtained conclusion is important for developing methods to control the arrangement of nanoparticles in liquids, which is relevant for creating optical techniques for forming thin films and structures.*

**Keywords:** nanosuspension, light pressure, nanoparticle deposition, inhomogeneous concentration, particle interactions.

### REFERENCES

1. Mayorova O. A., Gusliakova O. I., Prikhozhenko E. S., Verkhovskii R. A., and Bratashov D. N., Pharmaceutics **15** (1), 214 (2023). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010214>.
2. Camba C., Walter-Lakes B., Digal P., Taheri-Araghi S., and Bezryadina A., Biomedical Optics Express **15** (2), 1181–1191 (2024). <https://doi.org/10.1364/BOE.510836>.
3. Filinkova M. S., Bakhteeva Yu. A., Medvedeva I. V., et al., Kolloidnyy zhurnal **86** (6), 824–837 (2024). <https://doi.org/10.31857/S0023291224060146> [in Russian].

4. Evstrapov A. A., *Nauchnoe priborostroenie* **15** (1), 3–20 (2005) [in Russian].
5. Afanas'ev A. A., Novitsky D. V., and Rubinov A. N., *Nonlinear Phenomena in Complex Systems* **20** (2), 194–198 (2017).
6. Huang H., Xu Y., Luo G., Xie Z., and Ming W., *Nanomaterials* **12**, 1524 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12091524>.
7. Bunkin A. F., Mikhalevich V. G., Oshurko V. B., and Strel'tsov V. N., *Physics of Wave Phenomena* **33** (6), 458–462 (2025). <https://doi.org/10.3103/S1541308X25700360>.
8. Ta V., Carter R., Esenturk E., Connaughton C., Wasley T., Li J., Kay R., Stringer J., Smith P., and Shephard J., *Soft Matter*, № 12, 4530–4536 (2016). <https://doi.org/10.1039/c6sm00465b>.
9. Pin C., Fujiwara H., and Sasaki K., *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* **52**, 100534 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2022.100534>.
10. Egoershin I. N. and Ivanov V. I., *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*, № 17, 52–58 (2025). <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2025.17.052> [in Russian].
11. Duhr S. and Braun D., *Applied Physics Letters* **86**, 131921 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.1888036>.
12. Ivanov V. I. and Pyachin S. A., *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*, № 13, 146–155 (2021). <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2025.17.052> [in Russian].
13. Ivanov V. I., Ivanova G. D., Krylov V. I., and Khe V. K., *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*, № 10, 286–290 (2018). <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2018.10.286> [in Russian].
14. Krylov V. I., Ivanova G. D., and Egorshin I. N., *Applied Physics*, № 3, 11–16 (2020) [in Russian].
15. Landau L. D. and Lifshic E. M. *Statistical physics*. Moscow: Mir, 1964 [in Russian].
16. Basarov V. P. *Thermodynamics*. Moscow: Vysshaya shkola, 1991 [in Russian].

#### Об авторах

**Крылов Владимир Иванович**, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, химии и нефтехимических технологий, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (680021, Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47). E-mail: [krylov\\_vladimir@mail.ru](mailto:krylov_vladimir@mail.ru) SPIN-код: 4515-1800, AuthorID: 21845, Scopus ID: 57197334724

**Вихтенко Эллина Михайловна**, к.ф.-м.н., доцент высшей школы кибернетики и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» (680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136). E-mail: [004184@togudv.ru](mailto:004184@togudv.ru) SPIN-код: 1158-0335, AuthorID: 147821, Orcid ID: 0000-0002-7152-2311, Scopus ID: 23104578400

УДК 539.1.03  
EDN: MVUFLO

PACS: 41.60.Bq

## Черенковское рентгеновское излучение в спектральном диапазоне окна прозрачности воды

© С. А. Куделя, В. С. Малышевский\*, Г. В. Фомин

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия**\* E-mail: vsmalyshevsky@sfedu.ru**Статья поступила в редакцию 16.02.2026; после доработки 27.02.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.8*

**Выявлены особенности черенковского и параметрического излучения в рентгеновской области, в спектральном диапазоне окна прозрачности воды, при пролете релятивистских частиц через изолированную мишень и регулярную стопку пластин. Численные расчеты выхода поляризованного излучения выполнены для электронов с энергией 10 МэВ и титановой мишени. Показана принципиальная возможность создания на основе этого эффекта квазимонохроматических направленных источников поляризованного рентгеновского излучения с высокой угловой плотностью.**

*Ключевые слова:* черенковское излучение, переходное излучение, параметрическое излучение, рентгеновское излучение, титан, окно прозрачности воды.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-14-20

### Введение

Исследование явлений, связанных с излучением Вавилова-Черенкова и переходным излучением, возникающим при движении ускоренных релятивистских частиц сквозь различные материалы, традиционно представляет собой перспективное направление для создания инновационных детекторов и источников излучения в различных областях электромагнитного спектра. Последние достижения и перспективы в этой области изложены, в частности, в недавней обзорной статье [1].

Как было показано в [2], диэлектрическая проницаемость некоторых веществ вблизи краев К- и L-линий поглощения может превышать единицу. Это создает условия для возникновения черенковского излучения в рентгеновском диапазоне частот. Теоретический анализ возможности черенковского рентгеновского излучения в различных материалах проведен в [3]. Обсуждение возможной генерации рентгеновского черенковского излуче-

ния ультрарелятивистских электронов в угле-роде впервые проведено в экспериментах [4]. В работе [5] сообщалось о наблюдении рентгеновского черенковского излучения электронов с энергией 5 МэВ в кремнии вблизи края L-линии поглощения 99,7 эВ. В экспериментах [6] было обнаружено черенковское излучение релятивистских электронов  $E = 10$  МэВ в мишени титана и ванадия толщиной 10 мкм при энергиях фотонов 453 эВ и 512 эВ, соответственно, при нормальном падении частиц на поверхность мишени. Зафиксированный выход фотонов в расчете на один электрон составил  $3,5 \times 10^{-4}$  для титановой мишени и  $4,3 \times 10^{-4}$ , соответственно, для ванадиевой. Область электромагнитного спектра в частотном диапазоне от 300 до 500 эВ представляет особый интерес. Вода прозрачна в этом спектральном диапазоне (так называемое окно прозрачности воды), но углерод и его органические соединения нет. Квазимонохроматическое черенковское излучение в этой области спектра может быть использовано для созда-

ния рентгеновских микроскопов, визуализирующих структуры биологических тканей [7]. В этой связи результаты измерений [6] представляют особый интерес.

В соответствии с данными [8], максимальные значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в титане достигается при энергии квантов, равной 454 эВ, а ширина области, где  $\epsilon' > 1$ , составляет приблизительно 5 эВ. При значении энергии квантов 454 эВ равны, соответственно,  $\epsilon' = 1,007$  и  $\epsilon'' = 0,006$ . Нетрудно оценить, что порог для возникновения рентгеновского черенковского излучения с энергией квантов вблизи L-края поглощения, например, в титане, достигается при значении Лоренц-фактора  $\gamma > 12$ , что соответствует энергии электронов  $E > 6$  МэВ. Величина угла черенковского излучения относительно вектора скорости электронов с энергией 10 МэВ и энергии фотонов 454 эВ составляет  $\theta_c \approx 3,78^\circ$ . При перпендикулярном относительно поверхности влете релятивистских электронов в мишень излучение поляризовано в плоскости волнового вектора и нормали к поверхности (продольная поляризация). При наклонном падении частиц на мишень вследствие нарушения азимутальной симметрии появляется компонента излучения, поляризованная в плоскости ортогональной к плоскости излучения (поперечная поляризация), а угловое распределение излучения становится асимметричным. Особенности переходного и черенковского излучения при наклонном падении частиц на мишень исследовались в ряде монографий [9, 10], а также в работах [11–17]. Как показано в [11, 12] при наклонном падении интенсивность продольно поляризованной волны возрастает, а ширина углового распределения уменьшается. Кроме того, возникают осцилляции по азимутальному углу, вызванные интерференцией отраженных от входной и выходной поверхностей мишени [13]. Метод поляризационных токов использовался в [14] для изучения спектрально-углового распределения и поляризационных свойств так называемого рентгеновского «гибридного» излучения, то есть при условии, когда существенна интерференция между черенковским и переходным излучениями.

Ниже приведен анализ черенковского излучения в спектральной области окна проз-

рачности воды при влете релятивистских электронов в титановую мишень, а также в регулярную стопку титановых пластин в условиях цитированных выше экспериментов [6].

### Спектрально-угловое распределение

Одним из методов решения поставленной задачи в такой постановке является метод сшивок нормальной и тангенциальной компонент полей на границах раздела. Решение такой задачи в общем виде приведено в [10, 16]. Вместе с тем имеется возможность решать подобные задачи, не прибегая к непосредственному сшиванию полей. Для этого можно использовать хорошо известный результат, что компонента Фурье поля движущейся частицы эквивалентна полю совокупности неподвижных диполей, расположенных вдоль траектории частицы. Такой способ эффективно использовался в [17] (так называемый «метод изображений») для решения целого ряда задач об излучении заряженных частиц в среде. Следуя этой работе, угловое распределение излучения будем представлять в терминах направляющих косинусов  $\cos\theta_x$  и  $\cos\theta_y$  (ортогональные оси  $x$  и  $y$  лежат в плоскости поверхности мишени, ось  $z$  направлена вдоль нормали к поверхности). В отличие от переменных  $\theta$  и  $\varphi$  (где  $\theta$  и  $\varphi$  – полярный и азимутальный углы, соответственно) это обеспечит большую наглядность. Предположим, что входная и выходная поверхности мишени параллельны и не имеют шероховатостей, а скорость частицы постоянна.

Аналитические формулы для спектрально-угловой плотности излучения с продольной  $dI^{\parallel}(\mathbf{k}, \omega) = I^{\parallel}(\mathbf{k}, \omega) d\omega d\Omega$  и поперечной поляризацией  $dI^{\perp}(\mathbf{k}, \omega) = I^{\perp}(\mathbf{k}, \omega) d\omega d\Omega$  в диапазоне частот  $\omega$ ,  $\omega + d\omega$  и телесном угле  $d\Omega$ , ориентированном в направлении движения частицы в мишени толщиной  $L$  с комплексной диэлектрической проницаемостью, приведены в [17] (формулы 18,25 и 18,26) и имеют достаточно громоздкий вид. Однако для анализа выхода излучения в условиях цитированных выше экспериментов [6] можно использовать более компактные асимптотические формулы.

Действительно, такие факторы как конечная толщина мишени, достаточно большое

значение мнимой части диэлектрической проницаемости и сравнительно небольшое отличие действительной части от единицы приведут к некоторым особенностям в угловом распределении возникающего излучения при нарушенной азимутальной симметрии. Прежде всего отметим, что в прозрачной среде черенковское излучение когерентно суммируется по всей траектории. При равенстве нулю мнимой части диэлектрической проницаемости и выполнении порогового условия это приводит к очевидной расходимости соответствующих формул. С другой стороны, наличие поглощения приводит к тому что длина траектории, на которой происходит суммирование излучения оказывается конечной. Эту длину легко оце-

нить из соотношения  $L_c \approx c / \omega \epsilon''$  (см., например, [10]), откуда получим оценку  $L_c / \lambda \approx 1 / \epsilon'' \approx 166$  ( $\lambda$  – длина волны излучения). В условиях цитированных выше экспериментов толщина используемой титановой мишени 10 мкм  $L / \lambda \approx 3500$ , что намного больше длины  $L_c$  (если длина волны 0,28 нм, то  $L_c \approx 0,5$  мкм). Следовательно, волна, отраженная от входной поверхности, в направлении выходной поверхности будет сильно подавлена. Поэтому для расчетов интенсивности излучения можно использовать асимптотику формул (18,25) и (18,26) из [17] при  $L / \lambda \rightarrow \infty$ . Для спектрально-угловой плотности излучения компоненты с продольной поляризацией имеем:

$$I^{\parallel}(\mathbf{n}, \omega) = \frac{\beta_z^2 \cos^2 \theta_z |1 - \epsilon|^2}{\left[ (1 - \beta_x \cos \theta_x)^2 - \beta_z^2 \cos^2 \theta_z \right]^2 \sin^2 \theta_z} \times \left| \frac{\left( (1 - \beta_z \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} - \beta_z^2 - \beta_x \cos \theta_x) \sin^2 \theta_z + \beta_x \beta_z \cos \theta_x \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} \right)}{\left( 1 - \beta_x \cos \theta_x - \beta_z \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} \right) \left( \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} + \epsilon \cos \theta_x \right)} \right|^2. \quad (1)$$

Спектрально-угловая плотность излучения компоненты с поляризацией, перпендику-

лярной плоскости излучения, определяется формулой:

$$I^{\perp}(\mathbf{n}, \omega) = \frac{\beta_x^2 \beta_z^4 \cos^2 \theta_y \cos^2 \theta_z |1 - \epsilon|^2}{\left[ (1 - \beta_x \cos \theta_x)^2 - \beta_z^2 \cos^2 \theta_z \right]^2 \sin^2 \theta_z} \times \left| \left( 1 - \beta_x \cos \theta_x - \beta_z \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} \right) \left( \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_z} + \cos \theta_x \right) \right|^{-2}. \quad (2)$$

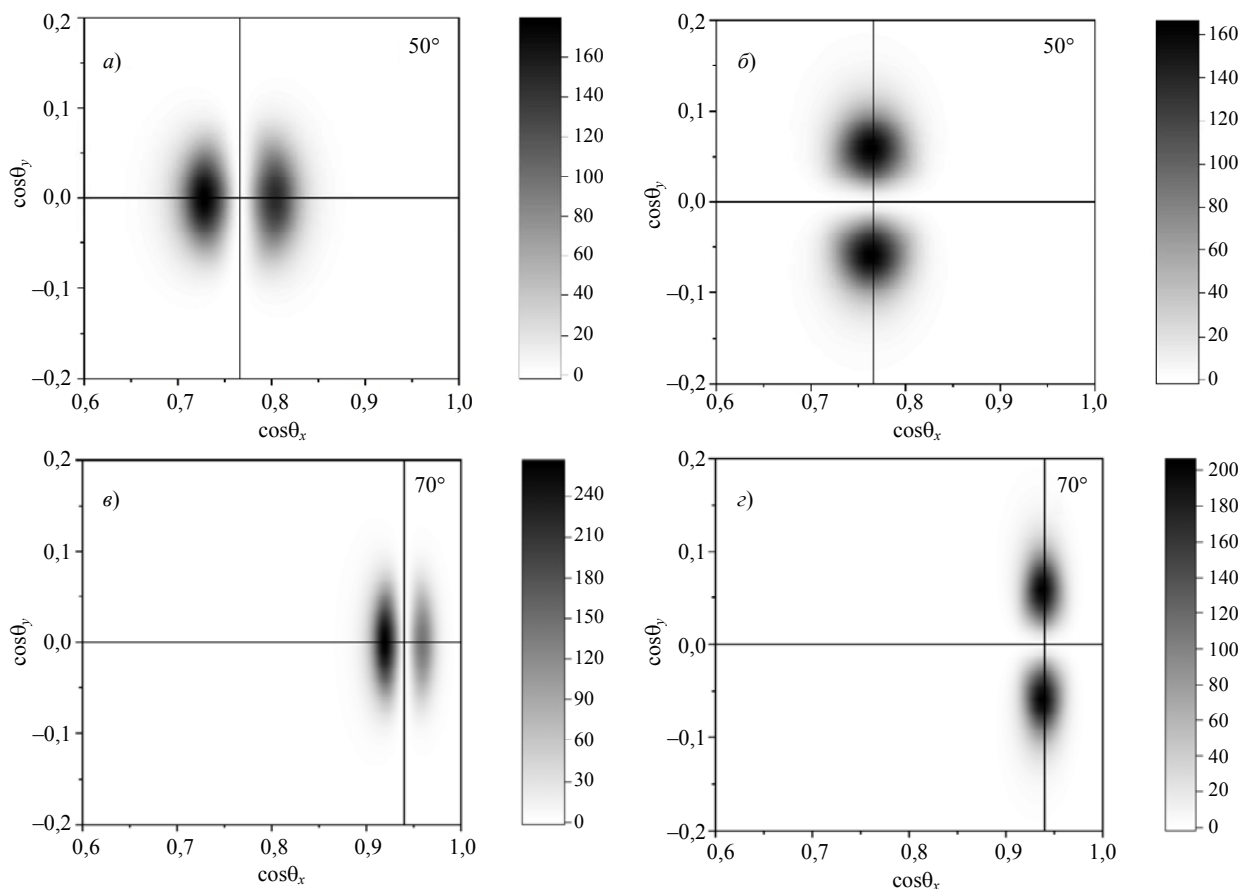
Направление скорости электрона составляет с нормалью к поверхности мишени угол  $\psi$ , так что  $\beta_x = \beta \sin \psi$ ,  $\beta_z = \beta \cos \psi$ ,  $\beta = v / c$ . Направление излучения определяется направляющими косинусами относительно координатных осей (ось  $z$  совпадает с направлением нормали к поверхности):  $\cos \theta_x = \sin \theta \cos \varphi$ ,  $\cos \theta_y = \sin \theta \sin \varphi$ ,  $\cos \theta_z = \cos \theta$ . Безразмерная спектрально-угловая плотность интенсивности излучения в формулах (1) и (2) выражена в единицах  $Z^2 e^2 / \pi^2 c$  ( $Ze$  – заряд частицы).

На рис. 1 представлены расчеты углового распределения поляризованного излучения электронов с энергией 10 МэВ в титановой

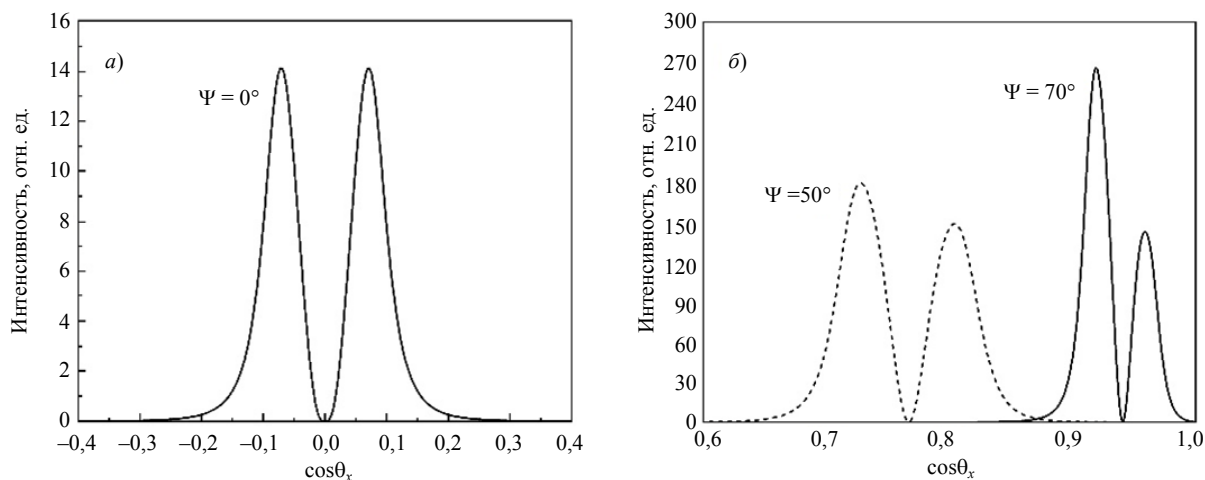
мишени толщиной 10 мкм вблизи  $L$ -края поглощения (454 эВ) при углах влета  $50^\circ$  и  $70^\circ$ , соответственно. Вертикальной линией отмечены направляющие косинусы угла влета частицы в мишень  $\psi$  относительно нормали к поверхности. На рис. 2 приведены результаты расчетов углового распределения излучения при нулевом значении азимутального угла. Отчетливо видны два максимума, соответствующие черенковскому конусу излучения. Как следует из проведенных расчетов, интенсивность продольно поляризованной волны увеличивается с увеличением угла влета частицы в кристалл, а угловая ширина максимума уменьшается. При угле влета в титановую

мишень  $70^\circ$  выход излучения может в максимуме примерно в двадцать раз превысить выход при нормальном падении частиц. Если

принять во внимание результаты измерений [6], то это составит примерно  $7 \times 10^{-3}$  фотонов на один электрон.



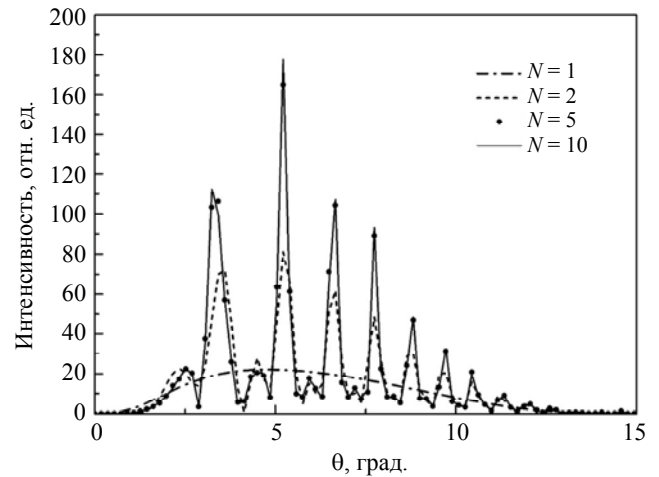
**Рис. 1.** Рассчитанное угловое распределение продольно поляризованной (а, в) и поперечно поляризованной (б, г) компонент черенковского излучения релятивистских электронов с энергией 10 МэВ в рентгеновском диапазоне частот ( $\omega = 454$  эВ) в титановой мишени при различных углах влета частиц из мишени: (а, б) –  $\psi = 50^\circ$ ; (в, г) –  $\psi = 70^\circ$



**Рис. 2.** Рассчитанное угловое распределение по полярному углу в плоскости черенковского излучения (азимутальный угол  $\psi = 0$ ) с продольной поляризацией релятивистских электронов с энергией 10 МэВ в рентгеновском диапазоне частот ( $\omega = 454$  эВ) в титановой мишени при различных углах влета частиц в мишень

## Параметрическое рентгеновское излучение

При прохождении релятивистских электронов через регулярную стопку пластин наряду с известным черенковским и переходным излучением возникает так называемое резонансное параметрическое (или структурное) черенковское излучение. Интенсивность резонансного параметрического излучения может в некоторых случаях многократно превысить интенсивность излучения в изолированной мишени. В идеальных условиях при отсутствии поглощения интенсивность в параметрических максимумах углового распределения пропорциональна квадрату числа пластин  $N$ , а их угловая ширина пропорциональна  $1/N$ . В этом случае положение максимумов в угловом распределении можно определить из кинематических соотношений [10]. В частности, если выполнены условия  $|\varepsilon - 1| \ll 1$  и  $L \ll d$ , где  $d$  – расстояние между пластинами, то угловое положение параметрических максимумов определяется известным соотношением  $\cos \theta_n \approx 1/\sqrt{\varepsilon'}\beta + 2\pi n c / \omega d$ , где  $n = \pm 1, \pm 2 \dots$ . Как отмечалось в предыдущем разделе, наличие поглощения приводит к тому, что длина траектории частицы в мишени, на которой происходит когерентное суммирование излучения, оказывается конечной, и в выбранных выше условиях, как показывают оценки, составляет величину не более 0,5 мкм. Если в изолированной мишени это приводит к тому, что излучение формируется в небольшом слое вблизи выходной поверхности, то в регулярной стопке тонких ( $L < 0,5$  мкм) пластин это может ограничить число пластин, излучение от которых будет когерентно складываться. В этом случае положение максимумов в угловом распределении, их ширина и интенсивность не будут определяться простыми кинематическими соотношениями, а могут быть найдены только путем численного расчета спектрально-угловых характеристик излучения [9]. В настоящем разделе мы рассмотрим рентгеновское параметрическое излучение в диапазоне окна прозрачности воды релятивистских электронов с энергией 10 МэВ при пролете через несколько регулярно расположенных в вакууме и параллельных друг другу одинаковых титановых пластин.



*Рис. 3. Рассчитанное угловое распределение параметрического излучения релятивистских электронов с энергией 10 МэВ в рентгеновском диапазоне частот ( $\omega = 454$  эВ) в мишени, состоящей из регулярной стопки из  $N$  пластин титана толщиной 0,1 мкм и толщиной вакуумного промежутка между пластинами 1 мкм*

Для расчетов выхода параметрического рентгеновского излучения воспользуемся известным результатом [9], в котором для расчета выхода излучения применены рекуррентные соотношения, выражающие поля в некотором вакуумном промежутке через поля в предыдущем промежутке. Получаемые точные выражения довольно громоздки (см. формулу (3.1) из работы [9]) и здесь приводиться не будут. На рис. 3 приведены результаты расчётов углового распределения параметрического излучения электронов при нормальном падении релятивистских электронов с энергией 10 МэВ на стопку тонких титановых пластин. Как и ранее интенсивность выражена в безразмерных величинах  $Z^2 e^2 / \pi^2 c$ . Из-за конструктивной интерференции излучения при прохождении частицы через разные пластины угловое распределение по сравнению с аналогичным распределением для одной пластины имеет ряд дополнительных параметрических максимумов. В отличие от случая косоугольного влета в изолированную мишень угловая ширина этих максимумов излучения значительно меньше. Анализ результатов расчетов показывает, что, как и указывалось выше, наличие поглощения приводит к тому, что излучение от регулярной стопки тонких (не более 0,5 мкм) титановых пластин формируется главным образом в последних нескольких пластинах. Поэтому достичь усиления выхода излучения

более чем в десять раз при увеличении количества пластин невозможно, что и показывают результаты расчетов на рис. 3, а именно, начиная с  $N = 5$ , выход излучения практически не изменяется.

### Заключение

Проведенный анализ и установленные особенности черенковского и параметрического излучения в рентгеновской области частот могут быть полезны при проектировании источников излучения и показывают принципиальную возможность применения эффекта для создания квазимонохроматических направленных источников поляризованного рентгеновского излучения в спектральном диапазоне окна прозрачности воды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruoxi Chen, Zheng Gong, Jialin Chen, et al. / Materials Today Electronics. 2023. Vol. 3. P. 100025. <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100025>.
2. Базылев В. А., Глебов В. И., Денисов Э. И. и др. / Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. С. 406.
3. Gary C., Kaplin V., Kubankin A., et al. / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2005. Vol. 227. P. 95. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.06.015>.
4. Базылев В. А., Глебов В. И., Денисов Э. И. и др. / Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. С. 103.
5. Knulst W., Luiten O. J., van der Wiel M. J. / Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79. № 18. P. 2999. <https://doi.org/10.1063/1.1415049>.
6. Knulst W., van der Wiel M. J., Luiten O. J., Verhoeven J. / Applied Physics Letters. 2003. Vol. 32. № 19. P. 4050200. <https://doi.org/10.1063/1.1625999>.
7. Johansson G. A., Holmberg A., Hertz H. M., Berglund M. / Review of Science Instruments. 2002. Vol. 73. № 3. P. 1193. <https://doi.org/10.1063/1.1445870>.
8. Henke B. L., Gullikson E. M., Davis J. C. / Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. Vol. 54. № 2. P. 181–342.
9. Гарибян Г. М., Ян Ши. Рентгеновское переходное излучение. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1983.
10. Тер-Микаелян М. Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1969.
11. Булгакова М. В., Малышевский В. С., Фомин Г. В. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 3. С. 89. <https://doi.org/10.1134/S1027451022020070>.
12. Kubankin A., Nasonov N., Kaplin V., Uglov S., Piestrup M., Gary C. / Radiation Physics and Chemistry. 2006. Vol. 75. P. 913. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.12.016>.
13. Bulgakova M. V., Malyshevsky V. S., Fomin G. V. / Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. Vol. 17. Suppl. 1. P. S409. <https://doi.org/10.1134/S1027451023070054>.
14. Shevelev M., Konkov A., Alekseev B. / Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. 2020. Vol. 464. P. 117. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.12.010>.
15. Потылицын А. П., Гоголев С. Ю. / Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16. № 2 (221). С. 147.
16. Егинбарян В. А., Хачатрян Б. В. / Изв. АН Арм. ССР, физика. 1966. Т. 1. С. 11.
17. Пафомов В. Е. / Труды ордена Ленина Физического института АН СССР. 1969. Т. 44. С. 28.

PACS: 41.60.Bq

## Cherenkov X-ray radiation in the area of the water transparency window with broken azimuthal symmetry

S. A. Kudelya, V. S. Malyshevsky\*, and G. V. Fomin

Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia

\* E-mail: [vsmalyshevsky@sfedu.ru](mailto:vsmalyshevsky@sfedu.ru)

Received 16.02.2026; revised 27.02.2026; accepted 5.06.2026

*The features of Cherenkov and parametric radiation in the X-ray frequency range in the spectral range of the “Water Transparency Window” during the passage of relativistic particles through an isolated target and a regular stack of plates are analyzed and established. Numerical calculations of the output of polarized radiation have been performed for electrons with an energy of 10 MeV and a titanium target. The principal possibility of applying the effect to*

***create innovative quasi-monochromatic directional sources of polarized X-ray radiation with high angular density is shown.***

**Keywords:** cherenkov radiation, transient radiation, X-ray radiation, titanium, vanadium, water transparency window.

## REFERENCES

1. Ruoxi Chen, Zheng Gong, Jialin Chen, et al., *Materials Today Electronics* **3**, 100025 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100025>
2. Bazylev V. A., Glebov V. I., Denisov E. I., et al., *Letters to the JETF* **24**, 406 (1976).
3. Gary C., Kaplin V., Kubankin A., et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **227**, 95 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.06.015>
4. Bazylev V. A., Glebov V. I., Denisov E. I. et al., *Letters to the JETF* **34**, 103 (1981).
5. Knulst W., Luiten O. J., and van der Wiel M. J., *Applied Physics Letters* **79** (18), 2999 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1415049>.
6. Knulst W., van der Wiel M. J., Luiten O. J., and Verhoeven J., *Applied Physics Letters* **32** (19), 4050200 (2003). <https://doi.org/10.1063/1.1625999>.
7. Johansson G. A., Holmberg A., Hertz H. M., and Berglund M., *Review of Science Instruments* **73** (3), 1193 (2002). <https://doi.org/10.1063/1.1445870>.
8. Henke B. L., Gullikson E. M., and Davis J. C., *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **54** (2), 181–342 (1993).
9. Gharibyan G. M. and Yang Shi. X-ray transient radiation. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, 1983.
10. Ter-Mikaelian M. L. The influence of the environment on electromagnetic processes at high energies. Yerevan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, 1969.
11. Bulgakova M. V., Malyshevsky V. S., and Fomin G. V., *Surface. X-ray, synchrotron, and neutron studies*, № 3, 89 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1027451022020070>.
12. Kubankin A., Nasonov N., Kaplin V., Uglov S., Piestrup M., and Gary C., *Radiation Physics and Chemistry* **75**, 913 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.12.016>.
13. Bulgakova M. V., Malyshevsky V. S., and Fomin G. V., *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **17** (1), S409 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1027451023070054>.
14. Shevelev M., Konkov A., and Alekseev B., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* **464**, 117 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.12.010>
15. Potylitsyn A. P. and Gogolev S. Y., *Letters to ECHAYA* **16** (2 (221)), 147 (2019).
16. Yeginbaryan V. A. and Khachatryan B. V., *Izv AN Arm. SSR, physics* **1**, 11 (1966).
17. Paphomov V. E., *Proceedings of the Order of Lenin of the Physical Institute of the USSR Academy of Sciences* **44**, 28 (1969).

## Об авторах

**Куделя Савелий Александрович**, аспирант физического факультета Южного федерального университета (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42). E-mail: kudelya@sfedu.ru SPIN-код: 9791-5440, AuthorID: 1287429 ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9534-5758>

**Мальшевский Вячеслав Сергеевич**, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики физического факультета Южного федерального университета (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42). E-mail: vsmalyshevsky@sfedu.ru SPIN-код: 4925-9320, AuthorID: 149048, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-5496>

**Фомин Георгий Викторович**, к.ф.-м.н., доцент физического факультета Южного федерального университета (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42). E-mail: fomin@sfedu.ru AuthorID: 34228, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-2844>

УДК 551.46.0  
EDN: ZJDXNQ

PACS: 07.07.Df

**Бортовая оптико-телевизионная система подводного видения  
через границу раздела «воздух–морская вода»**© Ю. К. Грузевич<sup>1,2</sup>, П. С. Альков<sup>1,2</sup>, Л. М. Балясный<sup>1</sup>, Д. В. Волков<sup>1,2\*</sup>, О. В. Чистов<sup>1</sup>,  
Т. Р. Хуснетдинов<sup>2</sup><sup>1</sup> ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», Москва, 107076 Россия

\* E-mail: mitya\_volkov\_7554@bk.ru

<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005 РоссияСтатья поступила в редакцию 29.01.2026; после доработки 22.05.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 2.2.6

*Исследуется возможность создания бортовой вертолетной оптико-телевизионной системы подводного видения, предназначенной для обнаружения и распознавания подводных объектов через границу раздела «воздух–морская вода». Проанализированы физические механизмы ослабления оптического излучения в морской воде (поглощение и рассеяние), а также влияние фитопланктона, органических и неорганических примесей на прозрачность водной среды. Рассмотрены пассивные и активно-импульсные оптико-телевизионные системы подводного видения (АИ ОТС ПВ). Обоснованы преимущества активно-импульсного метода, позволяющего уменьшить влияние обратного рассеяния и повысить дальность и контрастность наблюдения. Описаны ключевые элементы системы: фотоприемный модуль на основе ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом и импульсный Nd:YAG лазер. Сделан вывод о перспективности таких систем для получения высококачественной визуальной информации о подводных объектах и расширения возможностей поисково-спасательных операций.*

*Ключевые слова:* подводное видение, оптико-телевизионная система, активно-импульсный метод, лазерная подсветка, ЭОП III+ поколения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-21-30

**Введение**

В последнее время все большее значение приобретает получение информации о подводных объектах не только с целью их обнаружения и определения местонахождения, но и для распознавания и идентификации, используя для этой цели изображения этих объектов. В частности, такие задачи возникают при использовании специальной аппаратуры, установленной на летательном аппарате, например, на вертолете, для поиска, обнаружения и опознавания затонувших объектов, а также для проведения поисково-спасательных

работ. При этом время поиска подводных объектов с высоты полета вертолета значительно сокращается за счет увеличения площади охватываемого района наблюдения.

**Ослабление излучения**

Проблема применения для этих целей радиолокаторов обусловлена тем, что электромагнитное излучение во всем диапазоне радиочастот, используемое для наземной радиосвязи, не способно распространяться в соленой морской воде, являющейся хорошим

проводником электрического тока. Глубину проникновения электромагнитного излучения в морскую воду можно рассчитать по формуле [1]:

$$h = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота электромагнитного излучения,  $\mu$  – магнитная постоянная морской воды ( $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м),  $\sigma$  – удельная электропроводность морской воды (от 1 до 4 Сименс/м).

Однако существует диапазон радиоволн, который способен распространяться в морской соленой воде – это сверхдлинные радиоволны в частотном диапазоне крайне низких частот (от 3 до 30 Герц) и сверхнизких частот (от 30 до 300 Герц), но для работы на сверхдлинных радиоволнах возникают большие технические трудности. Сложнее всего создать приемно-передающую антенную систему из-за очень большой длины волны, которая, например, при частоте 82 Гц составляет 3658 км. Построить эффективную антенную систему, размеры которой сопоставимы с такими геометрическими размерами волны, не представляется возможным.

Применению гидроакустической аппаратуры для поиска и распознавания подводных объектов присущи принципиальные недостатки, свойственные гидроакустической аппаратуре: зависимость от гидрологических условий, запаздывание информации, вызываемое малой скоростью распространения звука в воде, невысокие пространственное разрешение, помехоустойчивость и точность определения координат подводных объектов, а также сложность конструкции, повышенные массогабаритные характеристики и энергопотребление.

Потенциальные преимущества оптико-электронных систем для получения изображений подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух–морская вода» с борта вертолета для обнаружения и распознавания подводных объектов включают: высокие пространственное разрешение, чувствительность, отношение сигнал/шум, точность определения пространственных координат и дальности до обнаруженных подводных объектов.

В связи с этим возникает задача рассмотрения возможности использования опти-

ческого излучения для получения изображений подводных объектов через взволнованную границу раздела «воздух–морская вода» с борта вертолета (рис. 1).

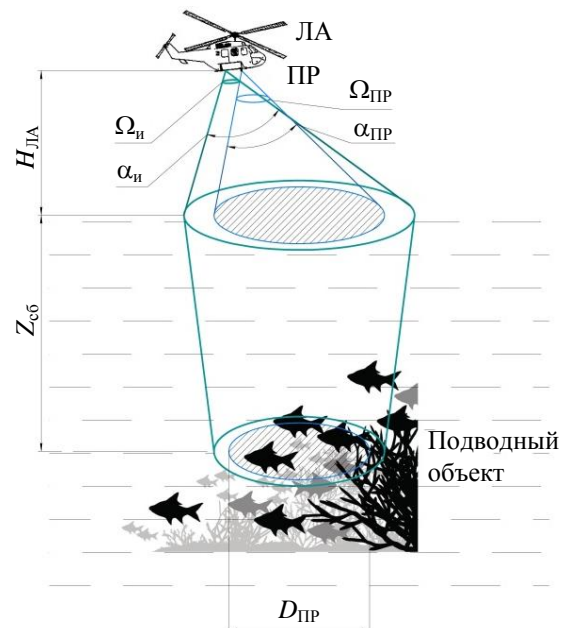


Рис. 1. Формирование изображений подводных объектов через границу раздела «воздух–морская вода» с борта вертолета

При этом процессы рассеяния и селективного поглощения оптического излучения в морской воде заметно влияют на качество изображения даже при сравнительно небольших расстояниях между подводными объектами и системой наблюдения, установленной на борту вертолета. Это влияние проявляется в ослаблении яркости и снижении контрастности изображения, искажении его пространственной структуры, утрате информации о цвете объекта, относительном увеличении шумовой составляющей изображения и, в конечном итоге, ограничении дальности видимости, определяемой, в основном, в результате воздействия следующих факторов. Первый связан с многократным рассеянием, которое приводит к размытию изображения подводного объекта, второй обусловлен флуктуациями в распределении подводной освещенности, вызванными случайным характером преломления оптического излучения на взволнованной поверхности.

Эти флуктуации приводят к появлению в сигнале флуктуационной составляющей, обусловленной волнением, и нарушению тополо-

гии изображения. Считая эти факторы взаимно не коррелированными, можно оценить их влияние на качество изображения раздельно. Кроме того, необходимо учитывать скорость движения вертолета и многочисленные взаимодействия с поверхностями, которые испытывает оптическое излучение при прохождении через воздух, взаимодействиях с поверхностью воды, распространении в воде, а затем при повторном прохождении через те же самые поверхности. Эти взаимодействия становятся еще более сложными, когда рассеивающие и поглощающие вещества, присутствующие в воде, имеют более высокую концентрацию вблизи поверхности. Все эти сложности в совокупности значительно снижают общий возвращаемый сигнал и, таким образом, ограничивают использование оптико-электронной системы подводного видения на мелководных участках морской поверхности.

Учитывая особенность распространения оптического излучения в морской среде, в данной работе рассматривается возможность использования высокоразрешающих оптико-телевизионных систем для обеспечения наблюдения подводного пространства с борта вертолета за счет регистрации отраженного от подводных объектов подсвечивающего оптического излучения и формирования изображения подводных объектов на экране монитора, которые используются оператором на борту вертолета для распознавания подводных объектов при определенных условиях наблюдения.

На пути распространения подсвечивающего оптического излучения происходит несколько типов взаимодействий со средой (воздухом и морской водой), ослабляющих его мощность, включая рассеяние и поглощение, которое можно оценить, используя закон Бугера [1]:

$$\Phi(r) = \Phi_0 \exp \left\{ - \int_0^r [\alpha(r) + \beta(r)] dr \right\}, \quad (2)$$

где  $\Phi(r)$  и  $\Phi_0$  – текущий и начальный поток оптического излучения,  $r$  – толщина среды (воздуха и морской воды),  $\alpha(r)$  – коэффициент поглощения среды (воздуха и морской во-

ды),  $\beta(r)$  – коэффициент обратного рассеяния среды (воздуха и морской воды).

Поглощение оптического излучения – это основной механизм ослабления, который необходимо учитывать при распространении оптического излучения в морской воде. Поглощение оптического излучения происходит, когда фотоны поглощаются молекулами воды, увеличивая электронные энергетические состояния молекул. За счет поглощения на ослабление лазерного излучения в морской воде влияет ряд факторов: сама чистая морская вода, фитопланктон, разложившийся растительный материал и другие неорганические частицы.

Для чистой воды поглощение оптического излучения достаточно низкое – до длины волны ~ 600 нм. При увеличении длины волны зондирующего оптического излучения более сильные колебательные энергетические переходы вызывают заметное и значительное увеличение интенсивности поглощения. Спектральная характеристика поглощения чистой воды приведена на рис. 2 [1].

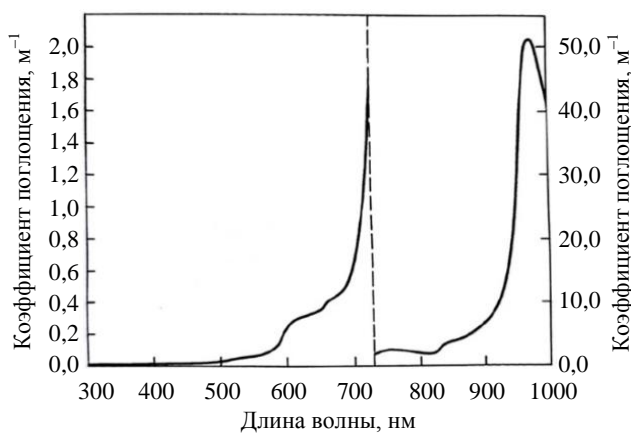


Рис. 2. Спектральная характеристика поглощения чистой воды

Введение соли в концентрациях, характерных только для морской воды, вызывает очень небольшое увеличение коэффициента поглощения (порядка  $0,002 \text{ м}^{-1}$ ) в диапазоне длин волн от 400 нм до 680 нм [3]. Это пренебрежимо мало по сравнению с любым другим ослабляющим фактором в водной среде. Поэтому поглощение морской водой для любой заданной длины волны можно аппроксимировать поглощением чистой водой для той же заданной длины волны.

Фитопланктон и другие фотосинтезирующие материалы поглощают значительно сильнее оптическое излучение, чем чистая морская вода. Основным поглощающим компонентом фотосинтезирующих материалов является хлорофилл, который бывает двух типов: хлорофилл *a* и хлорофилл *b*. Независимо от типа хлорофилл имеет две основные полосы поглощения – одна в «красной» области видимого диапазона спектра, а другая – в «синей». Хотя это указывает на то, что хлорофилл будет легче поглощать оптическое излучение в этих частях спектра, любая длина волны оптического излучения имеет вероятность поглощения [1]. Уровень поглощения оптического излучения фитопланктоном и другими фотосинтезирующими материалами зависит от местоположения и концентрации хлорофилла в воде. В мелководных районах фитопланктон и фотосинтетические материалы могут занимать всю толщу воды от поверхности до морского дна. В более глубоких прибрежных водах или открытом океане концентрация фотосинтетических материалов зависит от интенсивности окружающего солнечного света.

Таким образом, вблизи поверхности океана наблюдаются более высокие концентрации материалов, содержащих хлорофилл, которые частично распространяются в толщу воды до тех пор, пока солнечное излучение полностью поглотится и при увеличении глубины уровень потерь оптического излучения будет определяться поглощением водной среды. Поэтому интенсивность поглощения оптического излучения материалами, содержащими хлорофилл, сильно варьируется в зависимости от местоположения применения системы наблюдения. Например, в открытом океане нет высокой концентрации этих материалов и интенсивность поглощения, обусловленная этими материалами, крайне низкая. Однако для прибрежных вод интенсивность поглощения от этих материалов может значительно повысить уровень потерь оптического излучения.

Кроме этого, на интенсивность поглощения оптического излучения в морской воде оказывают различные нефотосинтезирующие материалы – такие, как разложившиеся растительные материалы, известные как окрашенное растворенное органическое вещество, и

другие неорганические частицы поглощают оптическое излучение [1].

Спектральная зависимость интенсивности поглощения оптического излучения в открытом океане, обусловленная вышеупомянутыми факторами потерь в морской воде, приведена на рис. 3 [2].

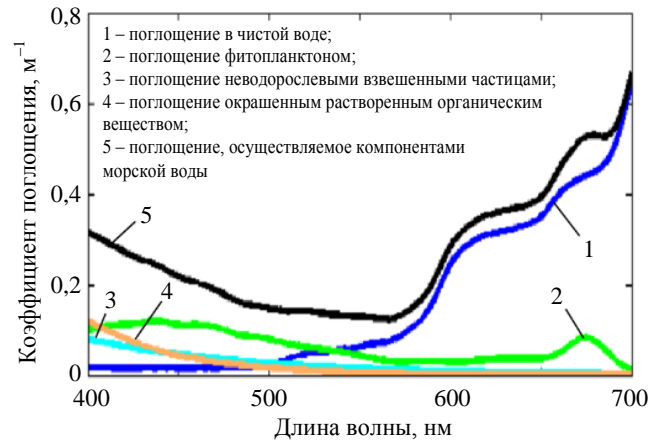
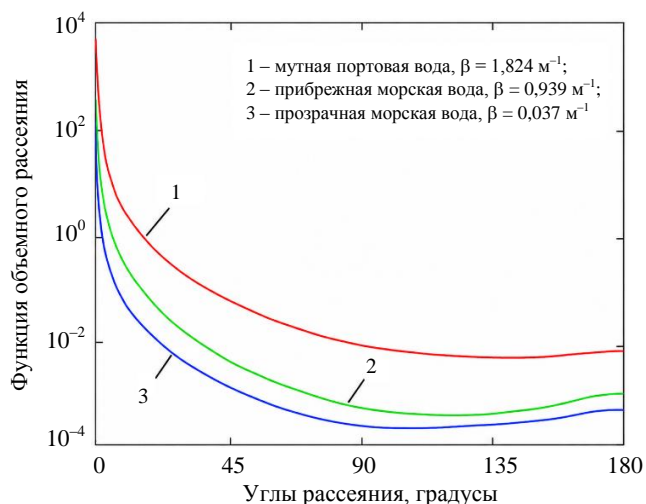


Рис. 3. Спектральная зависимость интенсивности поглощения оптического излучения в открытом океане

Рассеяние оптического излучения – это также основной механизм ослабления, который необходимо учитывать при распространении оптического излучения в морской воде, которое принимает две формы: упругое и неупругое. Упругое рассеяние не приводит к изменению длины волны и часто моделируется двумя различными способами: рассеянием Рэля и рассеянием Ми. Выбор модели зависит от размера рассеивающих частиц и длины волны оптического излучения. Учитывая, что поглощение оптического излучения минимально в спектральном диапазоне от 450 нм до 550 нм, а диаметр молекул воды порядка 0,3 нм, то рассеяние Рэля можно рассматривать только при взаимодействии с чистой морской водой.

Второе упругое взаимодействие оптического излучения с морской средой – это рассеяние Ми, которое возникает при взаимодействии с более крупными частицами. Теория рассеяния Ми рассматривает частицы любого размера, взвешенные в морской воде, как среду, через которую распространяется оптическое излучение, и достаточно точно описывает эмпирические данные об угловом распределении рассеянного оптического излучения в морской воде [1]. Угловое распределение

рассеянного оптического излучения в различных типах морской воды приведено на рис. 4, представленное в виде функции объемного рассеяния, которая описывает распределение рассеянной мощности оптического излучения от входного потока по отдельным углам рассеяния [2].



**Рис. 4. Распределение рассеянной мощности оптического излучения от углов рассеяния**

Графики, приведенные на рис. 4, полученные для лазерного излучения с длиной волны 515 нм, показывают, какой вклад вносит рассеяние Ми в общее ослабление оптического излучения при распространении через толщу различных типов морской воды: мутной портовой воды, прибрежной морской воды и прозрачной морской воды [4]. Значения рассеяния на графиках рис. 4 при углах  $0^\circ$  представляет собой оптическое излучение, которое было либо рассеяно вперед, либо не рассеяно совсем, а при углах  $180^\circ$  – показывает уровень оптического излучения, которое было рассеяно в обратном направлении распространения. Все остальные углы описывают распределение оптического излучения, которое было рассеяно в каком-либо другом направлении. Анализ графиков, приведенных на рис. 5, показывает, что большая часть падающего оптического излучения продолжает распространяться в прямом направлении ( $\sim 0$  градусов), и лишь незначительная часть распространяется в обратном направлении (вблизи углов рассеяния  $180^\circ$ ). Данные графики используются для оценки доли рассеянного оптического излучения в прямом и обратном

распространении оптического излучения в различных типах морской воды.

Поскольку характеристики рассеяния и поглощения оптического излучения морской водой зависят от концентрации взвешенных в воде веществ, то океан по глубине обычно делят на три области: эвфотическую, дисфотическую и афотическую зоны. При разработке оптико-телевизионных систем подводного видения (ОТС ПВ) наибольший интерес представляет эвфотическая зона – это область, которая поглощает 99 % падающего солнечного излучения на поверхности океана. Как правило, максимальная глубина для этой зоны составляет около 200 м, но может колебаться в зависимости от доступности солнечного света. Эвфотическая зона – это область, в которой максимальная концентрация фитопланктона и других фотосинтезирующих веществ, поэтому в этой области будет максимальное ослабление оптического излучения и, следовательно, эта область наиболее важна при проектировании электронных систем подводного видения [1].

Концентрация фитопланктона и другого фотосинтезирующего материала значительно снижается от поверхности океана до дна эвфотической зоны, хотя в некоторых районах мира на больших глубинах существует вторичный максимум концентрации хлорофилла [2]. В прибрежных водах достаточно высокая концентрация растворенных органических вещества по всей толще морской воды, вызывая значительное ослабление оптического излучения. Все это влияет на воспринимаемую прозрачность морской воды и, следовательно, на способность оптического излучения распространяться через водную среду. Например, в открытом океане отсутствует большая часть посторонних примесей, характерных для прибрежных вод, поэтому потери оптического излучения при распространении в морской воде в открытом океане будут значительно меньше, чем в прибрежных водах. Была проведена классификация водной среды, учитывающая определённые концентрации хлорофилла и фитопланктона в морской воде, что позволяет лучше прогнозировать, как зондирующее оптическое излучение будет поглощаться и рассеиваться в морской воде [5]. В соответствии с проведенной классификаци-

ей морская вода от открытого океана до прибрежной области была разбита на группы на основе пропускания оптического излучения. Чем сильнее ослаблялось оптическое излучение, тем выше присваивался ему номер. Спектральные характеристики пропускания морской воды на основе введенной классификации приведены на рис. 5.

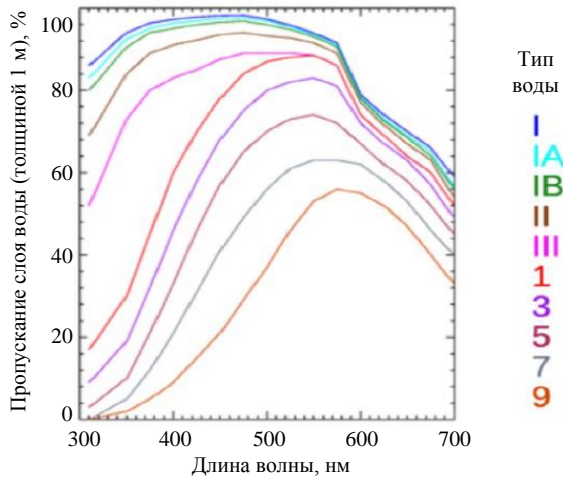


Рис. 5. Пропускание излучения морской воды на основе введенной классификации

Обобщенная спектральная характеристика ослабления оптического излучения морской водой, обусловленного поглощением и объемным рассеянием, приведена на рис. 6. Анализ полученной характеристики показывает, что бортовые ОТС ПВ должны иметь максимальную фоточувствительность в спектральном диапазоне максимальной прозрачности морской воды (от 450 нм до 550 нм),

которые можно подразделить на две большие группы: пассивные и активно-импульсные оптико-телевизионные системы подводного видения.

В пассивных ОТС ПВ изображение формируется при естественном (солнечном) освещении, хотя, как правило, на большой глубине отсутствует подсвечивающее солнечное излучение или при использовании мощных прожекторных осветителей для постоянной подсветки подводных целей.

Известно, что в морской воде световой поток ослабляется значительно сильнее, чем в атмосфере. Можно компенсировать ослабление подсвечивающего оптического излучения повышением мощности потока оптического излучения. Однако это приводит к увеличению яркости помехи обратного рассеяния (далее по тексту – ПОР), снижающей контрастность изображения. Опыт эксплуатации подводных пассивных оптико-телевизионных систем подводного видения показывает, что для увеличения предельной дальности на 15–20 % необходимо увеличить мощность источника света прожектора в 10 раз [6]. Анализ результатов работы отечественных подводных пассивных ОТС ПВ, выполненный специалистами ФГУП СПМБМ «Малахит», позволяет сделать вывод о том, что возможности прожекторных осветителей для увеличения дальности подводного видения практически исчерпаны. При этом их самым большим достоинством является их относительная дешевизна [6].

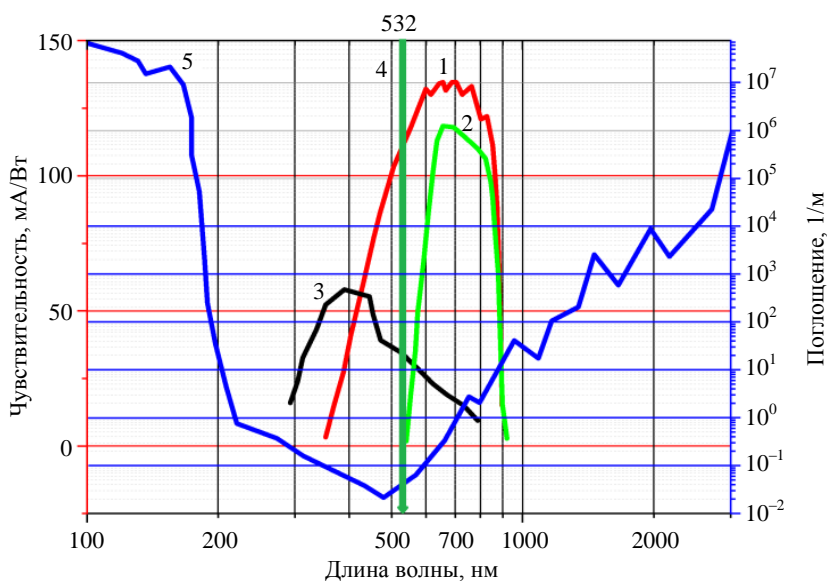


Рис. 6. Спектральные характеристики прозрачности морской воды и ЭОП III+ поколения и излучения Nd:YAG-лазера: 1 – спектральная фоточувствительность ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом; 2 – спектральная фоточувствительность стандартного ЭОП III+ поколения GaAs фотокатодом; 3 – спектральная фоточувствительность ЭОП II+ поколения; 4 – излучение Nd:YAG-лазера; 5 – спектральная характеристика поглощения морской воды

Применение активно-импульсного метода формирования подводных видеоизображений позволяет устранить «паразитное» влияние ПОР, обусловленное оптическими помехами – такими, как рассеивающая морская вода и фитопланктон, которые накладываются на полезное изображение наблюдаемых подводных объектов, снижая их контраст. Профиль эхо-сигнала АИ ОТС ПВ, расположенной над поверхностью моря на борту вертолета, приведен на рис. 7.

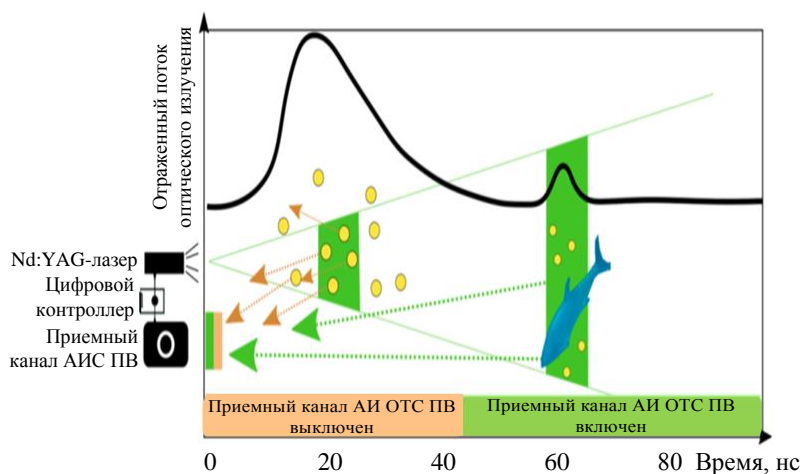


Рис. 7. Профиль эхо-сигнала АИ ОТС ПВ: 1 – ПОР морской среды, 2 – отраженный сигнал от подводного объекта

Важнейшими ключевыми элементами, используемыми для создания высокоэффективных лазерных АИ ОТС ПВ, являются быстродействующий фотоприемный оптико-телевизионный канал, высокоэффективный импульсный лазер и быстродействующий цифровой контроллер.

Быстродействующий фотоприемный оптико-телевизионный канал создан на основе фотоприемного модуля типа «ФПМ-5-1» с чувствительной структурой «ЭОП III+ поколения – программируемая стробируемая цифровая ТВ камера на основе крупноформатной цифровой КМОП-матрицы». В структуре модуля используется специально разработанный фотоприемный оптико-телевизионный канал с отрицательным электронным средством со спектральной характеристикой, продленной в сине-зеленую область спектра прозрачности морской воды (рис. 6), который получил название ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом [7]. Разработанный ЭОП III+ поколения обладают рядом преимуществ по сравнению со стандартным ЭОП III+ поколения, имеющим очень низкую фоточувствительность в спектральном диапазоне прозрач-

Активно-импульсные оптико-телевизионные системы подводного видения используют для работы искусственную подсветку в спектральном диапазоне максимальной прозрачности морской воды ( $\Delta\lambda = 450\div550$  нм), создаваемую высокоэффективными импульсными лазерными источниками, синхронно работающими с фотоприемным оптико-телевизионным каналом, чувствительным в спектральном диапазоне ( $\Delta\lambda = 450\div550$  нм), также работающим в импульсном режиме.

ности морской воды (рис. 6), а ЭОП II+, SuperII+, HyperII+ – поколений имеют значительно низкую фоточувствительность в спектральном диапазоне прозрачности морской воды (рис. 6), а также очень низкое удельное сопротивление фотокатодов, что не позволяет осуществлять их стробирование короткими импульсами (до единиц наносекунд).

Внешний вид разработанного ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» фотоприемного оптико-телевизионного канала АИ ОТС ПВ на основе модуля типа «ФПМ-5-1» приведен на рис. 8, а его основные параметры – в таблице 1.



Рис. 8. Внешний вид фотоприемного оптико-телевизионного канала АИ ОТС ПВ на основе модуля типа «ФПМ-5-1»

Таблица 1

Наименование параметров	Значения параметров
Угловое поле, град	20
Пространственное разрешение по полю, твл	450
Диаметр фотокатода ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом	18 мм
Спектральный диапазон фоточувствительности, мкм	0,4÷0,8
Интегральная фоточувствительность, мкА/лм	2800
Спектральная фоточувствительность на $\lambda = 530$ нм, мА/Вт	140
Тип цифровой ТВ камеры на основе КМОП матрицы	e2v EV76C560 АВТ
Формат ТВ камеры	1/1,8"
Разрешение ТВ камеры, пиксели	1282×1026
Размер пикселя ТВ камеры, мкм	5,3×5,3
Частота кадров, Гц	60
Потребляемая мощность, Вт	20
Масса, кг	1
Габариты, мм	110×80×215

Другим ключевым элементом АИ ОТС ПВ является высокоэффективный импульсный лазер, рабочим телом которого является кристалл Nd:YAG. Накачка рабочего тела лазера осуществляется диодными линейками, модуляция добротности производится электрооптическим затвором, а удвоение частоты генерации (на длине волны 527 нм) осуществляется элементом на основе кристалла КТР, что обеспечивает излучение в спектральной области прозрачности морской воды (рис. 6). Внешний вид разработанного Институтом физики БАН (Республика Беларусь) импульсного Nd:YAG лазера типа «Н-Р50-532» из состава АИ ОТС ПВ приведен на рис. 9, а его основные параметры – в таблице 2.

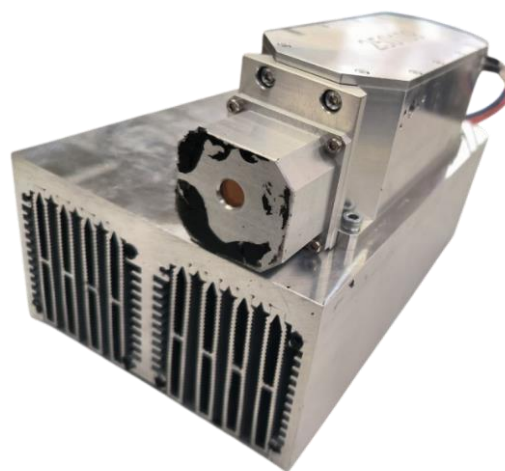


Рис. 9. Внешний вид импульсного Nd:YAG лазера типа «Н-Р50-532»

Таблица 2

Наименование параметров	Значения параметров
Длина волны излучения, нм	$532 \pm 5$
Энергия в импульсе, мДж	> 50
Фиксированная частота следования импульсов, Гц	20
Длительность импульса, нс	< 10
Диаметр пучка, мм	< 5
Расходимость пучка, мрад	< 3
Длина волны излучения, нм	$532 \pm 5$
Потребляемая мощность, Вт	300
Масса, кг	2
Габариты (без системы охлаждения), мм	50×60×165

Для управления импульсным питанием ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом, цифровой КМОП-матрицей и импульсным Nd:YAG-лазером, а также для первичной обработки цифровых изображений обнаруженных подводных объектов используется быстродействующий цифровой контроллер. Регулируемый временной строб управления включает приемный канал АИ ОТС ПВ на определенной дальности, устраняет ПОР и обеспечивает наблюдение по глубине подводного пространства в отсутствии солнечного излучения.

### Заключение

Реализация технологии активно-импульсного режима привела к созданию оптико-телевизионных систем для обеспечения наблюдения подводного пространства с борта вертолета за счет регистрации отраженного от подводных объектов подсвечивающего оптического излучения и формирования изображения объектов на экране монитора, которые используются оператором на борту вертолета для распознавания подводных объектов при определенных условиях наблюдения.

Практическое значение активно-импульсного режима заключается в достижении высокой дальности подводного видения по сравнению с другими пассивными оптическими и оптико-электронными приборами, а также высокочастотными гидролокаторами секторного обзора, работающими в идентичных условиях. Переход на качественно новый уровень получения визуальной видеoinформации позволит расширить ограниченные естественным образом возможности человеческого глаза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Kirk J. T. O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983.
2. Mobley C. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. – Academic Press, 1994.
3. Sullivan J. M., Twardowski J. R., Moore C., Barnard A., Donaghay P. L., Rhoades B. / App. Opt. 2006. Vol. 45. № 21. P. 5294–5309.
4. Petzold T. J. Volume scattering functions for selected ocean waters. – San Diego: University of California, 1972.
5. Morel A. / J. Geophys. Res. Sep. 1988. Vol. 93. № C9. P. 10749–10768.
6. Мартынов В. Л., Краснополяский В. Е., Мальцев А. Б. / Судостроение. 2005. № 4. С. 45–49.
7. Грузевич Ю. К. и др. / Прикладная физика. 2025. № 1. С. 70–78.

PACS: 07.07.Df

## On-board optical television system for underwater vision across the air-sea interface

Yu. K. Gruzevich<sup>1,2</sup>, P. S. Alkov<sup>1,2</sup>, L. M. Balyasny<sup>1</sup>, D. V. Volkov<sup>1,2\*</sup>, O. V. Chistov<sup>1</sup>, and T. R. Khusnetdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint Stock Company «RPC GEOFIZIKA-NV», Moscow, 107076 Russia

\* E-mail: mitya\_volkov\_7554@bk.ru

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

Received 29.01.2026; revised 22.05.2026; accepted 5.06.2026

*This article examines the feasibility of developing an airborne optical television underwater vision system for detecting and recognizing underwater objects across the air-sea interface from a helicopter. The article analyzes the physical mechanisms of optical radiation attenuation in seawater, including absorption and scattering, as well as the influence of phytoplankton, organic, and inorganic impurities on the transparency of the aquatic environment. Passive and active-pulse optical television underwater vision systems are considered, substantiating the advantages of the active-pulse method, which reduces the influence of backscatter and increases the range and contrast of observation. The key elements of the system are described:*

*a photodetector module based on a III+ generation image intensifier with a "blue" photocathode and a pulsed Nd:YAG laser. It is concluded that active-pulse optical television systems offer potential for obtaining high-quality visual information about underwater objects and expanding the capabilities of search and rescue operations.*

*Keywords:* underwater vision, optical television system, active-pulse method, laser illumination, III+ generation image intensifier tube.

## REFERENCES

1. Kirk J. T. O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983.
2. Mobley C. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. Academic Press, 1994.
3. Sullivan J. M., Twardowski J. R., Moore C., Barnard A., Donaghay P. L., and Rhoades B., *App. Opt.* **45** (21), 5294–5309 (2006).
4. Petzold T. J. Volume scattering functions for selected ocean waters. San Diego: University of California, 1972.
5. Morel A., *J. Geophys. Res.* **93** (C9), 10749–10768 (Sep. 1988).
1. Martynov V. L., Krasnopolskiy V. Ye., and Maltsev A. B., *Sudostroenie*, № 4, 46–48 (2005).
6. Gruzevich Yu. K., Alkov P. S., Balyasny L. M., and Volkov D. V., *Applied Physics*, № 1, 70–78 (2025) [in Russian].

## Об авторах

**Грузевич Юрий Кириллович**, заместитель генерального директора по научной работе, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» (107076, Россия, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2); профессор, МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1). E-mail: yu.kg@mail.ru AuthorID: 526171

**Альков Павел Сергеевич**, генеральный директор, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» (107076, Россия, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2); к.т.н., доцент, МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1). E-mail: pavel\_alkov@mail.ru

**Балясный Лев Михайлович**, главный конструктор ЭОП и ФПМ, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» (107076, Россия, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2) E-mail: baliaska@mail.ru

**Волков Дмитрий Владимирович**, ведущий инженер, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» (107076, Россия, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2); МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1). E-mail: mitya\_volkov\_7554@bk.ru

**Чистов Олег Валерьевич**, заместитель технического директора, ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» (107076, Россия, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2). E-mail: arkhont@mail.ru

**Хуснетдинов Тимур Рустямович**, старший преподаватель, МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1). SPIN-код: 4759-4489, AuthorID: 690829

УДК 538.935  
EDN: ZPARVZ

PACS: 72.80.Ey, 72.20.Mu

## Определение параметров легких и тяжелых дырок в монокристаллах $p$ -GaSb на основе комплексного анализа эффекта Холла

© Л. Н. Овешников<sup>1\*</sup>, А. Б. Давыдов<sup>1</sup>, М. А. Чернопицкий<sup>1</sup>, А. А. Фельде<sup>1</sup>,  
И. И. Минаев<sup>1</sup>, А. В. Клековкин<sup>1</sup>, В. С. Кривобок<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

\* E-mail: oveshnikovLN@lebedev.ru

<sup>2</sup> АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 20.02.2026; после доработки 7.04.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.11

*Представлены результаты измерений электрофизических параметров коммерчески доступных монокристаллических подложек  $p$ -GaSb в диапазоне температур 80–300 К. Выполнен сравнительный анализ полевых и температурных зависимостей холловского сопротивления с учетом вырождения валентной зоны и без него. Продемонстрированы ограничения использования стандартной модели, полагающей наличие лишь одного типа дырок, для описания транспортных свойств  $p$ -GaSb. Установлено, что немонотонная температурная зависимость сопротивления пластин обусловлена монотонным изменением концентраций и подвижностей свободных дырок. На основе анализа в рамках модели, учитывающей вклады легких и тяжелых дырок, оценена температурная зависимость химического потенциала материала подложки. Полученные данные служат базой для дальнейшего конструирования фоточувствительных гетероструктур на основе изученных подложек.*

*Ключевые слова:* антимонид галлия, дырочная проводимость, полупроводниковые подложки, эффект Холла, магнетосопротивление, многозонные полупроводники.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-31-40

### Введение

Последнее время активно развиваются новые подходы ИК фотосенсорике, основу которых составляют полупроводниковые эпитаксиальные гетероструктуры  $A^{III}B^V$ , содержащие сурьму [1, 2]. При использовании короткопериодных сверхрешеток в качестве поглощающих слоев данные гетероструктуры покрывают чрезвычайно широкий спектральный диапазон, включая окна прозрачности атмосферы 3–5 мкм и 8–12 мкм, одновременно обеспечивая удельную обнаружительную способность близкую к фундаментальному пределу при температурах 80–150 К [3]. Наряду с

выбором дизайна гетероструктуры, для достижения высоких фотоэлектрических характеристик ключевую роль играет материал подложки, используемой для эпитаксиального роста структуры.

Ввиду возможности точного согласования по постоянной решетки одной из удобных подложек для роста фоточувствительных гетероструктур на основе сверхрешеток являются монокристаллические пластины GaSb  $n$ - или  $p$ -типа [2, 4]. Независимо от типа архитектуры фоточувствительного элемента, транспортные свойства подложки неизбежно сказываются на свойствах фоточувствительных элементов, даже при использовании про-

цедуры утонения подложек до толщин 10–20 мкм. Данное влияние определяется двумя основными факторами – наличием дополнительного сопротивления, включенного параллельно контактному слою, и изгибом зон, вызванным выравниванием химического потенциала между подложкой и фоточувствительным элементом. Для надежного прогнозирования режимов работы фоточувствительных элементов необходим корректный учет этих факторов на стадии проектирования гетероструктуры. Как следствие, необходимы исследования транспортных свойств подложек, используемых для эпитаксии, в широком диапазоне температур.

В данной работе приводятся результаты электрофизических исследований *epi-ready* подложек *p*-GaSb, изготовленных Ram Xiamen (Китай). Данные подложки являются основными подложками *p*-типа с низким уровнем легирования из доступных на данный момент в РФ. В работе приведены результаты измерения проводимости и холловского сопротивления в широком диапазоне температур, которые позволили определить температурную зависимость концентрации основных носителей, их подвижности и химического потенциала. Для корректной оценки химического потенциала используется двухзонная модель, учитывающая вклады в транспортные свойства легких и тяжелых дырок, а также проводится сравнение с результатами обработки в рамках однозонной модели, гораздо чаще применяемой для стандартной характеристики полупроводниковых материалов.

### Образцы и методика измерений

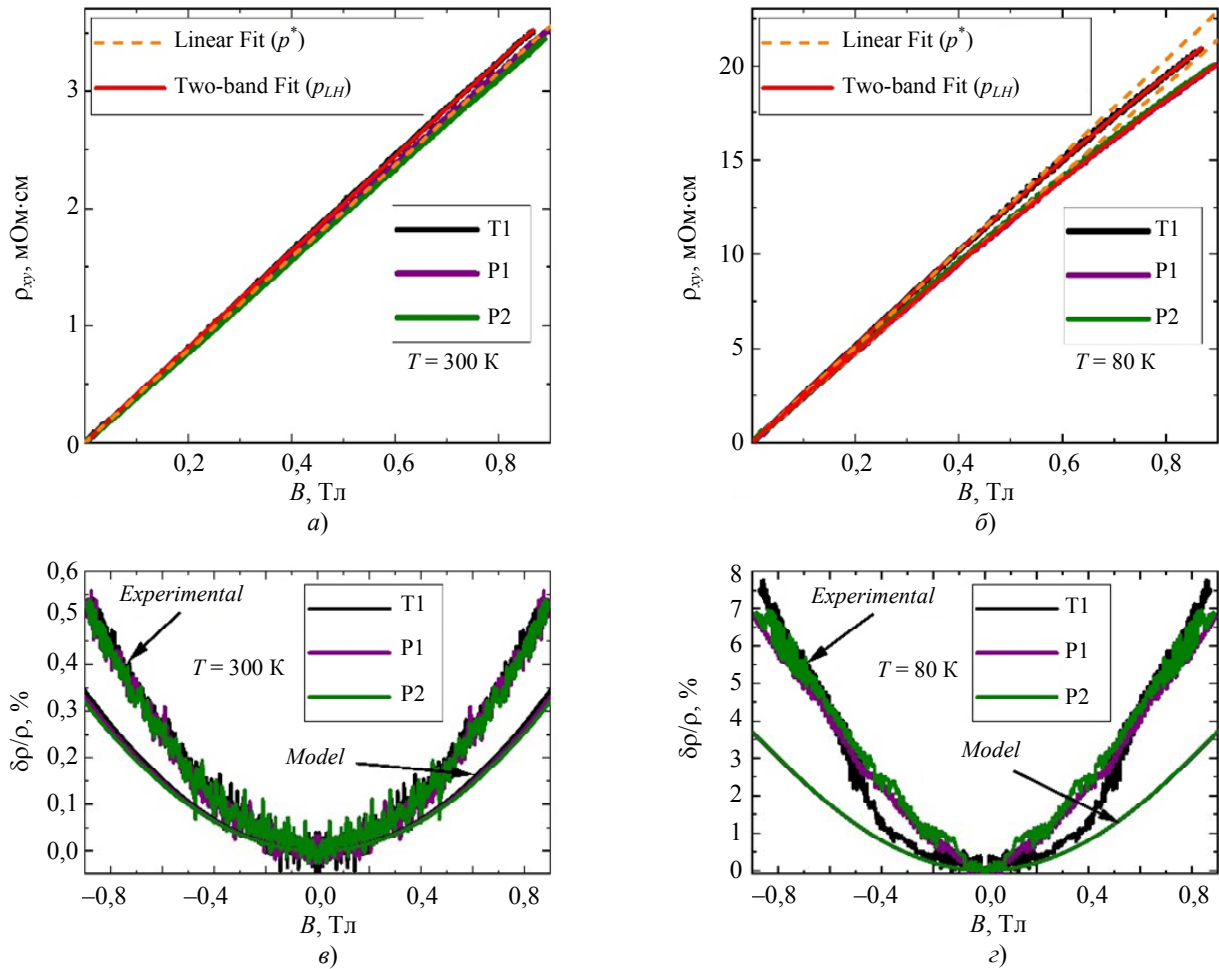
В работе исследовались три образца GaSb *p*-типа (T1, P1 и P2), выколотых из коммерчески доступных двухдюймовых пластин толщиной 0,53 мм (Ram Xiamen, Китай). Для проведения измерений на образцы напы-

лялись контактные площадки Ti/Au (T1) или Ti/Pd/Au (P1 и P2). При этом образцы T1 и P1 выкалывались из одной пластины, а образец P2 – из другой. Фактически рассмотрение трёх образцов в настоящей работе необходимо для иллюстрации воспроизводимости электрофизических характеристик и связанных с ними параметров материала. Для проведения измерений образцы помещались на держатель, контактные площадки на держателе и на образце соединялись посредством ультразвуковой сварки алюминиевой проволокой.

Исследование транспортных и магнито-транспортных свойств данных образцов проводилось на установке на базе электромагнита в диапазоне температур  $T = 80\text{--}300\text{ K}$  и магнитных полях до  $B = 0,9\text{ Тл}$ . Измерения проводились на постоянном токе с коммутацией по четырёх-зондовой схеме. Для измерений использовался источник напряжения в связке с опорным сопротивлением, ток в измерительной цепи измерялся независимо.

### Результаты и обсуждения

В рамках настоящей работы измерялись полевые и температурные зависимости продольного ( $\rho_{xx}$ ) и холловского ( $\rho_{xy}$ ) сопротивлений исследуемых образцов. На рис. 1а–б представлены полевые зависимости холловского сопротивления  $\rho_{xy}$  при температурах 300 К и 80 К. Знак полученных кривых свидетельствует о том, что во всем исследованном диапазоне температур проводимость имеет *p*-тип. Видно некоторое различие между экспериментальными кривыми, что, очевидно связано с некоторой флуктуацией свойств исследуемых пластин. Однако, как будет показано в дальнейшем, соответствующая разница в значениях транспортных параметров для разных образцов оказывается незначительной, подтверждая хорошую воспроизводимость свойств материала.



**Рис. 1.** Полевые зависимости (а, б) холловского сопротивления и (в, г) магнетосопротивления исследуемых образцов при температурах (а, в) 300 К и (б, г) 80 К. На рисунках (а, б) оранжевым пунктиром показана линейная аппроксимация данных в диапазоне ±0,5 Тл, а красной линией показана аппроксимация данных двухзонной моделью (7–8). На рисунках (в, г) кроме экспериментальных данных показаны модельные кривые МС, рассчитанные с помощью формул (7–10) со значениями параметров, указанными в таблице 1

Анализ холловских данных зачастую проводится в рамках однозонной модели, то есть предполагается наличие только одной группы носителей заряда. В этом случае зависимость  $\rho_{xy}(B)$  должна иметь линейный вид, а из величины её линейного наклона  $R_H = d\rho_{xy} / dB$  определяется концентрация  $p^*$  и подвижность  $\mu^*$  носителей заряда с помощью стандартных соотношений:

$$p^* = \frac{r_H}{eR_H}, \tag{1}$$

$$\mu^* = \frac{R_H}{r_H \rho_{xx}}, \tag{2}$$

где  $e$  – заряд электрона, а  $r_H$  – холл-фактор, определяемый доминантным механизмом рас-

сеяния носителей заряда. В большинстве случаев принимается  $r_H = 1$ . Часто такой анализ  $\rho_{xy}(B)$  проводят в очень узком диапазоне полей и используют для характеристики коммерчески доступных материалов (в том числе производителем исследуемых в работе пластин). В нашем случае линейная аппроксимация (примеры показаны оранжевым пунктиром на рис. а–б) проводилась в диапазоне ±0,5 Тл. Как видно из рисунков, при комнатной температуре линейная функция хорошо описывает экспериментальные данные во всём диапазоне полей, однако при низких температурах в более высоких полях наблюдается отчетливое несовпадение, что свидетельствует о неприменимости простейшей модели в данном случае. Значения концентраций и подвижностей дырок, рассчитанных по формулам (1) и (2), представлены в таблице 1. Уже из

этих результатов видно, что уменьшению температуры сопутствует значительное уменьшение плотности носителей заряда и рост их по-

движности. Полученные значения хорошо соответствуют паспортным величинам, заявленным производителем пластин.

Таблица 1

*Транспортные параметры исследуемых образцов при температурах 300 и 80 К: удельное сопротивление  $\rho_{xx}$ , концентрации и подвижности дырок ( $p^*$  и  $\mu^*$ ), полученные в рамках однозонной модели (1–2), и параметры легких (LH) и тяжелых (HH) дырок, рассчитанные на основании двухзонной модели (7–8) при  $K_n = 22,6$ ,  $K_\mu = 0,1$*

Образец	$T, K$	$\rho_{xx}$ , МОм·см	$p^*, \times 10^{16}$ см <sup>-3</sup>	$\mu^*$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$p_{LH}, \times 10^{16}$ см <sup>-3</sup>	$\mu_{LH}$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$p_{HH}, \times 10^{16}$ см <sup>-3</sup>	$\mu_{HH}$ , см <sup>2</sup> /(В·с)
Т1	300	68,75	15,3	590	1,76	1580	39,8	158
	80	125,4	2,46	2030	0,279	5480	6,29	548
Р1	300	68,14	15,8	580	1,81	1550	41,0	155
	80	117,0	2,63	2030	0,299	5480	6,76	548
Р2	300	68,15	16,1	570	1,85	1520	41,8	152
	80	117,4	2,61	2040	0,297	5500	6,71	550

Отклонение от линейной зависимости  $\rho_{xy}(B)$ , в отсутствие магнитной компоненты в системе обычно связано с наличием нескольких групп носителей заряда, что характерно для полупроводников  $A^{III}B^V$   $p$ -типа, ввиду присутствия в их спектре зон лёгких (LH) и тяжёлых (HH) дырок. В общем случае каждая группа носителей вносит аддитивный вклад в соответствующие компоненты проводимости  $\sigma$  как функций магнитного поля  $B$ :

$$\sigma_{xx}(B) = \sum_i \frac{en_i\mu_i}{1 + \mu_i^2 B^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}(B) = \sum_i \frac{en_i\mu_i \cdot \mu_i B}{1 + \mu_i^2 B^2}, \quad (4)$$

где  $n_i$  и  $\mu_i$  – концентрация и подвижность носителей в  $i$ -зоне. В случае GaSb  $p$ -типа  $i = 2$ , а параметры зоны тяжёлых дырок можно определить через соответствующие коэффициенты пропорциональности:

$$K_n = \frac{p_{HH}}{p_{LH}}, \quad (5)$$

$$K_\mu = \frac{\mu_{HH}}{\mu_{LH}}, \quad (6)$$

тогда можно переписать исходные компоненты тензора проводимости в следующей форме:

$$\sigma_{xx} = ep_{LH}\mu_{LH} \left( \frac{1}{1 + \mu_{LH}^2 B^2} + \frac{K_n K_\mu}{1 + K_\mu^2 \mu_{LH}^2 B^2} \right), \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = ep_{LH}\mu_{LH}^2 B \left( \frac{1}{1 + \mu_{LH}^2 B^2} + \frac{K_n K_\mu}{1 + K_\mu^2 \mu_{LH}^2 B^2} \right). \quad (8)$$

Соответственно, экспериментально измеряемые полевые зависимости сопротивлений  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  могут быть описаны в рамках двухзонной модели (7–8) с помощью соответствующей инверсии компонент тензора проводимости, записываемой для изотропного материала в следующем виде:

$$\rho_{xx}(B) = \frac{\sigma_{xx}(B)}{\sigma_{xx}^2(B) + \sigma_{xy}^2(B)}, \quad (9)$$

$$\rho_{xy}(B) = \frac{\sigma_{xy}(B)}{\sigma_{xx}^2(B) + \sigma_{xy}^2(B)}. \quad (10)$$

Вполне очевидно, что фактическая форма теоретических кривых определяется значениями  $\mu_{LH}$ ,  $K_n$  и  $K_\mu$ , тогда как величина  $p_{LH}$  является просто масштабирующим множителем. Тем не менее, аппроксимация одной кривой  $\rho_{xy}(B)$  функцией с четырьмя подгонными параметрами может приводить к заметным неоднозначностям получаемых результатов, особенно в ограниченном диапа-

зоне магнитных полей. Поэтому в ряде случаев рекомендуется проводить совместную аппроксимацию кривых  $\rho_{xy}(B)$  и  $\rho_{xx}(B)$  одним набором параметров. Применимость такого подхода требует наличия вклада только от классического механизма магнетосопротивления (МС), описываемого формулой (9). Однако в большинстве материалов проявляются вклады от нескольких механизмов МС, так, например, амплитуда вклада линейного МС может на порядки превосходить амплитуду вклада классического механизма [5]. Таким образом, учёт данных  $\rho_{xx}(B)$  может заметно увеличить ошибку в получаемых результатах. Поэтому более удобным способом повышения точности аппроксимации холловских данных в рамках двухзонной модели является учёт сопротивления в нулевом поле, которое в случае  $p$ -GaSb записывается в виде

$$\rho_{xx}(B=0) = \frac{1}{e p_{LH} \mu_{LH} (1 + K_n K_\mu)}. \quad (11)$$

Нетрудно видеть, что, используя отношение  $\rho_{xy} / \rho_{xx}(B=0)$ , пропадает зависимость от  $p_{LH}$ , что несколько упрощает процедуру подгонки, не приводя к дополнительным ошибкам. Поэтому в данной работе сначала аппроксимировались кривые  $\rho_{xy} / \rho_{xx}(B=0)$ , а затем полученные параметры использовались для аппроксимации кривых  $\rho_{xy}(B)$  и определения величин  $p_{LH}$ .

Для полупроводников  $A^{III}B^V$  как в случае вырожденной, так и в случае невырожденной статистики, концентрации свободных носителей заряда в зонах лёгких и тяжёлых дырок оказываются пропорциональны друг другу с  $K_n = (m_{HH}^* / m_{LH}^*)^{3/2}$ , где  $m_{HH}^*$  и  $m_{LH}^*$  – эффективные массы тяжёлых и лёгких дырок. Для GaSb соответствующие значения несколько разнятся в литературе [6–9], но в рамках настоящей работы использовалось значение  $1 / \gamma_m = m_{HH}^* / m_{LH}^* = 8$  [10]. Соответственно, можно принять  $K_n \approx 22,6$ , без учёта эффектов непараболичности зон (что оправдано в случае малых плотностей носителей заряда). Поскольку в классических полупроводниках температурная зависимость эффективных масс до-

вольно слабая [11], можно полагать данное значение  $K_n$  постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. В свою очередь, исходя из отношения эффективных масс  $\gamma_m$ , в случае GaSb можно ожидать  $K_\mu \sim \gamma_m = 0,125$  при условии равенства времен релаксации для двух типов дырок. Однако, такое допущение представляется необоснованным, поэтому значение  $K_\mu$  определялось из аппроксимации низкотемпературных данных (рис. 1б), в результате чего среднее значение было принято  $K_\mu = 0,1$ . Данные при комнатной температуре (рис. 1а) почти линейны, в связи с чем независимое определение значения  $K_\mu$  в этом случае оказалось невозможным, поэтому значение  $K_\mu = 0,1$  использовалось во всём рассматриваемом диапазоне температур. Стоит отметить, что фактическое отношение  $K_\mu$  определяется суммой вкладов от различных механизмов рассеяния [12], так, в простейшем случае рассеяние на продольных акустических фонах предполагает  $K_\mu \sim \gamma_m^{5/2} \approx 0,0055$ , а рассеяние на ионизованных атомах примеси –  $K_\mu \sim \gamma_m^{1/2} \approx 0,354$ . Таким образом, более детальный анализ величины  $K_\mu$  и его возможного изменения в более широком диапазоне температур может предоставить ценную информацию об эволюции вкладов разных каналов рассеяния носителей заряда, что, тем не менее, выходит за рамки настоящей работы.

В рамках описанного алгоритма аппроксимации удалось получить хорошее согласие экспериментальных кривых с модельными (показаны красными линиями на рис. 1а–б) во всем диапазоне магнитных полей. Полученные параметры аппроксимаций представлены в таблице 1. Видно, что значения концентраций  $p^*$  и  $p_{LH}$  отличаются почти на порядок величины. По сути, величина  $p^*$ , часто применяемая для характеристики полупроводников  $A^{III}B^V$   $p$ -типа, является некоторой математической абстракцией, поскольку отношение  $p^* / p_{LH}$  существенно зависит от параметров  $\mu_{LH}$ ,  $K_n$  и  $K_\mu$ . Таким образом, величина  $p^*$  может быть использована только как производный параметр при анализе влияния малых

модификаций материала (при сравнении образцов между собой), тогда как более систематическое изучение требует анализа в рамках модели (7–10).

На рис. 1б–г представлены кривые МС для исследуемых образцов, определяемые стандартным способом:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = 100 \% \times \frac{\rho_{xx}(B) - \rho_{xx}(B=0)}{\rho_{xx}(B=0)}. \quad (12)$$

Из рисунка видно, что образцы демонстрируют положительное МС, составляющее примерно 0,52 % при комнатной температуре (рис. 1б), и около 7 % при температуре жидкого азота (рис. 1г). В принципе, наблюдаемое МС указывает на существенную роль классического механизма МС, а увеличение его амплитуды при охлаждении связано с сопутствующим ростом подвижности носителей заряда. В качестве проверки, на основе формул (7–10) были получены модельные кривые МС со значениями параметров, указанных в таблице 1. Соответствующие кривые также представлены на рис. 1б–г. Отчётливо видно, что модельные кривые имеют меньшую амплитуду по сравнению с экспериментальными данными при обеих температурах. Такое расхождение указывает на наличие дополнительных вкладов от других механизмов МС в рассматриваемых образцах.

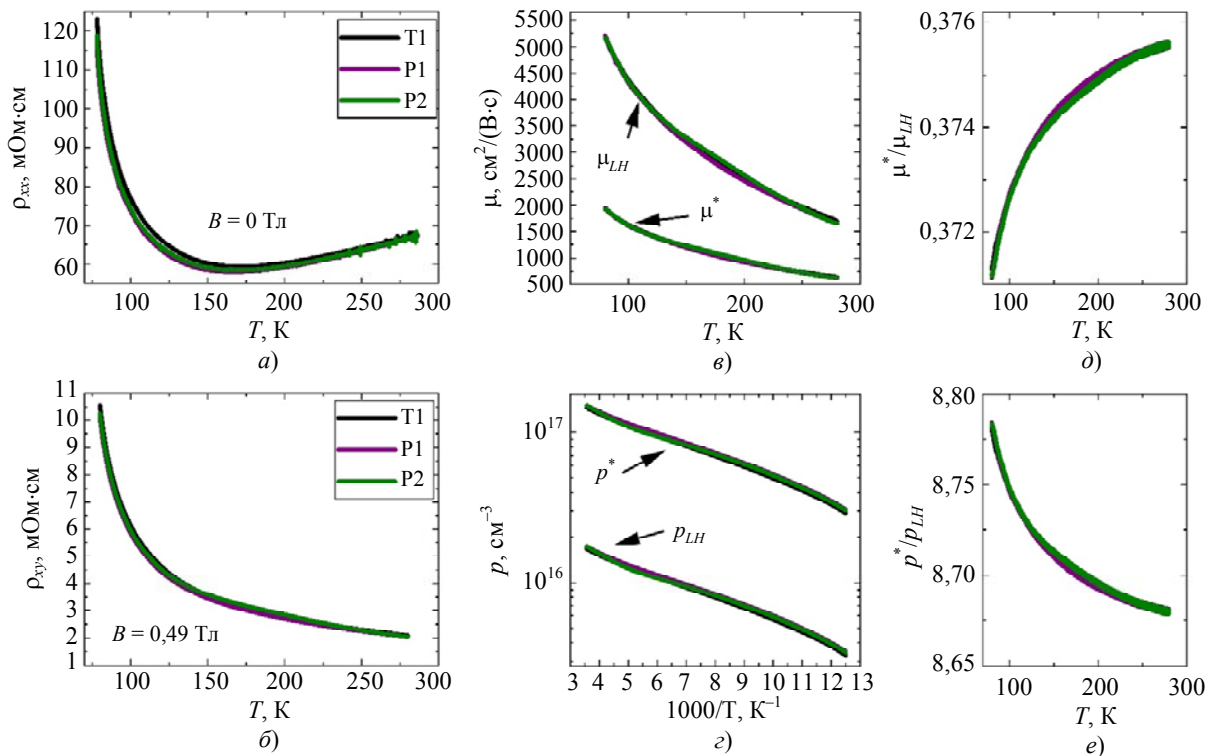
Далее анализировались температурные зависимости компонент тензора сопротивления исследуемых образцов. На рис. 2а представлены зависимости  $\rho_{xx}(T)$  в нулевом магнитном поле. Видно, что ход зависимости оказывается немонотонным, металлический характер при высоких температурах сменяется полупроводниковым ниже примерно 170 К. При дальнейшем охлаждении до 80 К сопротивление возрастает примерно в два раза. Такой характер кривых  $\rho_{xx}(T)$  предполагает наличие конкурирующих вкладов в изменение проводимости системы с температурой. Для их визуализации проводились измерения температурной зависимости эффекта Холла в постоянном магнитном поле. При этом измерялось две кривые при разных полярностях поля, после чего проводилась процедура антисимметризации кривых (для избавления от па-

разитного вклада продольного сопротивления в сигнале, связанного с несимметрией холловских контактов). Результирующие кривые  $\rho_{xy}(T)$  представлены на рис. 2б. Как видно из рисунка, в отличие от кривых  $\rho_{xx}(T)$ , амплитуда эффекта Холла в исследуемых образцах имеет строго монотонную температурную зависимость, указывающую на уменьшение концентрации свободных носителей заряда при охлаждении, что характерно для невырожденного полупроводника.

Аналогично анализу полевых зависимостей, определение температурных зависимостей концентраций и подвижностей дырок может быть выполнено как в рамках однозонной модели (1–2), таким образом были получены кривые  $p^*(T)$  и  $\mu^*(T)$ , так и в рамках двухзонной модели (7–10). Однако, в последнем случае возникает ряд осложнений. В отличие, от анализа кривых  $\rho_{xy}(B)$ , в случае температурных зависимостей невозможно аппроксимировать экспериментальную кривую, не предполагая конкретный вид (модель) температурной зависимости концентраций и подвижностей носителей заряда в обеих зонах (которые можно было бы описывать конечным набором параметров). Технически, для известных систем можно довольно успешно применять общие модели, однако в нашем случае определение вида зависимостей  $\rho_{LH}(T)$  и  $\mu_{LH}(T)$  является объектом анализа. Поэтому, фактически, анализ в рамках двухзонной модели сводится к решению системы уравнений (7, 8, 10) в каждой точке зависимости  $\rho_{xy}(T)$ . Для этого, применяя значения  $K_n$  и  $K_{\mu}$ , использованные при анализе полевых данных, проводилась минимизация модуля разности экспериментальных значений  $\rho_{xy} / \rho_{xy}(B=0)$  и правой части выражения для соответствующей величины (полученным при подстановке (7–8) в (10) и делению на (11)) для каждой точки по температуре (минимизация проводилась стандартными методами в среде Python, в частности – по алгоритму «Nelder-Mead» из библиотеки SciPy). Таким образом, получались кривые  $\mu_{LH}(T)$ , с помощью которых (при известных  $K_n$  и  $K_{\mu}$ ) из данных  $\rho_{xx}(T, B=0)$  рассчитывалась кривая

$p_{LH}(T)$ , а далее рассчитывались кривые для зоны тяжёлых дырок. Тут стоит отметить, что в рамках используемых предположений, по-

следние полностью аналогичны кривым для лёгких дырок (с точностью до постоянного множителя), поэтому не представлены в работе.



**Рис. 2.** Температурные зависимости (а) удельного сопротивления и (б) холловского сопротивления в фиксированном магнитном поле для исследуемых образцов. Температурные зависимости (в) подвижностей и (г) концентраций дырок, рассчитанных в однозонной и двухзонной моделях. Температурные зависимости отношений (д) подвижностей и (е) концентраций дырок, полученных в рамках двух моделей

На рис. 2в представлены температурные зависимости подвижностей дырок, рассчитанные в однозонной и двухзонной моделях. Отчётливо видно, что характер всех зависимостей строго монотонный и соответствует уменьшению подвижности при отогреве, при этом существенного качественного отличия кривых, полученных в разных моделях, не наблюдается. Важно отметить, что последнее может быть отчасти обусловлено выбором величины магнитного поля при измерении  $p_{xy}(T)$ , поскольку как отмечалось выше, в полях до 0,5 Тл зависимости  $p_{xy}(B)$  оказываются практически линейными. Соответственно, при измерении  $p_{xy}(T)$  в больших магнитных полях или до более низких температур (где нелинейность  $p_{xy}(B)$  начнёт проявляться в меньших полях) отличия между однозонной и двухзонной моделями будет проявляться заметно ярче.

Общий вид температурных зависимостей подвижностей дырок на рис. 2в типичен для невырожденных полупроводников и обычно описывается суперпозицией вкладов рассеяния на фонах и ионизированных атомах примеси [13]. Соответственно, увеличение подвижности при охлаждении связывается с уменьшением фоновых чисел заполнения и уменьшением доли ионизированных примесей (за счёт возврата электронов с акцепторного уровня в валентную зону). При этом, в общем случае, дополнительные особенности могут быть связаны с различным типом экранировки потенциала примеси носителями заряда или наличием заметного вклада рассеяния на оптических фонах [14], а также наличием неосновных носителей заряда и сопутствующим электрон-дырочным рассеянием [15].

На рис. 2г представлены кривые  $p_{LH}(T)$  в сравнении с кривыми  $p^*(T)$ , полученными в рамках однозонной модели. Из рис. 2г видно,

что характер зависимостей концентрации также качественно одинаков. При этом, отклонение от линейного характера кривых в представленных координатах предполагает наличие нескольких примесных уровней в исследуемых пластинах (поскольку концентрация собственных носителей заряда в GaSb в рассматриваемом диапазоне температур не превышает  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Таким образом, немонотонный характер исходных кривых  $\rho_{xx}(T)$  определяется монотонными изменениями концентрации и подвижностей носителей заряда с температурой.

Важно отметить, что несмотря на схожесть кривых, полученных в рамках однозонной и двухзонной моделей, более подробный анализ температурных зависимостей отношений  $\mu^*/\mu_{LH}$  и  $p^*/p_{LH}$ , представленных на рис. 2д–е, показывает, что даже в нашем случае значения несколько меняются с температурой, то есть форма кривых оказывается различна. Такое различие может быть гораздо более явным, если коэффициенты  $K_n$  и  $K_p$  меняются с температурой. Поэтому результаты, полученные в рамках однозонной модели, в общем случае, могут не только быть некорректными численно, но и вносить существенное искажение в определяемое изменение транспортных параметров с температурой. Это оказывается критически важным для последующего анализа подобных зависимостей, например, для оценки энергий примесных уровней в системе.

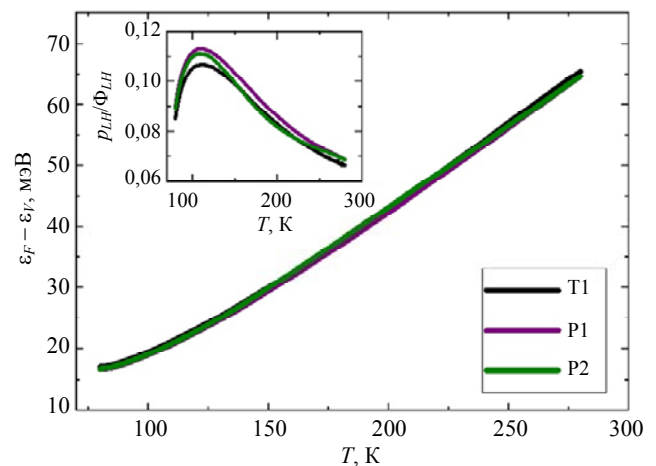
Гораздо более явным ограничением однозонной модели является отсутствие простой связи получаемых значений с реальными параметрами многозонного полупроводника. Так, в частности, для оценки химического потенциала (положения уровня Ферми  $\varepsilon_F$  относительно потолка валентной зоны  $\varepsilon_V$ ) в полупроводнике  $p$ -типа используется стандартное выражение [16]:

$$\varepsilon_F(T) - \varepsilon_V = -kT \cdot \ln(p(T) / \Phi_V(T)), \quad (13)$$

где  $p$  – концентрация свободных дырок, а  $\Phi_V(T)$  – плотность состояний в валентной зоне, рассчитываемая (в единицах  $\text{м}^{-3}$ ) как

$$\Phi_V(T) = 4,83 \cdot 10^{21} \cdot \left( T \frac{m^*}{m_e} \right)^{3/2}, \quad (14)$$

где  $m^*$  – эффективная масса носителей в зоне, а  $m_e$  – масса свободного электрона. Соответственно, при использовании данных  $p^*(T)$ , полученных в однозонной модели, величина  $m^*$  теряет смысл эффективной массы и становится «калибровочной» константой, то есть параметром подгонки, и не может быть оценена независимо, без привлечения двухзонной модели. В свою очередь, для кривых  $p_{LH}(T)$  такой проблемы не возникает, поскольку в этом случае можно использовать табличное значение  $m_{LH}^* = 0,05m_e$  [7, 8, 10]. Результат соответствующего расчёта приведён на рис. 3, а на вставке показано изменение показателя вырождения  $p_{LH}(T) / \Phi_{LH}(T)$  с температурой. Для исследуемых образцов отношение  $p_{LH}(T) / \Phi_{LH}(T)$  не превышает 0,12, подтверждая применимость невырожденной статистики для описания исследуемых пластин (классический критерий  $\leq 0,15$  [16]). В свою очередь, химический потенциал (рис. 3) при отогреве смещается в сторону центра запрещённой зоны, что характерно для примесного полупроводника.



**Рис. 3. Температурная зависимость положения химического потенциала, отсчитанного от потолка валентной зоны для исследуемых образцов. На вставке показано изменения показателя вырождения  $p_{LH}(T) / \Phi_{LH}(T)$  с температурой**

### Заключение

В работе проведено исследование магнито-транспортных свойств коммерчески доступных пластин  $p$ -GaSb. Показано, что температурная зависимость сопротивления образцов оказывается немонотонной, но формируется монотонными изменениями транспортных параметров. Анализ эффекта Холла проводился как в рамках стандартной однозонной модели, так и при учёте наличия зон лёгких и тяжелых дырок. Описан алгоритм обработки данных в рамках двухзонной модели. Показано, что значения концентраций и подвижностей дырок, полученные в двух моделях, существенно различны, а коэффициент пропорциональности между соответствующими результатами зависит от ряда параметров системы и не может быть посчитан независимо. Из температурной зависимости концентрации носителей заряда, рассчитанной в рамках двухзонной модели, определено изменение химического потенциала с температурой. Поскольку положение химического потенциала подложки определяет изгиб зон для выращиваемого на ней слоя, полученные значения  $\varepsilon_F(T)$  могут быть использованы для дальнейшего проектирования гетероструктур, создаваемых на основе  $\text{epi-ready}$  подложек  $p$ -GaSb, изготовленных Ram Xiamen (Китай).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jia C., Deng G., Liu L., Zhao P., Song G., Liu J., Zhang Y. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. Vol. 56. P. 433001.
2. Rogalski A., Kopytko M., Hu W., Martyniuk P. / Sensors 2023. Vol. 23. № 17. P. 7564.
3. Roh Y. T., Kim B.-H., Kim Y. H., Jung H. / SPIE Proc. (Infr. Tech. Appl. LI). 2025. Vol. 13469. P. 182–187.
4. Rogalski A. / Rep. Prog. Phys. 2022. Vol. 85. P. 126501.
5. Oveshnikov L. N., Ril' A. I., Mekhiya A. B., Davydov A. B., Marenkin S. F., Aronzon B. A. / EPJ Plus. 2022. Vol. 137. P. 374.
6. Walton A. K., Mishra U. K. / J. Phys. C: Solid State Phys. 1968. Vol. 1. № 2. P. 533–538.
7. Heller M. W., Hamerly R. G. / J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. № 10. P. 4626–4632.
8. Dutta P. S., Bhat H. L., Kumar V. / J. Appl. Phys. 1997. Vol. 81. № 9. P. 5821–5870.
9. Kim Y.-S., Marsman M., Kresse G., Tran F., Blaha P. / Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 205212.
10. [https://www.matprop.ru/GaSb\\_bandstr](https://www.matprop.ru/GaSb_bandstr)
11. Cavassilas N., Autran J.-L., Aniel F., Fishman G. / J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. № 3. P. 1431–1433.
12. Смут П. Полупроводники. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962.
13. Micocci G., Tepore A., Rella R., Siciliano P. / J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. № 8. P. 3982–3986.
14. Donmez O., Erol A., Cetinkaya C., Cokduygular E., Aydin M., Yildirim S., Puustein J., Hilska J., Guina M. / Semicond. Sci. Techn. 2021. Vol. 36. P. 115017.
15. Klaassen D. B. M. / Solid-State Electr. 1992. Vol. 35. № 7. P. 961–967.
16. Блейкмор Дж. Физика твёрдого тела. – М.: Мир, 1988.

PACS: 72.80.Ey, 72.20.My

## Determination of light and heavy hole parameters in $p$ -GaSb single crystals on the basis of complex analysis of the Hall effect

L. N. Oveshnikov<sup>1\*</sup>, A. B. Davydov<sup>1</sup>, M. A. Chernopicskiy<sup>1</sup>, A. A. Fel'de<sup>1</sup>, I. I. Minaev<sup>1</sup>, A. V. Klekovkin<sup>1</sup>, and V. S. Krivobok<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

\* E-mail: oveshnikovLN@lebedev.ru

<sup>2</sup> RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 20.02.2026; revised 7.04.2026; accepted 5.06.2026

*In this work we present the results of measurements of electrophysical parameters of commercially available single-crystal  $p$ -GaSb substrates in the temperature range of 80–300 K. We perform comparative analysis of temperature and field dependences of Hall resistivity with and without taking into account the degeneracy of the valence band. The limitations of applicability of the standard model, which assumes the existence of only one type of holes, for describing*

*transport properties of p-GaSb are shown. It is shown that non-monotonic temperature dependence of substrates resistivity arises due to monotonic change of carrier concentrations and mobilities. Basing on the results of the analysis using model, which takes into account contributions of light and heavy holes, we estimated the variation of the chemical potential in substrate material with temperature. The obtained results are necessary for further design of photosensitive heterostructures, obtained using studied substrates.*

*Keywords:* gallium antimonide, p-type conductivity, semiconductor substrates, Hall effect, magnetoresistance, multi-band semiconductors.

## REFERENCES

1. Jia C., Deng G., Liu L., Zhao P., Song G., Liu J., and Zhang Y., J. Phys. D: Appl. Phys. **56**, 433001 (2023).
2. Rogalski A., Kopytko M., Hu W., and Martyniuk P., Sensors **23** (17), 7564 (2023).
3. Roh Y. T., Kim B.-H., Kim Y. H., and Jung H., SPIE Proc. (Infr. Tech. Appl. LI) **13469**, 182–187 (2025).
4. Rogalski A., Rep. Prog. Phys. **85**, 126501 (2022).
5. Oveshnikov L. N., Ril' A. I., Mekhiya A. B., Davydov A. B., Marenkin S. F., and Aronzon B. A., EPJ Plus. **137**, 374 (2022).
6. Walton A. K. and Mishra U. K., J. Phys. C: Solid State Phys. **1** (2), 533–538 (1968).
7. Heller M. W. and Hamerly R. G., J. Appl. Phys. **57** (10), 4626–4632 (1985).
8. Dutta P. S., Bhat H. L., and Kumar V., J. Appl. Phys. **81** (9), 5821–5870 (1997).
9. Kim Y.-S., Marsman M., Kresse G., Tran F., and Blaha P., Phys. Rev. B **82**, 205212 (2010).
10. [https://www.matprop.ru/GaSb\\_bandstr](https://www.matprop.ru/GaSb_bandstr)
11. Cavassilas N., Autran J.-L., Aniel F., and Fishman G., J. Appl. Phys. **92** (3), 1431–1433 (2002).
12. Smith R. A. Semiconductors. Cambridge University Press, 1959; Moscow, Izdatel'stvo innostrannoi literatury, 1962.
13. Micocci G., Tepore A., Rella R., and Siciliano P., J. Appl. Phys. **75** (8), 3982–3986 (1994).
14. Donmez O., Erol A., Cetinkaya C., Cokduygular E., Aydin M., Yildirim S., Puustein J., Hilska J., and Guina M., Semicond. Sci. Techn. **36**, 115017 (2021).
15. Klaassen D. B. M., Solid-State Electr. **35** (7), 961–967 (1992).
16. Blakemore J. S. Solid State Physics. Cambridge University Press, 1985; Moscow, Mir, 1988.

## Об авторах

**Овешников Леонид Николаевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: oveshnikovLN@lebedev.ru SPIN-код: 8314-3363, AuthorID: 818982, Scopus AuthorID: 55332315400

**Давыдов Александр Борисович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: davydovAB@lebedev.ru SPIN-код: 3401-9509, AuthorID: 30935, Scopus AuthorID: 7201949230

**Чернопицкий Максим Александрович**, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: chernopicskiyMA@lebedev.ru SPIN-код: 6529-1510, AuthorID: 1219510, Scopus AuthorID: 57202729169

**Фельде Анастасия Александровна**, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: a.felde@lebedev.ru SPIN-код: 7964-8681, AuthorID: 1173463, Scopus AuthorID: 59909511400

**Минаев Илья Иванович**, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: i.minaev@lebedev.ru ORCID: 0009-0007-0410-4033, Scopus AuthorID: 57226567016

**Клековкин Алексей Владимирович**, младший научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53). E-mail: klekovkinAV@lebedev.ru SPIN-код: 2137-8228, AuthorID: 818286, Scopus AuthorID: 56471867800

**Кривобок Владимир Святославович**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 53); ведущий научный сотрудник, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: krivobok@lebedev.ru AuthorID: 135304, Scopus AuthorID: 8604415500

УДК 53.09; 53.043  
EDN: RZSGXS

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

## Удержание микрочастиц в квадрупольной ловушке с прямоугольной формой напряжения в условиях атмосферного давления

© М. С. Доброклонская\*, Л. М. Василяк, В. И. Владимиров, В. Я. Печеркин

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия**\*E-mail: m.dobro42@gmail.com**Статья поступила в редакцию 22.04.2026; после доработки 15.05.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.9*

*Численно рассчитаны и экспериментально подтверждены области удержания заряженных микрочастиц диаметром 5–50 мкм в линейной квадрупольной ловушке, работающей в воздухе при атмосферном давлении с импульсным знакопеременным прямоугольным напряжением. Установлено влияние амплитуды напряжения, его частоты и асимметрии прямоугольных импульсов на положение и ширину областей удержания, которые зависят от диаметра частиц. Обнаружено, что в ловушке с синусоидальным напряжением можно переключать траектории частиц между устойчивым и неустойчивым режимами с помощью дополнительных прямоугольных импульсов внешнего знакопеременного электрического поля путем изменения его частоты. Экспериментально изучена возможность захвата и удержания микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах.*

*Ключевые слова:* линейная квадрупольная ловушка, импульсно-периодическое напряжение, заряженные микрочастицы, воздух, атмосферное давление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-41-46

### Введение

Линейные электродинамические ловушки с синусоидальным удерживающим напряжением используются для разных задач: исследования свойств как отдельных частиц, так и кулоновских структур, определение размеров и заряда частиц по их траекториям в квадрупольном поле и др. [1–4]. По своей конструкции линейная квадрупольная ловушка близка к масс-спектрометрам и масс-фильтрам, для улучшения возможностей которых в последнее время исследуются возможности применения прямоугольной формы (часто называют цифровой) фильтрующего напряжения [5–13]. Наши исследования показали [14–16], что прямоугольная форма напряжения имеет ряд преимуществ для удержания заряженных частиц микронного размера в

квадрупольных линейных ловушках в воздухе при атмосферном давлении. Для прямоугольного напряжения теоретические исследования областей устойчивости фильтров [5–12] и ловушек ионов [13] выполнены для вакуумных условий, где динамика частиц зависит только от отношения заряда к массе  $Q/m$ , т.е. выполняется закон подобия. На удержание заряженных частиц микронных размеров в ловушке в воздухе при атмосферном давлении существенное влияние оказывают силы гравитации и вязкого трения, поэтому расчёты областей удержания, полученные для вакуума, неприменимы, и требуются расчёты с учетом сил гравитации и вязкого трения для каждого размера частиц. Целью работы являлись расчёты областей удержания для частиц различных размеров (5–50 мкм) для асимметричных импульсов

напряжения разной частоты, экспериментальные исследования и выяснение влияния на удержания внешнего электрического поля и плазмы коронного разряда.

### Экспериментальная установка и расчетная модель

Схема эксперимента аналогична приведенной в [14–16]. Линейные цилиндрические электроды ловушки диаметром 4 мм и длиной 10 см закреплены в вершинах квадрата со стороной 2 см. К линейным электродам прикладывается импульсно-периодическое знакопеременное напряжение прямоугольной формы частотой 50 и 100 Гц и регулируемой амплитудой  $V$  до 10 кВ. Для импульсов асимметричной формы принято, что отношение длительности импульса положительной полярности к длительности периода следования импульсов называется коэффициентом заполнения импульсов положительной полярности  $K_p$ . Влияние плазмы коронного разряда исследовалось в квадрупольной ловушке с тонкими электродами длиной 110 мм и диаметрами 63, 120 и 200 мкм, расположенными на расстоянии 1 см. Использовались диэлектрические полидисперсные частицы  $Al_2O_3$  с размерами 1–80 мкм. Зарядка микрочастиц производилась индукционным способом на металлической пластинке с постоянным потенциалом 5–7 кВ.

Поскольку нахождение областей удержания для таких условий путем аналитического исследования уравнений является сложной задачей, то использовался численный метод, основанный на расчетах устойчивых и неустойчивых траекторий частиц. Физические параметры модели были выбраны в соответствии с экспериментами. Расчетная схема подробно описана в [15, 16] и заключалась в решении уравнения Ланжевена с учетом силы гравитации и силы трения по формуле Стокса  $F_f = -6\pi\mu r v$ , где  $r$  – радиус частицы,  $\mu$  – вязкость воздуха,  $v$  – скорость частицы. Начальное положение частицы в ловушке – на 350 мкм ниже центра потенциальной ямы ловушки, начальная скорость частицы нулевая. Расчет проведен для частиц размерами 5, 10, 20, 50 мкм в воздухе при атмосферном давлении для разных форм сигнала напряжения на электродах (синусоидальной и прямоугольной).

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны области удержания (расчет) в координатах «амплитуда напряжения – заряд частицы» для синусоидального и прямоугольного (меандр) напряжения при частоте 50 Гц для частиц размером 50 и 20 мкм. Области расширяются при снижении напряжения. На нижней границе сил электрического поля ловушки недостаточно для компенсации силы гравитации и частица падает вниз из ловушки. На верхней границе электрические силы столь велики, что частицы вылетают из ловушки. Для частиц 50 мкм области для синусоидального (1) и прямоугольного (2) напряжения близки по размеру, но область 2 смещена в сторону уменьшения заряда, что согласуется с ранее полученным экспериментальным результатом [14], где заряженная частица удерживалась при меньшей амплитуде прямоугольного напряжения. Поскольку в случае прямоугольного потенциала электрическое поле с амплитудным значением действует значительно более длительное время, чем при синусоиде, то частицы удерживаются при меньшей амплитуде напряжения. По этой же причине на верхней границе частицы вылетают из ловушки при меньшей амплитуде напряжения, а в результате вся область удержания смещается влево и вниз. Область удержания 3 для частиц с размерами 20 мкм сдвинута в область ещё меньших зарядов по сравнению с областью 2 для частиц 50 мкм. С уменьшением диаметра уменьшается сила гравитации и вязкое трение, поэтому частица легче удерживается при малом заряде.

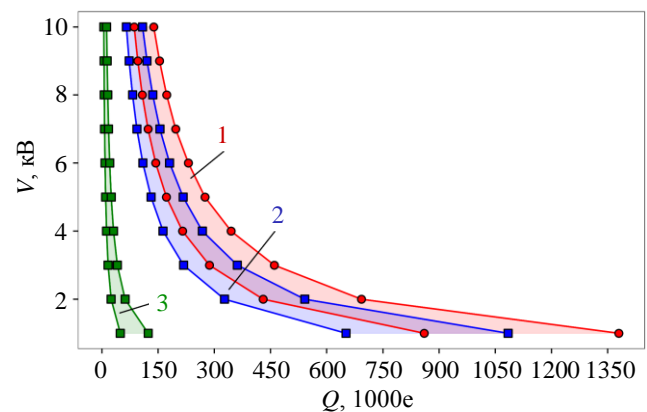


Рис. 1. Области удержания частиц для разных форм напряжения при частоте 50 Гц (расчет): 1 (красная) – синусоидальное, 50 мкм; 2 (синяя) – прямоугольное (меандр,  $K_p = 50\%$ ), 50 мкм; 3 (зеленая) – прямоугольное, 20 мкм

На рисунке 2 показаны области удержания (расчет) для частиц 50 мкм для меандра при частотах 50 Гц (2, синяя) и 100 Гц (1, красная). При повышении частоты до 100 Гц область удержания 1 сместилась в сторону более высоких зарядов частиц настолько далеко, что области 1 и 2 не пересекаются. Следовательно, частицы, которые удерживаются в ловушке при частоте 50 Гц, не будут удерживаться при повышении частоты до 100 Гц. Этот факт был проверен экспериментально. В ловушке при амплитуде напряжения 4 кВ (меандр) и частоте 50 Гц удерживалось облако из большого количества частиц. При увеличении частоты с шагом 20 Гц количество частиц постепенно уменьшалось, и при 100 Гц в ловушке не осталось ни одной частицы.

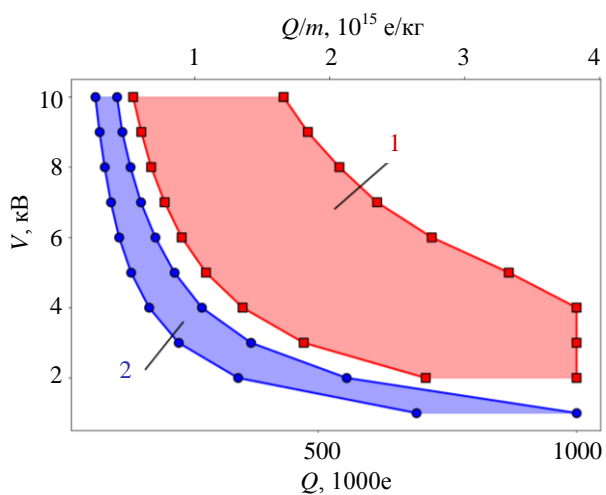


Рис. 2. Области удержания частиц диаметром 50 мкм для меандра. 1 (красная) – частота 100 Гц; 2 (синяя) – 50 Гц

Для синусоидального удерживающего напряжения амплитудой 5 кВ, частотой 50 Гц и для напряжения на зарядной пластине 2,5 кВ в эксперименте удерживаются частицы от 2 до 60 мкм, среднее значение – 26 мкм. Оценка физически возможного заряда для частиц 20 мкм (15 625–195 312 e) на 100 % перекрывает расчетную область удержания (12 600–32 800 e). Для частиц 5 мкм пересечение составляет 87 % (976–12 207 e против 2 600–9 300 e), для 50 мкм – около 30 % (97 656–1 220 703 e против 178 100–278 100 e). Поскольку в распределении исходной смеси изначально мало частиц – меньше 10 мкм и больше 40 мкм, то полученное в эксперименте распределение частиц по размеру аналогично распределению частиц в исходной смеси.

Таким образом, эксперимент подтверждает расчёт.

На рис. 3 для частиц 20 мкм при частоте 50 Гц показано влияние заполнения положительной полуволны  $K_p$  на области удержания (расчет). Удержание возможно при  $K_p = 50\%$ , 40%, 35% за счет баланса сил. При  $K_p = 40\%$  область 2 лежит внутри области 1 ( $K_p = 50\%$ ) и сдвинута вправо в область более высоких зарядов; при  $K_p = 35\%$  область 3 стала еще более узкой и сдвинулась еще правее, выйдя за границу области 1. Следовательно, с увеличением асимметрии импульсов диапазон устойчивых зарядов сужается. Для частиц 5 и 50 мкм удержание возможно только при  $K_p = 50\%$  (меандр). Лёгкие частицы (5 мкм) при асимметричных импульсах сильнее смещаются и притягиваются к электродам, а крупные (50 мкм) из-за инерционности не успевают вернуться за время короткой полуволны. Частицы 10 мкм удерживаются при  $K_p = 50\%$  и 40%. Экспериментальные данные по осаждению захваченных частиц качественно согласуются с расчётом.

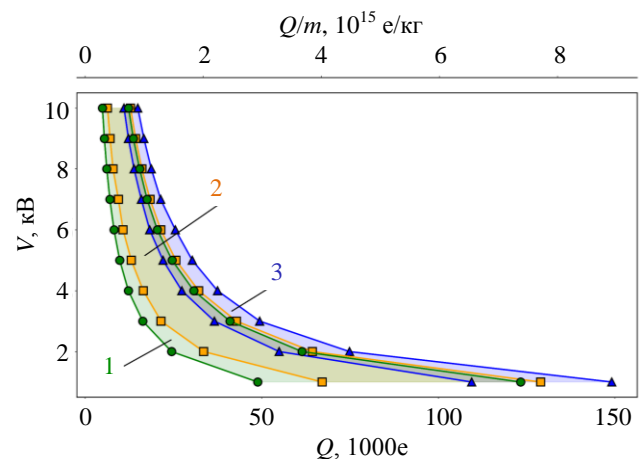
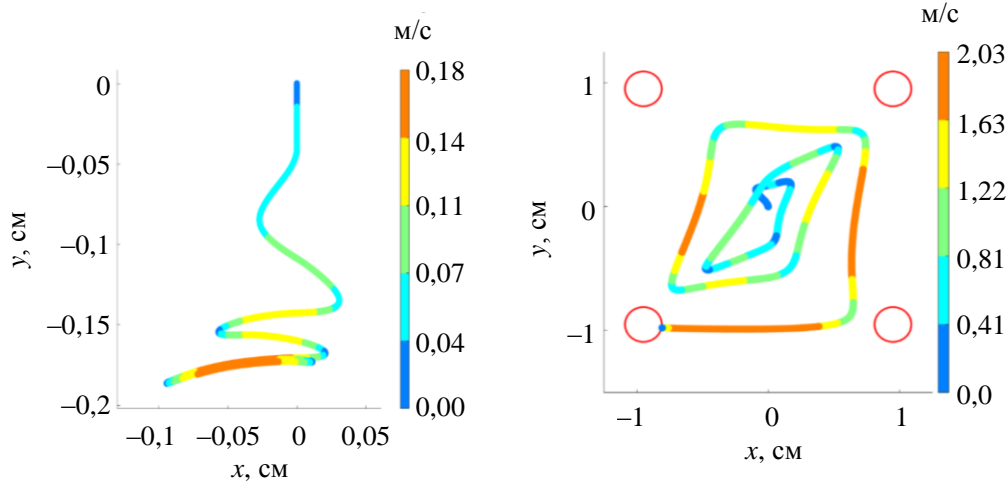


Рис. 3. Области удержания микрочастиц диаметром 20 мкм при частоте 50 Гц для различных значений заполнения положительного импульса  $K_p$ : 1 – меандр  $K_p = 50\%$  (зеленая область); 2 – 40% (оранжевая); 3 – 35% (синяя)

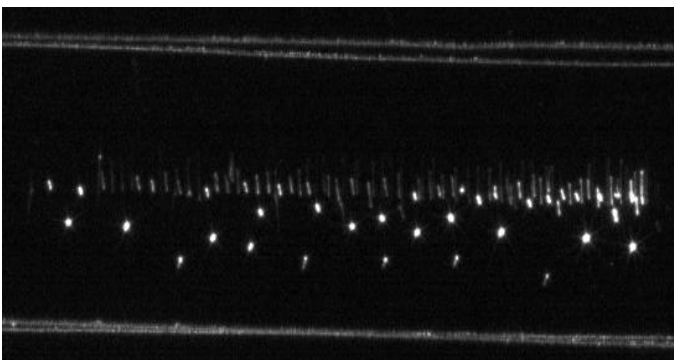
Экспериментально и численно исследовано воздействие внешнего импульсно-периодического знакопеременного электрического поля, частота которого менялась в диапазоне 20–170 Гц, на траектории частиц в ловушке при синусоидальном удерживающем напряжении (5–7 кВ, 50 Гц). Внешнее электрическое поле создавали две металлические

пластины, размещенные на расстояниях 2 см от электродов ловушки, на которые подавалось импульсное напряжение (3–5 кВ) в форме меандра. Обнаружено, что как в расчетах, так и экспериментально – внешнее электрическое поле раскачивает две различные неустойчивости: вылет частиц при частоте 27 Гц и выпадение при 200 Гц. При 125 Гц наблюдается стабилизация траекторий, уменьшение осцилляций частиц и уменьшение расстояния между частицами. Результаты расчета согласуются с расчётами. На рис. 4 приведены рассчитанные траектории: слева показана устойчивая траектория без внешнего электрического поля, справа – при частоте внешнего поля 27 Гц происходит раскачка неустойчивости, размах траектории увеличивается с каждым колебанием, частица вылетает из ловушки.

Влияние плазмы на удержание частиц было исследовано в квадрупольной ловушке с электродами диаметром 63, 120 и 200 мкм, длиной 11 см и расстоянием между электродами 1 см. Пороговое напряжение зажигания: 2,6 кВ для 63 и 120 мкм, 4,0 кВ для 200 мкм. С электродами 63 и 120 мкм захватывались частицы размером 2–8 мкм, для 200 мкм – 40–60 мкм. Устойчивое удержание частиц – при токах коронного разряда 15–70 мкА. На рис. 5 приведено изображение удерживаемых частиц в ловушке с диаметром электродов 63 мкм с прямоугольными импульсами напряжения (меандр) амплитудой 3,2 кВ, частотой 50 Гц и токе коронного разряда 30 мкА. Количество удерживаемых частиц при напряжении в форме меандра намного больше, чем при синусоидальном напряжении той же амплитуды.



**Рис. 4.** Слева: устойчивая траектория без внешнего электрического поля.  
Справа: траектория вылета частицы из ловушки при частоте внешнего поля 27 Гц.  
Цветом показаны скорости частиц. Частица: заряд 98 000 е, диаметр 20 мкм.  
Прямоугольное напряжение (меандр) на пластинах:  $V = 5$  кВ.  
Удерживающее синусоидальное напряжение на электродах ловушки  $V = 7$  кВ, 50 Гц



**Рис. 5.** Фото захваченных микрочастиц ловушкой с плазмой коронного разряда

## Заключение

Экспериментальные и численные исследования показали, что области удержания зависят от размеров частиц, и закон подобия отношения заряда к массе не выполняется. Такое отличие позволяет селективно влиять на частицы определенного размера. Установлено, что форма удерживающего напряжения существенно влияет на области устойчивости. Прямоугольное удерживающее напряжение (меандр) позволяет удерживать частицы с меньшим зарядом, чем синусоидальное, благодаря более длительному воздействию электрического поля с амплитудным значением. Увеличение частоты удерживающего напряжения смещает и расширяет области удержания в сторону более высоких напряжений и зарядов, что позволяет селективно отсеивать частицы. Для асимметричных импульсов прямоугольного напряжения при уменьшении коэффициента заполнения  $K_p$  область удержания сужается и сдвигает её в область более высоких зарядов, давая возможность избирательно удерживать или отсеивать частицы разного размера. Внешнее электрическое поле в виде меандра позволяет управлять динамикой частиц в ловушке с синусоидальным удерживающим напряжением: изменяя частоту внешнего электрического поля можно вызвать выпадение частиц или раскачку неустойчивости и вылет частиц из ловушки. Существует область частот, при которых внешнее электрическое поле стабилизировало неустойчивые траектории частиц в ловушке, уменьшая при этом размах колебаний и расстояние между частицами. Экспериментально обнаружено, что в квадрупольной линейной ловушке с плазмой коронного разряда с прямоугольным напряжением в форме меандра удерживается намного больше частиц, чем при синусоидальном напряжении, причем в узкой области токов коронного разряда, а размер удержива-

емых частиц зависит от диаметра коронирующих электродов.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (Государственное задание  
№ 075-00270-26-00).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1–103.
2. Rybin V. V., Rudy S. S., Kokorina O. / JVE. 2020. Vol. 32. P. 156–159.
3. Rudy S. S., Vasilyev M., Rybin V. V., Rozhdestvensky Yu. V. / Int. J. Mass Spectrom. 2022. Vol. 479. P. 116894.
4. Rybin V. V., Rudy S. S., Rozhdestvensky Yu. V. / Int. J. Non-Linear Mech. 2022. Vol. 147. P. 104227. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227>
5. Reilly P. T. A., Chakravorty S., Bailey C. F., Obe F. O., Huntley A. P. / J. Am. Soc. Mass Spectrom. 2021. Vol. 32. № 10. P. 2615.
6. Simke F., Fischer P., Marx G., Schweikhard L. / Int. J. Mass Spectrom. 2021. Vol. 473. P. e116779.
7. Ivanov A. I., Sysoev A. A., Konenkov N. V. / Eur. J. Mass Spectrom. 2024. Vol. 30. № 3–4. P. 143.
8. Ivanov A. I., Sysoev A. A., Konenkov A. N., Konenkov N. V. / J. Mass Spectrom. 2024. Vol. 59. № 6. P. e5030.
9. Шеретов Э. П., Терентьев В. И. / ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 953.
10. Richards J. A., Huey R. M., Hiller J. / Int. J. Mass Spectrom. 1973. Vol. 12. P. 317.
11. Ding L., Sudakov M., Kumashiro S. / Int. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 221. P. 117.
12. Sudakov M., Nikolaev E. / Eur. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 8. P. 191.
13. Ding Li, Sun Lulu, Wang Weimin / Mass Spectrometry Reviews. 2026. P. 336. <https://doi.org/10.1002/mas.70022>
14. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29–34.
15. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 93–98.
16. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. / Вестник Объединенного института высоких температур. 2024. Т. 15. С. 44–48.

## Confinement of microparticles in a quadrupole trap with rectangular voltage at atmospheric pressure

M. S. Dobroklonskaya\*, L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, and V. Ya. Pecherkin

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\*E-mail: m.dobro42@gmail.com

Received 22.04.2026; revised 15.05.2026; accepted 5.06.2026

*The areas of confinement of charged microparticles with a diameter of 5–50 microns in a linear quadrupole trap with a pulsed alternating rectangular voltage in air at atmospheric pressure have been numerically calculated and experimentally confirmed. The influence of the voltage amplitude, its frequency, and the asymmetry of rectangular pulses on the position and width of the retention areas has been established. It is confirmed that the retention areas depend on the particle diameter. It has been found that in a trap with a sinusoidal voltage, it is possible to stabilize the trajectories of a particle or make them unstable by using additional rectangular pulses of an external alternating electric field by changing its frequency. The possibility of capturing and retaining microparticles in a quadrupole trap with a corona discharge on electrodes has been experimentally investigated.*

**Keywords:** linear quadrupole trap, pulse-periodic voltage, charged microparticles, air, atmospheric pressure.

### REFERENCES

1. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., and Vasilyak L. M., Phys. Rep. **1016**, 1–103 (2023).
2. Rybin V. V., Rudy S. S., and Kokorina O., JVE **32**, 156–159 (2020).
3. Rudy S. S., Vasilyev M., Rybin V. V., and Rozhdestvensky Yu. V., Int. J. Mass Spectrom. **479**, 116894 (2022).
4. Rybin V. V., Rudy S. S., and Rozhdestvensky Yu. V., Int. J. Non-Linear Mech. **147**, 104227 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227>
5. Reilly P. T. A., Chakravorty S., Bailey C. F., Obe F. O., and Huntley A. P., J. Am. Soc. Mass Spectrom. **32** (10), 2615 (2021).
6. Simke F., Fischer P., Marx G., and Schweikhard L., Int. J. Mass Spectrom. **473**, e116779 (2021).
7. Ivanov A. I., Sysyoev A. A., and Konenkov N. V., Eur. J. Mass Spectrom. **30** (3–4), 143 (2024).
8. Ivanov A. I., Sysyoev A. A., Konenkov A. N., and Konenkov N. V., J. Mass Spectrom. **59** (6), e5030 (2024).
9. Sheretov E. P. and Terentev V. I., Technical Physics **42**, 953 (1972) [in Russian].
10. Richards J. A., Huey R. M., and Hiller J., Int. J. Mass Spectrom. **12**, 317 (1973).
11. Ding L., Sudakov M., and Kumashiro S., Int. J. Mass Spectrom. **221**, 117 (2002).
12. Sudakov M. and Nikolaev E., Eur. J. Mass Spectrom. **8**, 191 (2002).
13. Ding Li, Sun Lulu, and Wang Weimin, Mass Spectrometry Reviews **336** (2026). <https://doi.org/10.1002/mas.70022>
14. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 2, 29–34 (2023) [in Russian].
15. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 3, 93–98 (2024) [in Russian].
16. Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. V., and Vasilyak L. M., Herald of the Joint Institute for High Temperatures **15**, 44–48 (2024) [in Russian].

### Об авторах

**Доброклонская Марина Сергеевна**, аспирант, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: m.dobro42@gmail.com SPIN-код: 5232-9283, AuthorID: 1175259

**Василяк Леонид Михайлович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus ID 7004886755

**Владимиров Владимир Иванович**, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vid@ihed.ras.ru SPIN-код: 4150-6689, AuthorID: 26958

**Печеркин Владимир Яковлевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpecherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, AuthorID: 1089774, ORCID 0000-0001-7470-5132, Scopus ID 6507468054

УДК 533.9.07, 66.092-977  
EDN: ZAURDX

PACS: 52.75.Hn, 82.30.Lp

## Пароводяная конверсия метана с использованием плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности

© С. Г. Ребров\*, В. В. Кошлаков, А. Н. Голиков, И. А. Федоров,  
В. А. Голубев, Д. А. Гоза

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438 Россия

\*E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9.02.2026; после доработки 26.02.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.9

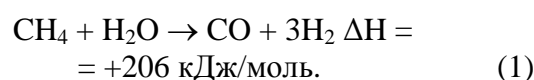
*Представлены результаты исследования пароводяной конверсии метана с использованием трехфазного плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности, в котором метан служит рабочим газом. Режим предусматривал одновременную подачу метана в дуговые каналы, а воды – в камеру плазмотрона. Выявлена двухстадийная схема превращений: на первой стадии происходит пиролиз метана в дуговых каналах; на второй — пароводяная конверсия продуктов пиролиза при контакте с водой в камере. Получены экспериментальные данные о влиянии соотношения расходов метана и воды на концентрацию продуктов пиролиза. Режимы работы плазмотрона в ходе исследований варьировались в следующих диапазонах: дуговая мощность – от 1,32 до 1,61 МВт, расход метана – от 43 до 57,5 г/с, расход воды – от 0 до 67 г/с.*

*Ключевые слова:* плазмотрон, электрическая дуга, получение водорода, пиролиз метана, конверсия метана, синтез-газ.

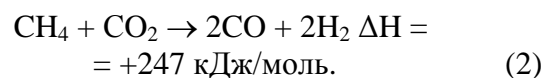
DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-47-53

### Введение

Пароводяная конверсия метана является одним из методов получения синтез-газа, который является промежуточным сырьем во многих химических технологиях. Существует несколько методов его получения из природного газа: паровая каталитическая конверсия, CO<sub>2</sub> конверсия и парциальное окисление [1–3]. При паровой конверсии метан вступает в реакцию с водяным паром под давлением 0,3–2,5 МПа в присутствии катализатора с образованием синтез-газа. Реакция (1) является эндотермической, энергия, необходимая для осуществления реакции, должна быть получена из внешнего источника. В настоящее время паровой риформинг метана является основным промышленным методом получения водорода:



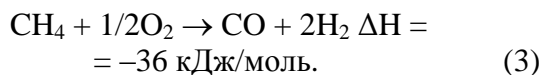
При CO<sub>2</sub> конверсии метан вступает в реакцию с диоксидом углерода, образуя синтез-газ с повышенным содержанием монооксида углерода. Этот метод в последнее время вызвал значительный интерес благодаря одновременному использованию и сокращению выбросов двух распространенных и нежелательных парниковых газов CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>.



В результате этого процесса образуется синтез-газ с молярным соотношением H<sub>2</sub>/CO, близким к 1, что наиболее подходит для дальнейшего синтеза методом Фишера-Тропша.

Обе реакции (1) и (2) являются сильно эндотермическими, требующими подвода энергии.

Парциальное окисление метана также является привлекательным альтернативным методом получения синтез-газа (3). Реакция является экзотермической, снижающей энергозатраты на процесс риформинга.



Рассмотренные выше неплазменные технологии обладают ограничениями, связанными с необходимостью использования катализаторов, которые в ходе процесса постепенно дезактивируются при высоких температурах из-за агломерации и осаждения углерода.

В отличие от указанных традиционных технологий плазменный риформинг обладает рядом важных преимуществ – в частности, высоким качеством получаемого газа и простотой контроля его состава, компактностью, быстрым временем отклика, совместимостью с широким спектром углеводородов и устранением проблем с катализаторами. Более того, плазменные технологии являются экологически чистыми процессами, поскольку они не выделяют парниковых газов.

Плазменные технологии основаны на использовании неравновесной плазмы, либо на термической плазме. В качестве неравновесной плазмы используются коронный разряд [4], микроволновый разряд [5], скользящие дуги [6], барьерный разряд [7], тлеющий разряд [8]. В этом случае образуются активные частицы, участвующие в химическом механизме, однако обрыв цепи химического процесса на эндотермических стадиях крайне вероятен. Поэтому данные методы очень энергозатратны и могут использоваться только совместно с катализаторами.

В устройствах большей производительности используется термическая плазма диоксида углерода [9, 10] и водяного пара [11]. В этом случае степень превращения и селективности определяются температурой процесса. Заметное превращение метана под действием водяного пара и углекислого газа наступает при высоких температурах (выше 1100 °C) [12]. При этом более высокие температуры приводят к повышению селективности

по ацетилену. Экономические особенности данного метода определяются сроком службы электродного блока, производительностью и эффективностью использования электрической энергии [13].

### Условия проведения экспериментов и их анализ

В настоящей работе в качестве источника плазменного нагрева метана и воды использовался плазмотрон переменного тока «Звезда» мегаваттной мощности (рис. 1). Конструктивные особенности плазмотрона и описание работы на различных газах приведено в работах [14–19]. В данной работе подача метана осуществлялась в дуговые каналы (электроды), поз. 1 на рис. 1, а вода подавалась в камеру плазмотрона, поз. 2 на рис. 1. Для работы на метане и использования плазмотрона в плазмохимических технологиях конструкция плазмотрона была доработана с целью избежать отрицательных эффектов, связанных с возможностью осаждения углерода в области изоляторов и мест вдува метана в дуговые каналы [20–22]. К камере, поз. 2 на рис. 1, через сопло, поз. 7 на рис. 1, пристыкован насадок, поз. 8 на рис. 1, предназначенный для увеличения времени пребывания продуктов пиролиза, в конце насадка производится отбор газа для хроматографического анализа по каналу, поз. 10 на рис. 1. Измерение газового состава продуктов пиролиза проводилось с использованием хроматографа Кристаллюкс 4000М, газ-носитель – аргон. Продукты пиролиза истекают через сопло насадка, поз. 9 на рис. 1, в испытательный бокс и сгорают в атмосфере, как это показано на рис. 2. Суммарный объем камеры и насадка составляет 2,8 л, а суммарное время пребывания продуктов пиролиза ~ 2,5 мс.

Описанная схема подачи плазмообразующего газа в дуговые каналы и жидкости в камеру использовалась ранее [14] при плазменной газификации водоугольной суспензии (ВУС) состава 40 % H<sub>2</sub>O, 60 % С при мощности плазмотрона на уровне 680 кВт, расходе плазмообразующего газа 97 г/с, расходе ВУС 70 г/с.

В настоящей работе мощность плазмотрона изменялась в диапазоне от 1,32 до 1,61 МВт,

а КПД, измеряемый по теплопотерям в систему охлаждения плазмотрона, составлял  $\eta = 85 \%$ .

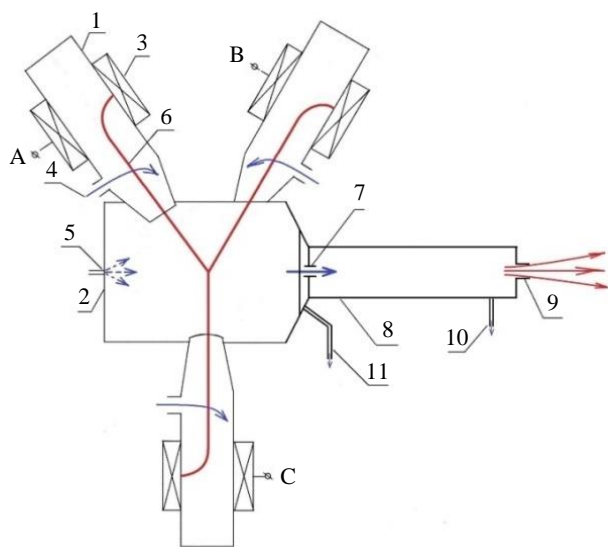
В таблице 1 приведены параметры испытаний. Во всех экспериментах, кроме № 7, в камеру подавалась вода. Удельный энергозатрат в метан и воду (табл. 1), рассчитывался как:

$$N_{уд} = N_d \cdot \eta / (G_{CH_4} + G_{H_2O}),$$

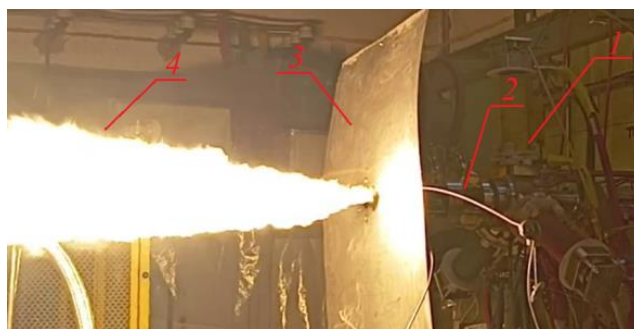
где  $G_{CH_4}$ ,  $G_{H_2O}$  – расходы метана и воды;  $N_d$  – дуговая мощность.

Давление в камере плазмотрона  $P_k$  изменялось в диапазоне от 0,21 до 0,25 МПа и определялось как величинами расходов метана и воды, так и диаметрами выходных сопел насадка  $d_n$  и камеры плазмотрона  $d_c$ .

В таблице 2 приведены результаты измерения объемных долей  $v$  продуктов пиролиза и массовые доли  $\mu$ , полученные расчетным путем. Расчет массовых долей основывался на результатах измерения объемных долей и на условии сохранения количества атомов углерода, водорода и кислорода в смеси метана и воды с суммарным расходом  $G_{CH_4} + G_{H_2O}$ . Доля воды, вступившей в реакцию, определялась с использованием объемных долей CO в продуктах пиролиза. Принималось, что оставшая непрореагировавшая вода выбрасывалась с факелом. В последнем столбце таблицы 2 приведено  $v_{H_2}/v_{CO}$  – отношение объемных долей  $H_2$  и CO.



**Рис. 1.** Схема плазмотрона «Звезда»: 1 – электрод; 2 – камера; 3 – магнитные катушки; 4 – подача  $CH_4$  в электроды; 5 – подача  $H_2O$  в камеру плазмотрона; 6 – электрическая дуга; 7 – выходное сопло камеры; 8 – насадок; 9 – сопло на выходе насадка; 10, 11 – забор пробы для хроматографического анализа



**Рис. 2.** Фотография запуска плазмотрона: 1 – плазмотрон; 2 – насадок; 3 – защитный экран; 4 – горение продуктов пиролиза в атмосфере

На рис. 3 приведена зависимость объемных долей продуктов пиролиза от отношения расходов  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  на входе. Как видно, концентрация водорода по мере увеличения расхода подаваемой воды снижается с 82 % до 74 %. В свою очередь, концентрация CO также снижается, но более существенно, с 15,8 % до 10 %. Имеет место значительное увеличение концентрации ацетилена по мере роста расхода воды: с 1 % до 8 %, растет также доля этилена и непрореагировавшего метана. В газообразных продуктах пиролиза вода не фиксировалась вследствие её конденсации в магистрали подключения заборного устройства, ведущей к хроматографу. Отношение объемных долей  $v_{H_2}/v_{CO}$  с ростом расхода воды в камеру плазмотрона увеличивается с 5,2 до 7,3 (кривая 6 на рис. 3).

О концентрации воды и углерода можно судить из зависимостей распределения массовых долей в табл. 2 и на рис. 4, где приведены расходы продуктов пиролиза непосредственно в г/с. При минимальной подаче воды  $G_{H_2O}/G_{CH_4} = 0,55$  массовая доля воды в пиролизном газе минимальная и составляет 2,6 %, остальная вода вступила в реакцию. При этом степень превращения метана составляет более 99 %. По мере роста  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  концентрация воды в пиролизном газе увеличивается до 48 % по массе. На рис. 4 также приведена зависимость равновесных температур в камере  $T_p$  (кривая 8), полученная расчетным путем [23] с использованием данных по удельным энергозатратам  $N_{уд}$ . Видно, что увеличение  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  на входе приводит к падению  $T_p$ , при этом уменьшение содержания CO и C сопровождается увеличением содержания ацетилена более, чем в 4 раза.

Таблица 1

## Условия проведения экспериментов

№ эксперимента	$G_{\text{CH}_4}$ , г/с	$G_{\text{H}_2\text{O}}$ , г/с	$G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$	$N_d$ , кВт	$N_{\text{уд}}$ , МДж/кг	$d_c$ , мм	$d_n$ , мм	$P_k$ , МПа
1	43,28	24	0,555	1,61	20,62	30	32	0,216
2	44,99	36	0,800	1,52	16,17	30	32	0,235
3	44,08	36	0,817	1,49	15,97	30	32	0,233
4	47,2	66	1,398	1,32	10,02	30	32	0,246
5	46,95	67	1,427	1,35	10,21	30	28	0,241
6	46,92	67	1,428	1,64	12,39	30	28	0,238
7	57,54	0	0	1,384	20,67	30	60	0,182

Таблица 2

## Состав продуктов пиролиза

№ эксперимента		$\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{C}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$
1	$\nu$ , %	82,18	0,48	1,02	0,49	15,83	0	0	5,19
	$\mu$ , %	19,07	1,56	3,08	0,91	51,43	21,35	2,61	
2	$\nu$ , %	77,82	0,45	5,17	1,95	14,62	0	0	5,32
	$\mu$ , %	14,77	1,2	12,75	2,96	38,84	10,01	19,48	
3	$\nu$ , %	78,87	0,597	5,23	1,06	14,24	0	0	5,53
	$\mu$ , %	14,83	1,57	12,78	1,59	37,51	10,87	20,84	
4	$\nu$ , %	74,68	0,65	8,12	5,78	10,77	0	0	6,93
	$\mu$ , %	9,17	1,12	12,94	5,68	18,52	6,17	46,39	
5	$\nu$ , %	74,99	0,91	7,89	6,12	10,07	0	0	7,44
	$\mu$ , %	8,89	1,51	12,17	5,81	16,72	6,85	48,05	
6	$\nu$ , %	74,61	0,77	8,12	6,3	10,20	0	0	7,31
	$\mu$ , %	8,86	1,28	12,54	5,99	16,97	6,46	47,91	
7	$\nu$ , %	77,61	0,97	12,29	9,13	0	0	0	-
	$\mu$ , %	17,62	3,08	36,28	16,59	0,000	26,42	0,000	

С использованием зависимости  $T_p$  от  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$ , приведенной на рис. 4, были проведены расчеты  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  в равновесном приближении с использованием [23] (кривая 7 на рис. 3). Как видно, характер кривой, полученной в результате расчетов, существенно отличается от экспериментальной: увеличение  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$  приводит к уменьшению  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  до  $\sim 3,2$ , в то время как в эксперименте имеет место увеличение  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  (кривая 6 на рис. 3). Это объясняется неравновесностью процессов в камере. Подтверждением этому являются результаты, полученные без подачи воды в камеру (строка 7 в табл. 1 и 2). При этом состав измерялся непосредственно перед входом в насадок через имеющийся канал забора газа, поз. 11 на рис. 1. Как видно, в этом случае максимальная концентрация имеет место

для ацетилена, что свидетельствует о неравновесности процессов из-за малого времени пребывания. В результате, при подаче в камеру из форсунки вода взаимодействует как с неразложившимся метаном (16,6 % по массе), так и с ацетиленом (36,3 % по массе). Процесс взаимодействия ацетилена с водой достаточно исследован при низких температурах (реакция Кучерова). Для высоких температур, без катализаторов, кинетический процесс мало исследован. Однако, равновесный расчет показывает, что, например, при  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{C}_2\text{H}_2} \sim 1$  и температуре 1500 К продукты пиролиза состоят из  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}$  в соотношении мольных долей 4,4 : 2,5 : 1, при отсутствии  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Это косвенно подтверждает двухстадийный характер пароводяной конверсии метана в рассматриваемой конструкции.

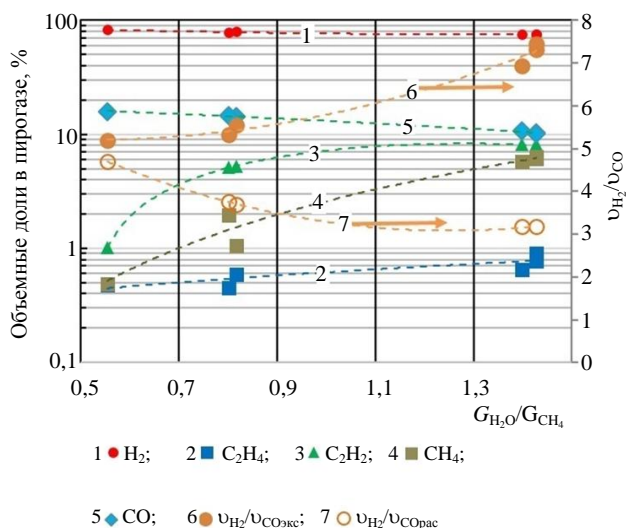


Рис. 3. Зависимость объемных долей продуктов пиролиза от отношения  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$

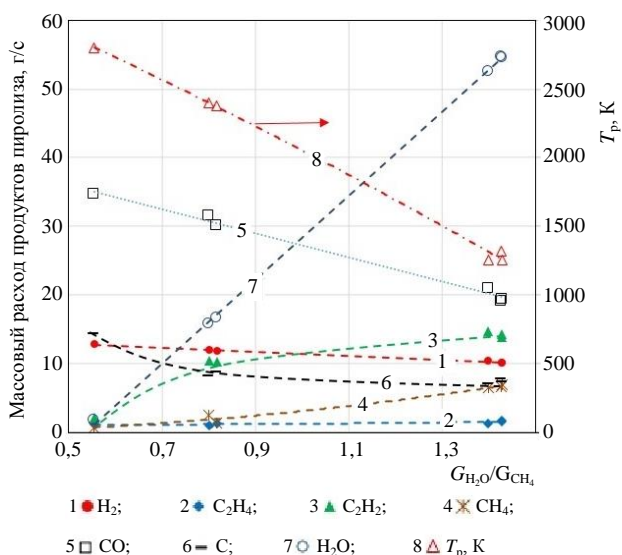


Рис. 4. Зависимость массовых расходов продуктов пиролиза от отношения  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$

### Заключение

1. Продемонстрирована возможность автономной работы плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности на метане, а также при подаче воды для осуществления пароводяной конверсии метана, в процессе которой метан подавался в дуговые каналы плазмотрона, а вода – в камеру плазмотрона. Получены данные по влиянию соотношения расходов метана и воды на концентрацию продуктов пиролиза. Режимы работы плазмотрона варьировались в следующих диапазонах: дуговая мощность от 1,32 до 1,61 МВт, расход метана от 43 до 57,5 г/с, расход воды от 0 до 67 г/с.

2. Показано, что снижение соотношения расходов воды и метана до  $G_{H_2O}/G_{CH_4} = 0,55$  приводит к получению минимального соотношения  $\nu_{H_2}/\nu_{CO} \sim 5,2$  при степени пиролиза метана более 99 %. При увеличении  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  до  $\sim 1,42$  соотношение  $\nu_{H_2}/\nu_{CO}$  увеличивается до  $\sim 7,3$ .

3. Установлено, что на исследованные процессы существенное влияние оказывает неравновесность вследствие малого времени пребывания продуктов пиролиза, а сам процесс разложения происходит по двухстадийной схеме: пиролиз метана в дуговых каналах – на первой стадии с последующей пароводяной конверсией совместно с водой, подаваемой в камеру плазмотрона – на второй стадии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Holladay J. D., Hu J., King D. L., Wang Y. / Catalysis Today. 2009. Vol. 139. P. 244–260.
- Lubitz W., Tumas B. / Chem Rev. 2007. Vol. 107. № 10. P. 3900–3903.
- Oyama S. T., Hacarlioglu P., Gu Y., Lee D. / Int J Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 10444–10450.
- Nguyen H., Kim K. / Catalysis Today. 2015. Vol. 256. P. 88–95.
- Czyrkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J. / Energy. 2016. Vol. 113. P. 653–661.
- Shekhawat D., Spivey J. J., Berry D. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing. – Amsterdam: Elsevier Science, 2011.
- Górska A., Krawczyk K., Jodzis S., Schmidt-Szałowski K. / Fuel. 2011. Vol. 90. № 5. P. 1946–1952.
- Guo F., Xu J.-Q., Chu W. / Catalysis Today. 2015. Vol. 256. № 1. P. 124–129.
- Tao X., Qi F., Yin Y., Dai X. / International Journal of Hydrogen Energy. 2008. Vol. 33. № 4. P. 1262–1265.
- Yanpeng S., Yong N., Angshan W., Dengxiang J., Fengwen Y., Jianbing J. / Plasma Science and Technology. 2012. Vol. 14. P. 252–256.
- Rutberg G., Kuznetsov V. A., Popov V. E., Popov S. D., Surov A. V., Subbotin D. I., Bratsev A. N. / Applied Energy. 2015. Vol. 148. P. 159–168.
- Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications. – New York: Springer Science+Business Media, 1994.
- SriBala G., Michiels D., Leys C., Van Geem K. M., Marin G. B., Nikiforov A. / Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 209. P. 655–664.
- Кошляков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А., Морозов А. Г., Ильюша А. В. / Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 8. С. 374–384.
- Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.

16. Svirchuk Y. S., Golikov A. N. / IEEE Transaction on Plasma Science. 2016. Vol. 44. № 12. P. 3042.

17. Голиков А. Н., Зайкин Н. С., Свирчук Ю. С. Трехфазный электродуговой плазматрон и способ его запуска. Патент на изобретение № 2577332 (РФ). 2016.

18. Голиков А. Н., Кочетков Ю. М., Полянский М. Н., Свирчук Ю. С. / Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 9. С. 390–396.

19. Кошляков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 32–39.

20. Кошляков В. В., Волков Н. Н., Козаев А. Ш. Плазмохимический способ получения синтез-газа и

установка для его осуществления. Патент на изобретение № 2699124 (РФ). 2019.

21. Коротеев А. С. Способ получения водорода и ацетилена и установка для его реализации. Патент на изобретение № 2765466 (РФ). 2021.

22. Кошляков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. Способ получения водорода и технического углерода из природного газа. Патент на изобретение № 2803529 (РФ). 2022.

23. Трусов Б. Г. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 1 (1). С. 240–249.

PACS: 52.75.Hn, 82.30.Lp

## Steam-water reforming of methane using a AC plasmatron of megawatt power

S. G. Rebrov<sup>\*</sup>, V. V. Koshlakov, A. N. Golikov, I. A. Fedorov,  
V. A. Golubev, and D. A. Goza

SSC Keldysh Research Centre. 8 Onezhskaya Str., Moscow 125438, Russian Federation

<sup>\*</sup>E-mail: rebrov\_servey@mail.ru

Received 9.02.2026; revised 26.02.2026; accepted 5.06.2026

*This paper presents the results of a study of steam-water conversion of methane using a three-phase AC plasmatron of megawatt power operating on methane. The process was carried out with the simultaneous supply of methane to the arc channels of the plasmatron and water to the plasmatron chamber. It was established that the studied methane decomposition process occurs according to a two-stage scheme: methane pyrolysis in the arc channels in the first stage, followed by steam-water conversion together with water supplied to the plasmatron chamber in the second stage. Data on the influence of the ratio of methane and water consumption on the concentration of pyrolysis products were obtained. The plasmatron operating modes during the study varied within the following ranges: arc power from 1.32 to 1.61 MW, methane flow rate from 43 to 57.5 g/s, and water flow rate from 0 to 67 g/s.*

**Keywords:** plasmatron, electric arc, hydrogen production, methane pyrolysis, methane conversion, synthesis gas.

### REFERENCES

- Holladay J. D., Hu J., King D. L., and Wang Y., Catalysis Today **139**, 244–260 (2009).
- Lubitz W. and Tumas B., Chem Rev. **107** (10), 3900–3903 (2007).
- Oyama S. T., Hacıoğlu P., Gu Y., and Lee D., Int J Hydrogen Energy **37**, 10444–10450 (2012).
- Nguyen H. and Kim K., Catalysis Today **256**, 88–95 (2015).
- Czyłkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., and Mizeraczyk J., Energy **113**, 653–661 (2016).
- Shekhawat D., Spivey J. J., and Berry D. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing; Amsterdam, Elsevier Science, 2011.
- Górska A., Krawczyk K., Jodzis S., and Schmidt-Szałowski K., Fuel **90** (5), 1946–1952 (2011).
- Guo F., Xu J.-Q., and Chu W., Catalysis Today **256**, 124–129 (2015).
- Tao X., Qi F., Yin Y., and Dai X., International Journal of Hydrogen Energy **33** (4), 1262–1265 (2008).
- Yanpeng S., Yong N., Angshan W., Dengxiang J., Fengwen Y., and Jianbing J., Plasma Science and Technology **14**, 252–256 (2012).
- Rutberg G., Kuznetsov V. A., Popov V. E., Popov S. D., Surov A. V., Subbotin D. I., and Bratsev A. N., Applied Energy **148**, 159–168 (2015).

12. Boulos M. I., Fauchais P., and Pfender E. *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*. New York, Springer Science+Business Media, 1994.
13. SriBala G., Michiels D., Leys C., Van Geem K. M., Marin G. B., and Nikiforov A., *Journal of Cleaner Production* **209**, 655–664 (2019).
14. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., Fedorov I. A., Morozov A. G., and Ilyusha A. V., *Thermal processes in engineering* **12** (8), 374–384 (2020) [in Russian].
15. Koroteyev A. S., Mironov V. M., and Svirchuk Yu. S. *Plasmatrones: design, characteristics, calculation*. Moscow: Mechanical Engineering, 1993 [in Russian].
16. Svirchuk Y. S. and Golikov A. N., *IEEE Transaction on Plasma Science* **44** (12), 3042 (2016).
17. Golikov A. N., Zaikin N. S., and Svirchuk Yu. S. Three-phase electric arc plasma generator and method for start-up thereof. Patent for invention № 2577332 (RF). 2016.
18. Golikov A. N., Kochetkov Yu. M., Polyansky M. N., and Svirchuk Yu. S., *Thermal processes in engineering* **1** (9), 390–396 (2009) [in Russian].
19. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., and Fedorov I. A., *Applied Physics*, № 4, 32–39 (2021) [in Russian].
20. Koshlakov V. V., Volkov N. N., and Kozaev A. Sh. Plasma-chemical synthesis gas production method and installation for its implementation. Patent for invention № 2699124 (RF). 2019.
21. Koroteev A. S. Method for producing hydrogen and acetylene and installation for implementation thereof. Patent for invention № 2765466 (RF). 2021.
22. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., and Fedorov I. A. Method for producing hydrogen and carbon black from natural gas. Patent for invention № 2803529 (RF). 2022.
23. Trusov B. G., *Bulletin of MSTU im. N. E. Bauman (Instrument engineering)* **1** (1), 240–249 (2012) [in Russian].

#### Об авторах

**Ребров Сергей Григорьевич**, д.т.н., главный научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru SPIN-код: 2043-8066, AuthorID: 22285

**Кошлаков Владимир Владимирович**, д.т.н., генеральный директор, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: kerc@elnet.msk.ru SPIN-код: 8524-6005, AuthorID: 171441

**Голиков Андрей Николаевич**, д.т.н., ведущий научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: andgolikov@mail.ru SPIN-код: 4057-0503, AuthorID: 109401

**Федоров Иван Алексеевич**, ведущий инженер, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: fedorov@kerc.msk.ru

**Голубев Виктор Александрович**, к.т.н., старший научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: golubev.va@mail.ru SPIN-код: 1991-6217, AuthorID: 617883

**Гоца Дмитрий Александрович**, заместитель начальника отдела, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: dgoza@bk.ru

УДК 537.52  
 EDN: UPVKOY

PACS: 52.80.Wq

## Влияние диаметра кристалла на направленный электрический разряд в воде по тонкому следу с ионами соли NaCl

© В. А. Панов\*, А. С. Савельев, Ю. М. Куликов

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия*

*\*E-mail: panovvladislav@gmail.com*

*Статья поступила в редакцию 2.03.2026; после доработки 19.03.2026; принята к публикации 5.06.2026*

*Шифр научной специальности: 1.3.9*

*В ранее проведенных исследованиях было показано, что управлять траекторией электрического разряда в воде возможно с помощью тонкого следа с повышенной электропроводностью, который образуется при движении кристалла поваренной соли в воде. Также была отмечена необычная структура разрядного канала, а именно – формирование отдельных несвязанных плазменных областей, которые затем объединяются в единый разрядный канал. Объяснение этого явления было дано на основе теневых фотографий, отражающих распределение растворенной соли вокруг кристалла, и результатов численного моделирования для концентрации, которые показали влияние формирующегося за кристаллом вихря на распределение соли, проводимости и, в конечном итоге, энерговыделения в области непосредственно за кристаллом, максимум которого оказался существенно удален от поверхности. В настоящей работе экспериментально обнаружено, что уменьшение диаметра кристалла от 518 мкм до 195 мкм привело к безвихревому режиму обтекания и более монотонному распределению концентрации соли внутри следа, что в свою очередь изменило развитие разряда – оно стало последовательным, от электрода к кристаллу и далее непрерывно вглубь следа. Трехмерное численное моделирование показало, что картины распределения тепловыделения различаются для кристаллов с размерами 518 мкм и 195 мкм и согласуются с результатами эксперимента.*

*Ключевые слова:* направленный разряд, пробой, вода, электролит, поваренная соль, NaCl, кристалл, неоднородное поле проводимости.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-54-60

### Введение

Управление траекторией и динамикой развития импульсного электрического разряда в конденсированных средах является фундаментальной научной и инженерной задачей. Наиболее остро эта проблема стоит в жидкостях, в частности – в воде, где высокая теплоемкость и наличие ионной проводимости создают препятствия для формирования протяженных разрядных каналов. Классические подходы к решению этой задачи, берущие начало от работ Л. А. Юткина по электрогид-

равлическому эффекту [1], включают использование электрического взрыва проводников (металлической проволоки) либо применение лазерного излучения для создания области пониженной плотности или оптического пробоя на пути следования разряда [2, 3]. Однако оба метода имеют ряд особенностей и ограничений. Проволочный метод требует механической переустановки электрода после каждого импульса и приводит к загрязнению рабочей среды и электродов продуктами эрозии [1]. Лазерное управление, хотя и является бесконтактным, сопряжено с использованием более

сложного и дорогостоящего оборудования [4, 5]. В связи с этим актуальным является поиск альтернативных, более простых и экономичных способов создания в воде направляющих каналов с повышенной проводимостью.

Новым подходом, предложенным в [6], является использование движущегося в межэлектродном промежутке кристалла поваренной соли (NaCl). По мере растворения кристалл оставляет за собой след с локально повышенной концентрацией ионов, который определяет предпочтительную траекторию для развития разряда [6]. В работе была не только подтверждена принципиальная возможность такого управления, но и обнаружен необычный характер разрядного процесса: формирование двух отдельных, несвязанных плазменных областей – у электрода и в следе за кристаллом, которые впоследствии объединялись в единый канал. Было выдвинуто предположение, что данное явление связано с гидродинамическим режимом обтекания кристалла. При использовании кристалла диаметром 518 мкм за ним формировался вихревой след, приводящий к немонотонному распределению концентрации соли (а значит, и проводимости) и, как следствие – к локализации энерговыделения на некотором удалении от поверхности кристалла. Полученные результаты допускают более широкую постановку вопроса: как геометрические параметры иницирующего элемента (кристалла) влияют на гидродинамику течения, пространственное распределение проводимости в следе и, в конечном итоге – на динамику формирования разрядных каналов?

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование влияния диаметра кристалла NaCl на режимы его обтекания и особенности развития импульсного электрического разряда в воде. В работе проведено сравнение результатов, полученных для кристалла диаметром 195 мкм, с ранее опубликованными данными для кристалла 518 мкм [6]. Уменьшение диаметра позволило реализовать безвихревой режим обтекания, что привело к более монотонному распределению концентрации соли внутри следа и принципиально иной – последовательной динамике пробоя. Для интерпретации экспериментальных данных и визуализации распределения тепловыделения раз-

работана уточненная трехмерная численная модель.

### Экспериментальная установка

Задача в экспериментальной части исследования ставится следующим образом. Исследуется путь развития канала разряда в слабопроводящей воде, где одновременно близко друг к другу присутствуют области высокой напряженности (у заостренного электрода) и кристалл поваренной соли, движущийся в воде, оставляя за собой тонкий след рассола относительно высокой проводимости за счет частичного растворения.

В исследовании поведения разрядного канала в присутствии следа падающего кристалла соли использовалась экспериментальная установка, детально описанная в [6, 7]. Здесь мы дадим лишь краткое ее описание с акцентом на основные ее части и свойства. Пробой осуществлялся в системе электродов «игла–плоскость», где под «иглой» подразумевается заостренный (конус с радиусом закругления вершины ~0,1 мм) вольфрамовый электрод, на который подавался импульс высокого напряжения, а под «плоскостью» – заземленную пластину круглой формы из нержавеющей стали. Такая конфигурация электродов была выбрана для того, чтобы обеспечить максимальную величину напряженности электрического поля вблизи высоковольтного электрода, где происходило падение кристалла соли и производилась скоростная визуализация процесса. Электроды помещались в ячейку объемом ~0,5 л с прозрачными стенками, заполненную дистиллированной водой таким образом, чтобы вся поверхность электродов была под водой, ось заостренного электрода была перпендикулярна плоскости заземленного электрода и параллельна поверхности воды. Расстояние от вершины заостренного электрода до поверхности заземленного составляло 8 мм, а до поверхности воды – 1 см.

Для обеспечения падения кристалла используется трубка с внутренней поверхностью в виде конуса, так что при падении через нее кристалла в воду его путь является хорошо контролируемым. Путем подстройки положения трубки удалось добиться прохождения кристалла в непосредственной близости от

острия кристалла. Для контроля пути кристалла использовалась оптическая схема, описанная в [6, 7]. Здесь кратко отметим, что использовался теневой метод визуализации, позволяющий видеть не только кристалл, электрод, но и тонкий след с повышенной концентрацией соли. Пространственное разрешение системы составляло примерно 3 мкм/пиксель, а экспозиция кадров – 10 мкс. Следует отметить, что возможность контроля места падения кристалла позволила использовать скоростную видеокамеру как триггер остальной аппаратуры, используемой в эксперименте: высоковольтного коммутатора, осциллографа [6, 7].

Подача высоковольтного напряжения на заостренный электрод осуществлялась с помощью высоковольтного коммутатора типа «полумост», который с фронтом нарастания ~100 нс и с фронтом падения ~100 нс подавал на электрод и снимал с него напряжение, соответственно. подача напряжения осуществлялась с высоковольтного конденсатора через токовый шунт и ограничивающий ток резистор по сигналу скоростной видеокамеры, т. е. в момент прихода кристалла в область вблизи заостренного конца высоковольтного электрода. В ходе эксперимента регистрировались осциллограммы напряжения на заостренном электроде, ток между электродами, а также скоростные теневые кинограммы развития электрического разряда между ними. В исследовании использовались кристаллы соли двух диаметров: 195 и 518 мкм.

### Методы математического моделирования

Моделирование электрического пробоя кристалла соли, движущегося в воде, разделяется на два этапа. На первом из них рассчитывается обтекание кристалла, с поверхности которого происходит растворение соли. Размер кристалла (радиус шара) при обтекании считается неизменным. На основе решения уравнений Навье–Стокса, переноса примеси и ОДУ (обыкновенных дифференциальных уравнений) для движения частицы в поле силы тяжести выполняется расчет распределения скорости и концентрации соли. Модель использует неинерциальную подвижную цилиндрическую систему координат, связанную с частицей. Сила вязкого трения, действующая

со стороны сплошной среды на частицу, вычисляется путем интегрирования нормальной составляющей тензора напряжений по поверхности частицы. В силу осесимметричности задачи отлична от нуля только компонента силы вдоль оси  $z$ . В качестве граничного условия на поверхности частицы задается условие прилипания. На входной границе скорость жидкости равна скорости падения кристалла. На внешней границе области задано условие симметрии (нормальная скорость и касательное напряжение равны нулю). В начальный момент времени кристалл считается неподвижным. Уравнение переноса примеси решается в переменных массовых долей, модель диффузии основывается на законе Фика. Плотность раствора определяется на основе массовых долей смеси. На поверхности сферы устанавливается условие типа Дирихле, т. е. задается максимальная массовая доля соли на основе предельной растворимости. Кроме того, задаются условия осевой симметрии, нулевого потока, а также условие свободного истечения пассивной примеси. Диаметр выступает характерным параметром для размера расчетной области, а также размера ячеек расчетной сетки. В безразмерных координатах с учетом осесимметричной постановки центр шара отстоит от нижней границы на 3 калибра. Задняя кромка находится на расстоянии 12 калибров от центра шара. Боковая (вертикальная) граница расчетной области находится в 4 калибрах от оси. Размеры области подобраны таким образом, чтобы в локальной системе координат падающего тела возмущения поля скорости, вносимые ею в поток, были малы на границах. В начальный момент времени примесь соли в растворе отсутствует. По полученному асимптотическому распределению концентрации соли на основе экспериментальных данных других авторов [8] определяется проводимость раствора.

На втором этапе полученное распределение используется для стационарной задачи в трехмерной постановке на основе уравнений Максвелла и соотношений для материальных параметров. На поверхности левого электрода (моделирующего высоковольтный заостренный электрод) задается постоянный потенциал амплитудой, соответствующей значению в эксперименте ( $V = 8$  кВ), правый (заземленный) электрод такой же формы является за-

земленным ( $V = 0$  В), на остальных границах задается условие нулевого заряда. На удалении от кристалла параметры жидкости (диэлектрическая проницаемость, проводимость) принимаются равными значениям дистиллированной воды. В качестве результатов второго этапа моделирования выступают распределения электрического потенциала, тока, плотности тепловыделения.

### Результаты и обсуждение. Экспериментальные результаты

Ранее авторами было показано [7], что развитие электрического разряда по следу от движущегося кристалла имеет особенность: на ранних этапах развития разрядный канал не является сплошным, а состоит из отдельных участков – первый находится между электродом и кристаллом, а второй – внутри следа на удалении от кристалла порядка его диаметра. Объяснение данного эффекта было дано на основе результатов численного моделирования обтекания кристалла с учетом его растворения и распределения концентрации соли, которая обеспечивает повышенную электропроводность отдельных областей. Формирование сразу позади кристалла торoidalного вихря приводило к образованию большой области с повышенной проводимостью и, таким образом, с плотностью тока, недостаточной для вскипания. В то же время, внутри тонкой части следа позади кристалла плотность тока оказывается выше и тепловыделение становится достаточным для образования паровой, а затем и плазменной области.

Важную роль с точки зрения образования плазменных областей и формирования разрядного канала играет размер кристалла. Он оказывает влияние на скорость движения, что в свою очередь, влияет на абсолютное количество растворившейся соли, увеличение диаметра следа вследствие диффузии, на число Рейнольдса и картину обтекания кристалла. Перечисленные факторы в конечном итоге определяют картину распределения электропроводности, тепловыделения и структуру формирующегося разрядного канала.

На рисунке 1 представлены кинограммы развития разряда для кристаллов с диаметрами 195 мкм (верхний ряд) и 518 мкм (нижний

ряд). В обоих случаях инициирование разряда происходит между поверхностью электрода и обращенной к ней поверхностью кристалла. Инициирование происходит практически одновременно с поправкой на большее расстояние для кристалла диаметром 195 мкм. Отличительной особенностью в случае кристалла диаметром 518 мкм является дополнительное вскипание (с последующим плазмообразованием) в следе за кристаллом на некотором удалении. Начиная с кадра #3 (31 мкс), развитие канала для кристалла диаметром 195 мкм происходит в одном направлении – от электрода в сторону дальнего от кристалла конца следа, а для диаметра 518 мкм – сразу в трех направлениях: от электрода к кристаллу, из следа к кристаллу и из следа в сторону его дальнего конца. При дальнейшем развитии (кадр #5, нижний ряд) хорошо видна часть канала, образовавшаяся позже других и соединяющая верхний полюс кристалла с остальной частью следа, диаметр которой в несколько раз меньше по сравнению с более удаленной частью разрядного канала.

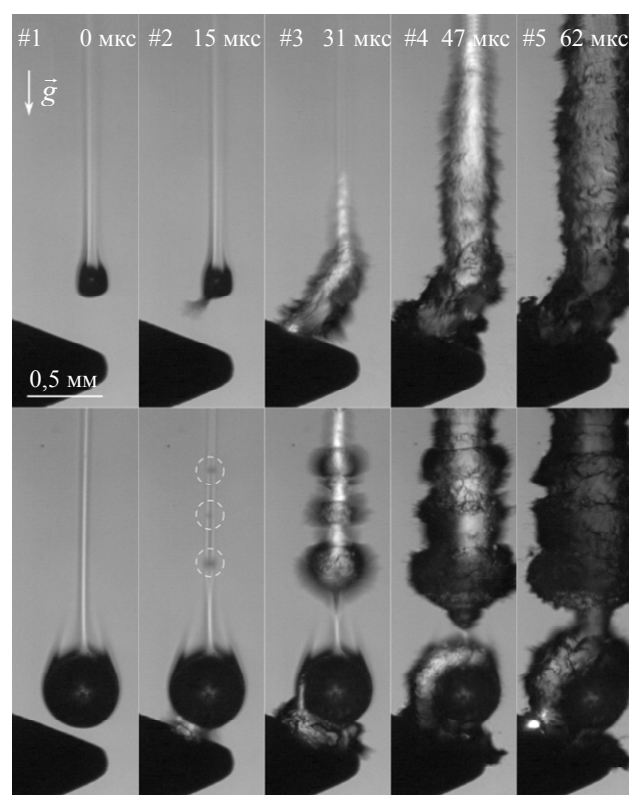
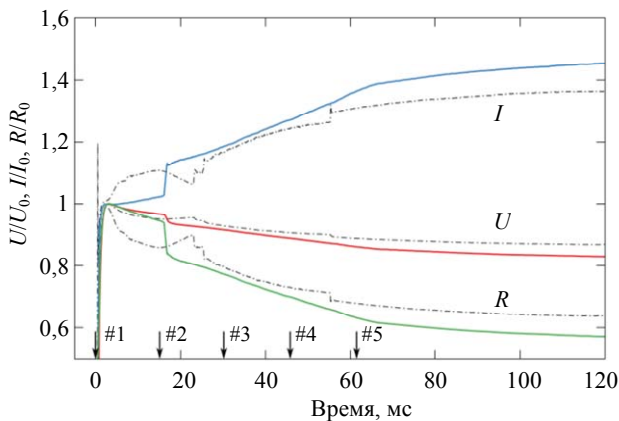


Рис. 1. Кинограммы развития электрического разряда в воде, направляемого следом от движущегося кристалла поваренной соли разных диаметров: верхний ряд – 195 мкм, нижний – 518 мкм. Время экспозиции 10 мкс, 64000 кадр/с

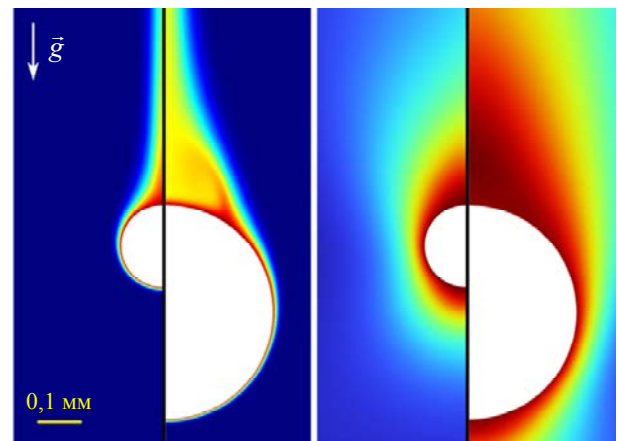
Обнаруженное отличие в характере развития разряда также прослеживается на осциллограммах напряжения, тока и сопротивления промежутка (рис. 2). При сравнении хода осциллограмм (сплошные линии для 195 мкм, пунктирные – для 518 мкм) видно, что нарастание тока и спад сопротивления для 195 мкм происходят монотонно и соотносятся с картиной развития разрядного канала, а единственный скачок связан с ионизацией и плазмообразованием в едином канале. Для кристалла диаметром 518 мкм – напротив, нарастание и спад тока между кадрами #2 и #3 совпадают с фазами прогрева и парообразования в дальней части следа, что кратковременно затрудняет протекание тока, который затем скачкообразно увеличивается после ионизации в данной области.



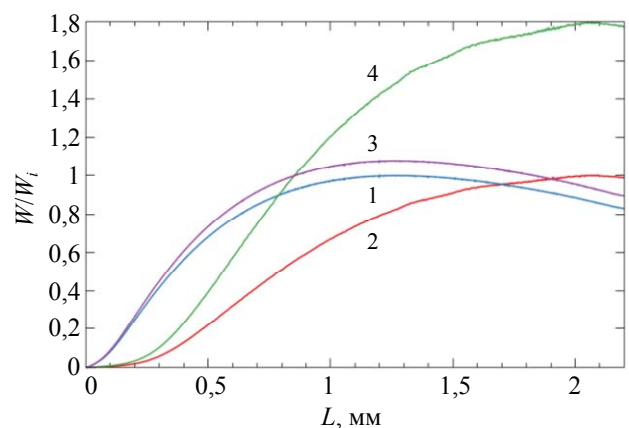
**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и сопротивления ( $R$ ) на разрядном промежутке, соответствующие кинограммам на рис. 1, нормированные на свои значения сразу после подачи напряжения. Внизу отмечены номера кадров. Сплошные линии – для кристалла диаметром 195 мкм, пунктирные – для диаметра 518 мкм

Наблюдаемое отличие в поведении разрядного канала хорошо интерпретируется результатами проведенного численного моделирования. На рисунке 3 представлены распределения концентрации (слева) и скорости (справа) для обоих кристаллов. Помимо очевидного различия в характерных размерах проводящей области с высокой концентрацией соли, хорошо видна разница в ее распределении в области между поверхностью кристалла и тонкой частью следа: за счет более крупного размера кристалла диаметром 518 мкм при его обтекании вблизи верхнего полюса формируется вихрь, который приводит к немонотонности распределения концен-

трации поперек следа и к увеличению поперечного размера области повышенной концентрации. Для кристалла 195 мкм – напротив, распределение поперек следа является монотонным с максимумом вблизи оси следа. Такое распределение концентрации приводит к тому, что распределение тепловыделения вдоль оси следа имеет максимум ближе к поверхности кристалла для диаметра 195 мкм по сравнению со случаем для диаметра 518 мкм (рис. 4, кривые 1 и 2, соответственно). При этом на участке от 0 до примерно 0,8 мм энергосыделение для кристалла диаметром 195 мкм существенно превышает свое значение для кристалла диаметром 518 мкм (кривые 3 и 4, соответственно), что соответствует результатам оптической регистрации (см. рис. 1).



**Рис. 3.** Результаты моделирования обтекания кристаллов диаметром 195 и 518 мкм для концентрации растворенной соли (слева) и скорости среды (справа)



**Рис. 4.** Распределения нормированного энергосыделения вдоль оси следа, расстояние  $L$  отсчитывается от верхнего полюса кристалла. Кривые 1 (195 мкм) и 2 (518 мкм) нормированы на свои глобальные максимумы на всей длине следа. Кривые 3 (195 мкм) и 4 (518 мкм) нормированы на значение в точке их пересечения при  $L \approx 0,85$  мм

## Выводы

Развитие электрического разряда в воде, направляемого проводящим следом от движущегося кристалла соли NaCl имеет ряд особенностей, связанных с распределением концентрации растворенной соли в следе.

При движении небольшого кристалла (диаметром 195 мкм) пробой происходит последовательно от высоковольтного электрода вдоль поверхности кристалла и далее вглубь следа – без разрывов плазменного канала, что объясняется безвихревым режимом его обтекания.

При движении более крупного кристалла (диаметром 518 мкм) разрядный канал инициируется на высоковольтном электроде, движется вдоль поверхности кристалла, но затем формируется в отдаленной от нее части следа, оставляя неионизированным участок, расположенный сразу позади кристалла в донной его части.

Данный эффект объясняется отличием в распределении концентрации растворенной соли (и, соответственно, результирующей проводимости) в области сразу за кристаллом: обтекание меньшего кристалла происходит без образования вихря в донной части и приводит к достаточно монотонному распределе-

нию проводимости; обтекание крупного кристалла приводит к появлению вихря в донной области, увеличению размера области с повышенной и неоднородной проводимостью, что приводит к меньшей плотности тока и тепловыделению, недостаточному для паро- и плазмообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.
2. Aihara Y., Shindo T., Miki M., Suzuki T. / Electrical Engineering in Japan. 1993. Vol. 113. № 4. P. 66–77.
3. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L., Wilkins F. L. Laser Triggering of Water Switches in Terrawatt-Class Pulse Power Accelerators. – Sandia National Laboratories, 2005.
4. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., Filyugin I. / Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 1994. Vol. 164. № 3. P. 263.
5. Ball L. M. / Applied Optics. 1974. Vol. 13. № 10. P. 2292.
6. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2025. № 6. С. 38–43.
7. Панов В. А., Савельев А. С., Куликов Ю. М. / Прикладная физика. 2025. № 5. С. 57–63.
8. Rao S. M., Thyagaraj T. / Applied Clay Science. 2007. Vol. 38. № 1–2. P. 113–129.

PACS: 52.80.Wq

## The influence of crystal diameter on the directed electric discharge in water along a thin trace with NaCl salt ions

V. A. Panov\*, A. S. Saveliev, and Yu. M. Kulikov

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow 125412 Russia

\* E-mail: panovvladislav@gmail.com

Received 2.05.2026; revised 19.03.2026; accepted 5.06.2026

*A recent study demonstrated that it is possible to control the trajectory of an electrical discharge in water using a thin trail of increased electrical conductivity formed by the movement of a sodium chloride (NaCl) crystal in water. An unusual structure of the discharge channel was also noted, namely the formation of separate, unconnected plasma regions that subsequently merge into a single discharge channel. An explanation for this phenomenon was provided based on shadowgraph images depicting the distribution of dissolved salt around the crystal and the results of numerical simulations of concentration. These revealed the influence of a vortex forming behind the crystal on the distribution of salt, conductivity, and ultimately, energy release in the region immediately following the crystal, the maximum of which was*

*found to be significantly displaced from the surface. In the present work, the investigation was conducted using a crystal of smaller diameter (195  $\mu\text{m}$  vs. 518  $\mu\text{m}$ ), and a comparison of the results is presented. The reduction in diameter led to a vortex-free flow regime and a more monotonic distribution of salt concentration within the trail. This, in turn, altered the discharge development, which became sequential — propagating from the electrode to the crystal and then continuously further into the trail. Numerical simulations, implemented in a new, re-fined three-dimensional formulation, revealed a pattern of heat release distribution distinct from the case of the 518  $\mu\text{m}$  crystal and consistent with the results of the present experiment.*

*Keywords:* guided discharge, breakdown, water, electrolyte, salt, NaCl, crystal, non-uniform conductivity field.

## REFERENCES

1. Yutkin L. A. Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti. Leningrad: Mashinostroeniye, 1986 [in Russian].
2. Aihara Y., Shindo T., Miki M., and Suzuki T., Electrical Engineering in Japan **113** (4), 66–77 (1993).
3. Woodworth J. R., Zamoski N. D., Johnson D. L., Sarkisov G. S., Blickem J. R., Valde D. M. V. D., Starbird R. L., and Wilkins F. L. Laser Triggering of Water Switches in Terrawatt-Class Pulse Power Accelerators. Sandia National Laboratories, 2005.
4. Vasilyak L., Kostyuchenko S., Kudryavtsev N., and Filyugin I., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **164** (3), 263 (1994).
5. Ball L. M., Applied Optics **13** (10), 2292 (1974).
6. Panov V. A., Saveliev A. S., and Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 6, 30–34 (2025).
7. Panov V. A., Saveliev A. S., Kulikov Yu. M., Applied Physics, № 5, 48–53 (2025).
8. Rao S. M. and Thyagaraj T., Appl. Clay Sci. **38** (1–2), 113–129 (2007).

## Об авторах

**Панов Владислав Александрович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: panovvladislav@gmail.com SPIN-код: 5821-2776, AuthorID: 755538

**Савельев Андрей Сергеевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: fisteh@mail.ru SPIN-код: 6888-7369, AuthorID: 866343

**Куликов Юрий Матвеевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: kulikov-yurii@yandex.ru SPIN-код: 7719-8459, AuthorID: 1130937

УДК 621.385.73 (088.8)  
EDN: RQOHPEPACS: 79.40. + z, 68.37. – d,  
84.47.+w, 81.15.-z**Нейросетевая оптимизация параметров ионно-плазменного осаждения термоэмиссионных покрытий**

© Г. А. Жабин

*АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина», Московская обл., г. Фрязино, 141190 Россия  
E-mail: zhabingennady@yandex.ru**Статья поступила в редакцию 19.01.2026; после доработки 2.02.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 2.2.9*

*Предложен способ оптимизации параметров процесса ионно-плазменного распыления мишеней тройных карбонатов щелочноземельных металлов Ba, Sr, Ca. Для построения прогнозной модели использована искусственная нейронная сеть (ИНС) с генетическим алгоритмом. Определены параметры напыления для получения тока эмиссии в диапазоне 70–120 мкА тонкопленочных термоэмиссионных микрокатодов. Выполнено сравнение результатов прогнозирования с экспериментальными данными по эмиссии изготовленных микрокатодов, а также с расчетами, полученными с помощью других моделей машинного обучения. Это сравнение показало, что ИНС позволяет найти более точную комбинацию параметров осаждения покрытий для создания эффективных термоэмиссионных микрокатодов.*

*Ключевые слова:* молекулярно-напыленный оксидный микрокатод (МНОК), ионно-плазменное напыление, машинное обучение, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, генетический алгоритм.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-61-67

**Введение**

Технологии ионно-плазменного (магнетронного) распыления (ИПР) позволяют контролировать толщину и состав напыляемой пленки. В этих процессах для распыления с мишени вещества, осаждаемого на подложку и формирующего тонкую пленку, используют плазменную среду. Сложные физико-химические явления, происходящие при осаждении покрытий, требуют точного контроля важнейших технологических параметров – таких, как давление, скорость потока рабочего газа, температура подложки и мощность распыления. Изучение этих процессов помогает управлять стехиометрией и структурой пленок, что, в свою очередь, влияет на их функциональные характеристики [1].

Авторы работы [2] разработали гибридную методику машинного обучения (МО), объединившую соответствующие модели

классификации и регрессии для решения проблемы, связанной с получением высокоподвижных аморфных плёнок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ , которые были изготовлены методом радиочастотного магнетронного распыления.

В работе [3] рассмотрены различные характеристики низкотемпературной плазмы и их сложность, обусловленная разнообразием параметров состава газовой фазы, давлением рабочего газа, плотностью подаваемой энергии и пространственными границами. В этих условиях прямое применение методов машинного обучения не всегда возможно. Для преодоления трудностей необходим прогресс в области диагностики плазмы и систем сбора данных. Обработка большого количества данных является одной из ключевых задач для достижения этой цели.

Авторы работы [4] путем моделирования переноса ионов аргона, бомбардирующего композит Ti-Al, получили ряд репрезентатив-

ных функций распределения энергии падающих частиц. Затем на этом наборе входных и выходных распределений обучили и проверили многослойную искусственную нейронную сеть (ИНС). После получения результатов обучения проведен анализ ошибок и сравнение их качества для двух наборов гиперпараметров. Показано, что обученная ИНС способна прогнозировать распределение расплывшихся частиц для неизвестных распределений энергии падающих ионов произвольной формы.

В работе [5] предложили эффективную систему проектирования процессов, которая позволяет искать оптимальные условия процесса за счёт сочетания глубокого обучения с моделированием плазмы. Для создания модели обучения был создан набор данных с использованием двумерного (2D) кода модели гибридного плазменного оборудования для системы с аргоновой плазмой с индуктивной связью. Модель была реализована и обучена с использованием набора данных для изучения функциональной взаимосвязи между технологическими условиями и вытекающими из них состояниями плазмы.

В исследовании [6] прогнозировались показатели преломления пленок  $\text{SiN}_x$ , выращенных на кремниевых подложках методом осаждения магнетронного распыления с использованием ИНС. Для обучения ИНС в качестве входных параметров использовались значения длины волны и температуры из экспериментальных данных, а в качестве выходного параметра – показатель преломления. Результаты моделирования и прогноза, полученные с помощью модели, сравнивались с экспериментальными данными. Сделан вывод, что подход с ИНС применим для моделирования и прогнозирования показателя преломления.

Методы мягких вычислений – такие, как генетический алгоритм (ГА) и ИНС – активно применяются в решении многих нелинейных задач благодаря хорошей производительности данных моделей [7, 8]. Используя ИНС, можно получать из данных сложные закономерности.

В настоящей работе предметом исследования являются тонкопленочные молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК), при-

меняемые в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ), которые получают с использованием ИПР катод-мишеней из карбонатов щелочно-земельных металлов (ЩЗМ). Они обеспечивают плотность тока  $1\text{--}2\text{ А/см}^2$  в течение  $5\text{--}10$  тысяч часов. Толщина напыляемой эмиссионной пленки на микрокатодах составляет  $\approx 1\text{ мкм}$  [1, 9].

Целью данного исследования являлось построение и оптимизация модели для предсказания значения целевой переменной тока микрокатада ( $I_{\text{cat}}$ ) на основе набора технологических параметров напыления.

### Объекты исследований и методика эксперимента

Напыление покрытий на микрокатоды проводилось на установке вакуумного ионно-плазменного напыления «УРМ3279011», производство России. Геометрические размеры, принцип работы и основные электрические параметры КПУ и рабочей камеры данной установки описанные в работах [10,11] одинаковы. Катод-мишени ( $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ca}$ ) $\text{CO}_3$  для ИПР изготавливали методом пульверизации из порошкообразных карбонатов ЩЗМ марки КТА-1-6-сп. Соотношение активных элементов ЩЗМ в мишени составляло 47:45:8, толщина – 130–135 мкм. Турбомолекулярный насос имел скорость откачки 500 л/с. Предельный уровень вакуума –  $1 \times 10^{-6}$  Па. После разложения карбонатов мишени постоянное напряжение, подаваемое между мишенью и подложкой, дает энергию, необходимую для ионизации атомов аргона и диссоциации газа  $\text{CO}_2$ , что приводит к состоянию плазмы. Под действием приложенного электрического поля ионы аргона бомбардируют мишень и распыляют ее. Распыленные атомы и молекулы в процессе движения к подложкодержателю реагируют с газом и, осаждаясь на керны микрокатодов, создают пленки оксидов и карбонатов ЩЗМ. Процесс распыления контролируется путем изменения технологических параметров установки.

Используемый набор данных получен при осаждении покрытий на МНОК и последующем измерении тока эмиссии микрокатодов в вакуумных приборах. Набор данных по-

лучен из процессов, которые были проведены в различных условиях с изменяющимися параметрами осаждения покрытий. Целевая переменная  $I_{\text{cat}}$  была отделена от признаков. Набор данных был разделен на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки. Все признаки были масштабированы на обучающей выборке, а затем применены к тестовой выборке. Исходные данные содержали 253 строки и 13 столбцов.

Исследование состояло из следующих этапов: сбора и обработки данных, разработки и прогнозирования модели с помощью ИНС, оптимизации с помощью ГА. Столбцы с полностью пропущенными значениями были удалены. Осуществлена проверка и обработка пропусков. Были выбраны 12 параметров осаждения: Напряжение разряда  $U_{\text{dis}}$ , В; ток разряда  $I_{\text{dis}}$ , мА; напряжение накала мишени при напылении  $U_{\text{nm}}$ , В; ток накала мишени при напылении  $I_{\text{nm}}$ , А; напряжение отражателя  $U_{\text{otr}}$ , В; ток отражателя  $I_{\text{otr}}$ , А; ток соленоида  $I_{\text{sol}}$ , А; давление напыления  $P$ , Па; температура подложки  $T_{\text{sub}}$ , °С; время разложения карбонатов мишени  $t_{\text{dec}}$ , мин; максимальный ток при разложении мишени  $I_{\text{dec}}$ , А; время напыления  $t_{\text{sup}}$ , мин. ГА был адаптирован для поиска оптимальной комбинации настроек параметров. В этом исследовании целевая функция состояла в максимизации тока эмиссии катодов  $I_{\text{cat}}$ . Полученный результат с использованием ГА проверялся с помощью ИНС и сравнивался с экспериментальными результатами и результатами полученными другими методами машинного обучения (МО) – такими, как метод опорных векторов (SVR), «случайный лес» (RF) [12], градиентный бустинг (GB) [13, 14], XGBoost (высокопроизводительный градиентный бустинг) [12–14, 15]. ГА основан на естественном отборе и включает четыре основных этапа. Это создание популяции решений, оценка приспособленности для каждого решения, отбор особей и создание новой популяции на основе трех генетических операций: репродукции, кроссовера и мутации [7, 8]. Репродукция происходит, когда каждая особь дублируется на основе ее значений приспособленности [16]. В данном исследовании выбрана мутация, при которой ток катода заменяется равномерно случайным значением, выбранным между заданными верхней и ниж-

ней границами 60–120 мкА в низкотемпературной области (480–490 °С) эмиссионных характеристик МНОК [1, 11]. Данная низкотемпературная область выбрана потому, что она характеризует и определяет эмиссионную активность и качество микроатома на всей эмиссионной кривой. Целевая функция исследования – максимизировать ток эмиссии напыленных катодов в определенной низкотемпературной области не локальных характеристик. Входами для модели являлись параметры напыления, а выходом – ток микроатома. Была определена архитектура нейронной сети с использованием библиотеки Keras. Базовая модель состояла из 4 полносвязных слоев с функциями активации LeakyReLU с параметром 0,01 и слоями пакетной нормализации. L2-регуляризация применена для контроля переобучения и повышения обобщающей способности модели. Входной слой состоял из 12 нейронов. Скрытые слои имели 128, 128, 64 и 32 нейрона. Выходной слой имел один нейрон с линейной активацией для задачи регрессии. Обучение модели проводилось на 100 эпохах с ранней остановкой. Модель была скомпилирована с оптимизатором Adam (скорость обучения 0,001) и функцией потерь MSE (среднеквадратическая ошибка), а также метриками MAE (средняя абсолютная ошибка) и  $R^2$ . Метрики базовой модели на тестовых данных с 4 скрытыми слоями: MSE – 431,9; MAE – 15,5; показатель  $R^2$  – 0,47.  $R^2$  показывает, какой процент изменчивости в зависимой переменной может быть объяснен вариациями в независимых переменных, используемых в модели. Целевой метрикой для оптимизации была  $R^2$  с направлением максимизации. Было выполнено 30 испытаний, каждая конфигурация модели обучалась 2 раза для повышения стабильности оценки.

Обучение оптимизированной модели с найденными гиперпараметрами показало значительное улучшение. Модель обучалась в течение 250 эпох. Использовались библиотеки Keras и метод `keras_tuner`, алгоритм `RandomSearch`. Случайным образом выбраны различные комбинации гиперпараметров. Для каждой выбранной комбинации гиперпараметров алгоритм обучил модель на тренировочных данных. Оптимизированные гиперпараметры

привели к созданию модели ИНС со следующей архитектурой и конфигурацией обучения: 4 скрытых слоя. Первый слой – с 480 нейронами и функцией активации «relu», второй слой – с 160 нейронами, «tanh». Третий слой – 96 нейрона, четвертый – 128, функции активации «leaky\_relu» и «relu», соответственно.

После обучения оптимизированной ИНС ее метрики производительности на тестовой выборке изменились: MSE – 229,68; MAE – 12,17;  $R^2$  – 0,72. Процесс настройки существенно улучшил предсказательную способность модели. Графики обучения оптимизированной модели представлены на рис. 1 (а, б).

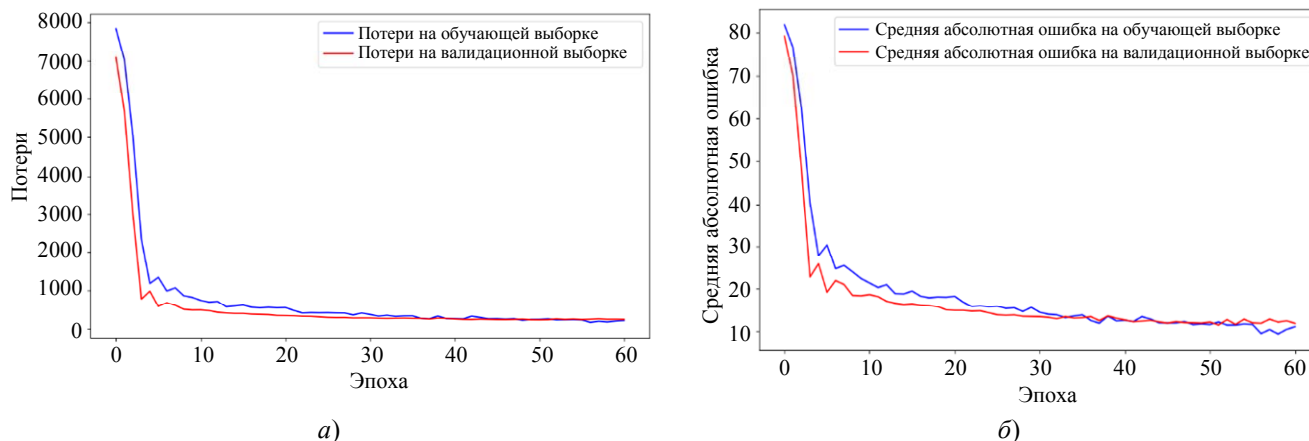


Рис. 1. Обучение модели на тестовой и валидационной выборках: а) – потери, б) – MAE

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В работе использовались технологические данные, связанные с нагревом и разложением карбонатов мишени, осаждением покрытия в установке ИПР, измерением эмиссии. Значения, записанные на других этапах, косвенно связанных с током эмиссии, например – откачка вакуума или монтаж и сборка напыленных катодов – не рассматривались. Добавление этих этапов потребовало бы создания гораздо большего набора данных и увеличения сложности задачи.

На графиках истории обучения (рис. 1) видно, что на тренировочных и валидационных данных ошибки со временем уменьшаются. Кривые показывают, что модель успешно обучается. Показаны две ключевые метрики: потери (Loss) и средняя абсолютная ошибка (MAE). Для каждой метрики отображены две линии: синяя линия показывает значения метрики на обучающей выборке (данные, на которых модель училась). Красная линия – значения метрики на валидационной выборке (данные, которые модель никогда не видела во время обучения, используются для оценки ее обобщающей способности). График потерь

демонстрирует, как менялась ошибка модели на протяжении эпох обучения. Показано, что валидационные потери не сильно расходятся с тренировочной – это указывает на то, что модель не переобучилась и способна хорошо работать на новых данных. Модель эффективно учится и при этом сохраняет обобщающую способность. MAE показывает среднее абсолютное отклонение предсказанных значений от фактических. Меньшее значение MAE означает, что предсказания модели в среднем ближе к истинным значениям. Аналогично потерям, обе линии MAE также снижаются, а затем стабилизируются. Низкие значения MAE на валидационной выборке подтверждают, что модель делает точные предсказания. Сходство между тренировочной и валидационной MAE свидетельствует об отсутствии значительного переобучения.

На основе усредненных абсолютных весов связей первого слоя оптимизированной модели проведен анализ важности признаков. Важность признаков оптимизированной модели ИНС была рассчитана и отсортирована по возрастанию. Визуализация с помощью вертикальной столбчатой диаграммы (рис. 2а) показала численную важность каждого признака.

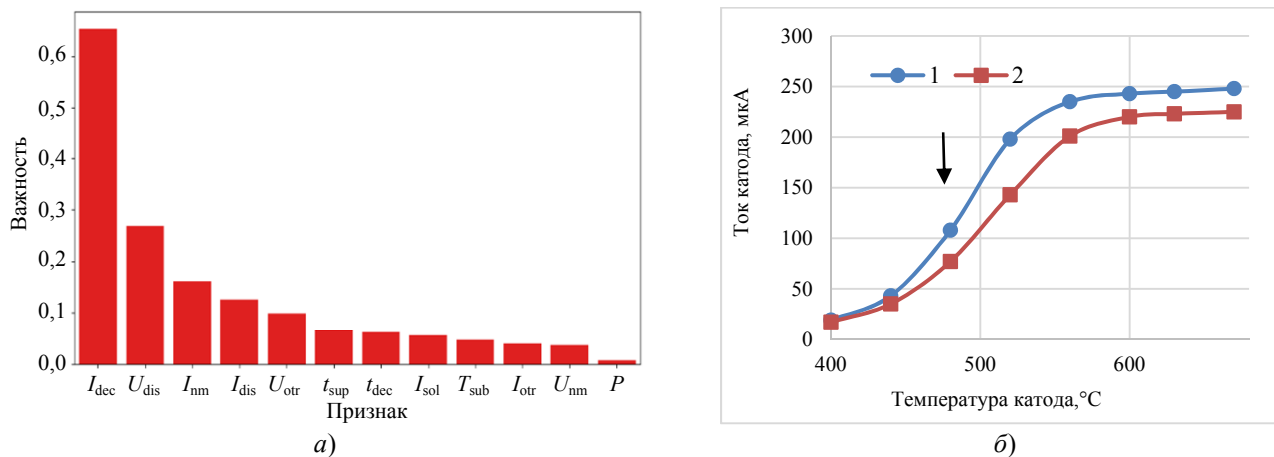


Рис. 2. Диаграмма важности признаков оптимизированной модели (а). Эмиссионные характеристики двух экспериментальных МНОК, полученные после напыления покрытий с применением ГА (б)

Согласно проведенному анализу (рис. 2а) наиболее важными признаками (с наибольшими средними абсолютными весами в первом слое) являются параметры напыления:  $I_{dec}$ ,  $U_{dis}$ ,  $I_{nm}$ ,  $I_{dis}$ , а наименее важными –  $I_{otr}$ ,  $U_{nm}$ ,  $P$ .  $I_{dec}$  имеет наибольшую важность. Изменяя этот параметр случайным образом, мы значительно ухудшаем качество предсказания модели. От того, насколько правильно произойдет термическое разложение карбонатов катод-мишени в вакууме, до начала непосредственного процесса напыления покрытия на керны микрокатодов, зависит последующая ее эмиссионная способность для испускания термоэлектронов и ионизация газа для ее распыления при нанесении эмиссионного покрытия. Это связано с температурой разложения карбонатов ЦЗМ, продолжительностью данного технологического этапа, давлением остаточных газов в камере. При термическом разложении мишени происходят важные физико-химические процессы в объеме и на ее поверхности, формирующие оксидный слой соответствующего состава, с которого идет напыление на микрокатоды.  $U_{dis}$

определяет ускоряющее напряжение, необходимое для распыления катод-мишени.  $I_{nm}$  вместе с  $U_{nm}$  определяют мощность накала, имеющую значение для температурного разогрева и диффузии атомов активных веществ на поверхность мишени во время осаждения покрытия.

В результате работы ГА был найден набор входных признаков (лучшее решение), который при подаче в оптимизированную ИНС определил предсказанное значение  $I_{cat} = 90$  мкА, что соответствует центру целевого диапазона и максимизирует функцию приспособленности (таблица).

При проведении исследования также получены зависимости прогнозируемого тока катодов от технологических параметров напыления. Прогнозируемый ток МНОК растет с увеличением ускоряющего напряжения разряда, тока разложения карбонатов мишени и тока разряда. Уменьшение давления рабочего газа с 0,13 до 0,11 Па влияет на увеличение прогнозируемого  $I_{cat}$ . Полученные результаты согласуются с ранее проведенными исследованиями в экспериментальных работах [1, 9–11].

Таблица

Оптимизация параметров процесса с применением ГА

$U_{dis}$ , В	$I_{dis}$ , мА	$U_{nm}$ , В	$I_{nm}$ , А	$U_{otr}$ , В	$I_{otr}$ , А	$I_{sol}$ , А	$P$ , Па	$T_{sup}$ , °C	$t_{dec}$ , мин.	$I_{dec}$ , А	$t_{sup}$ , мин.	$I_{cat}$ , мкА
821	226	23	9,5	24	36	0,38	0,12	228	86	9,7	177	90

После проведенного экспериментально-го процесса напыления на микрокатоды с использованием технологических параметров, близких к полученному ГА в таблице, были измерены значения  $I_{\text{cat}}$  двух МНОК, смонтированных в макеты вакуумных приборов. Полученные недокальные характеристики микрокатодов показаны на рис. 2б. В низкотемпературной области эмиссионных кривых (480–490 °С) прогнозируемый  $I_{\text{cat}}$  имеет значения 108 мкА (№ 1) и 77 мкА (№ 2), что входит в диапазон целевой функции.

Проведено обучение и оценка производительности других моделей машинного обучения (RF, GB, SVR, XGBoost). Критерием оценки перечисленных моделей была  $R^2$ -метрика. Результаты сравнения для всех моделей: ИНС – 0,72; RF – 0,61; GB – 0,62; XGBoost – 0,42; SVR – 0,25. Точность прогнозирования ИНС выше, чем у других традиционных методов МО. Модели ИНС, GB и RF являются наиболее подходящими для прогнозирования  $I_{\text{cat}}$  на основе текущего набора данных, но ИНС превзошла все остальные модели, демонстрируя наибольшую предсказательную способность.

### Заключение

Разработана архитектура и проведено обучение модели ИНС для предсказания последующего значения тока термоэмиссионных микрокатодов на основе экспериментальных данных процесса вакуумного ионно-плазменного напыления эмиссионных покрытий. Предложен способ оптимизации параметров процесса ИПР для изготовления эффективных тонкопленочных эмиттеров. С использованием генетического алгоритма найден лучший набор параметров напыления, обеспечивающий ток микрокатодов в низкотемпературной области эмиссионных характеристик в диапазоне 60–120 мкА. ИНС показала приемлемую точность предсказаний на тестовых данных с

метрикой  $R^2$ , равной 0,72, и лучшие результаты по сравнению с традиционными регрессионными моделями МО. Результаты моделирования можно использовать для масштабирования процессов напыления в промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жабин Г. А., Пелунец О. В., Шапанов Н. А. / Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 11. С. 38–41. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.11.57909.19827>.
2. Kamataki K. et al. / Journal of Applied Physics. 2023. Vol. 134. № 16. <https://doi.org/10.1063/5.0160228>.
3. Sakai O., Kawaguchi S., Murakami T. / Japanese Journal of Applied Physics. 2022. Vol. 61. № 7. P. 070101. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac76fa>.
4. Krüger F., Gergs T., Trieschmann J. / Plasma Sources Science and Technology. 2019. Vol. 28. № 3. P. 035002.
5. Ko J. et al. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2023. Vol. 56. № 34. P. 344001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acd1fd>.
6. Yükses A. G. et al. / Physica B: Condensed Matter. 2024. Vol. 695. P. 416581. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416581>.
7. Mohd Sabri N. et al. / Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1109. P. 481–485. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1109.48>.
8. Ko Y. D. et al. / Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36. № 2. P. 4061–4066. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.03.010>.
9. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Темирязева М. П. / Прикладная физика. 2019. № 5. С. 54.
10. Жабин Г. А., Логинов Б. А., Логинов А. Б., Шичалин К. В. / Журнал радиоэлектроники. 2025. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.5>.
11. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Седловец Д. М., Темирязева М. П. / Электронная техника. Сер. 1. СВЧ – техника. 2020. Вып. 1 (544). С. 46–55.
12. Khan A. A., Chaudhari O., Chandra R. / Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 244. P. 122778. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122778>.
13. Vijayaraghavan V., Garg A., Gao L. / Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 135. P. 118374.
14. Chen T. / Cornell University. 2016. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
15. Клюковкин Г. К. / Актуальные исследования. 2024. № 37 (219). <https://doi.org/10.5281/zenodo.16131539>.
16. Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. / Multimedia tools and applications. 2021. Vol. 80. № 5. P. 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.

## Application of artificial neural networks to optimization the parameters of ion-plasma deposition of thermionic coatings

G. A. Zhabin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, 141190 Russia

E-mail: zhabingennady@yandex.ru

Received 19.01.2026; revised 2.02.2026; accepted 5.06.2026

*A method for optimizing the parameters of the ion-plasma sputtering process of triple carbonates of alkaline-earth metals Ba, Sr, Ca is proposed. An artificial neural network (ANN) with a genetic algorithm is used to build a predictive model. The sputtering parameters are determined to obtain an emission current in the range of 70–120  $\mu\text{A}$  for thin-film thermionic microcathodes. The prediction results are compared with the actual emission data of the manufactured microcathodes and those calculated by other machine learning models. Based on the comparison, it was shown that the ANN allowed for finding a more accurate combination of coating deposition parameters to obtain efficient thermionic microcathodes.*

*Keywords:* molecular sputter-deposited oxide microcathode (MSOC), ion-plasma deposition, machine learning, forecasting, artificial neural network, genetic algorithm.

### REFERENCES

1. Zhabin G. A., Pelipets O. V., and Sharapov N. A., Technical Physics Letters **50** (11), 38–41 (2024). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.11.57909.19827>.
2. Kamataki K. et al., Journal of Applied Physics **134** (16), (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0160228>.
3. Sakai O., Kawaguchi S., and Murakami T., Japanese Journal of Applied Physics **61** (7), 070101 (2022). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac76fa>.
4. Kruger F., Gerges T., and Trishman J., Science and technology of plasma sources **28** (3), 035002 (2019).
5. Ko J. et al., Physics Journal D: Applied Physics **56** (34), 344001 (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acd1fd>.
6. Yuksek A. G. et al., Physics in: Condensed media **695**, 416581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416581>.
7. Mohd Sabri et al., Modern Materials Research **1109**, 481–485 (2015). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1109.48>.
8. Ko Yu. D. et al., Expert systems with applications, **36** (2), 4061–4066 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.03.010>.
9. Zhabin G. A., Arkhipov D. Yu., and Temiryazeva M. P., Applied Physics, № 5, 54 (2019) [in Russian].
10. Zhabin G. A., Loginov B. A., Loginov A. B., and Chichalin K. V., Journal of Radio Electronics, № 6, (2025). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.5>.
11. Zhabin G. A., Arkhipov D. Yu., Sedlovetz D. M., and Temiryazeva M. P., Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnika, № 1 (544), 46–55 (2020) [in Russian].
12. Khan A. A., Chaudhary O., and Chandra R., Expert systems with applications **244**, 122778 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122778>.
13. Vijayaraghavan V., Garg A., and Gao L., Journal of Energy Storage **135**, 118374 (2025).
14. Chen T., Cornell University, (2016). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
15. Klyukovkin G. K., Aktual'nyye issledovaniya, № 37 (219), (2024). <https://doi.org/10.5281/zenodo.16131539>.
16. Katoch S., Chauhan S. S., and Kumar V., Multimedia tools and applications **80** (5), 8091 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.

### Об авторе

**Жабин Геннадий Анатольевич**, начальник сектора, АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина» (141190, Россия, Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2 А). E-mail: zhabingennady@yandex.ru SPIN-код: 1554-0437, AuthorID: 991720

**Оптическая когерентная томография в качестве метода обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах**

© И. В. Злобина<sup>1\*</sup>, М. В. Алонова<sup>1</sup>, Н. В. Бекренев<sup>1</sup>, Д. А. Зимняков<sup>1,2</sup>, А. В. Пасечная<sup>1</sup>,  
В. О. Нефедов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, 410054 Россия

\* E-mail: irinka\_7@mail.ru

<sup>2</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, 410028 Россия

Статья поступила в редакцию 8.12.2025; после доработки 5.03.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 1.3.2

*В работе изучено применение оптической когерентной томографии для обнаружения дефектов на границе «матрица–волокно» в полимерных композиционных материалах (ПКМ) из непрерывного углеродного волокна и суперконструкционного термопласта полиэфирэфиркетона. На полученных В-сканах обнаружены дефектные участки. Проведена бинаризация различной степени. Выявлен процент бинаризации, обеспечивающий визуальную информативность с одновременным снижением артефактов и шумов, характерных для В-сканов. Для графического выражения и дальнейшей количественной оценки полученных результатов бинаризованных В-сканов были сформированы А-сканы. Выявлено, что бинаризация В-сканов на уровне 40 % позволяет информативно отобразить слой полимера, определить его толщину, снизить проявление и оценить сплошность на границе полимера и наполнителя.*

*Ключевые слова:* оптическая когерентная томография, полимерные композиционные материалы, бинаризация, дефекты структуры, граница «матрица–волокно».

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-68-74

**Введение**

В процессе производства волокнистых ПКМ могут возникать различные дефекты, включая поверхностные повреждения, вызванные контактом с направляющими роликами, а также проблемы, связанные со статическим электричеством и неравномерностью покрытия [1, 2]. К другим важным дефектам относятся проблемы с агрегацией наночастиц на границе раздела «наполнитель–матрица», вызванные различиями в химической природе и поверхностных свойствах волокон и матрицы, а также неравномерное распределение волокон в матрице [3]. Они напрямую влияют на конечные свойства изделия. Агрегация частиц

приводит к сложности полноценной пропитки волокна связующим и формированию зон с пониженной прочностью [3]. Неравномерное распределение волокон в объеме матрицы создает локальные концентрации напряжений, тем самым вызывая снижение прочности и ударной вязкости, а также повышение склонности к расслоению. Следствием дефектов является снижение эксплуатационных характеристик под нагрузкой. Даже материалы с высокими прочностными показателями – такие, как углепластики, критически чувствительны к этому фактору в силу своей низкой ударной вязкости [3, 4].

В связи с тем, что структура ПКМ сложна, а сами материалы многокомпонентны, ак-

туальным представляется контроль деталей, изготовленных из них, не только на этапе производства и выпуска, но и во время эксплуатации. Наличие дефектов различного происхождения, размеров и локализации оказывают значительное влияние на формирование комплекса физико-механических характеристик ПКМ [5].

В настоящее время активное развитие получают методы диагностики и поиск путей повышения их информативности. Последнее обеспечивается повышением чувствительности соответствующих элементов исследовательского оборудования, использованием уточненных зависимостей, применяющихся для обработки сигналов, и алгоритмов анализа информации.

Одним из перспективных методов диагностики наличия дефектов в виде воздушных включений (пор, трещин) в ПКМ является метод оптической когерентной рефлектометрии (ОКТ). Необходимо отметить, что многолетний опыт применения данного метода по отношению к биологическим объектам широко применяется в медицине [6–10]. Благодаря микрометровому разрешению и возможности осуществлять кросс-секционную визуализацию в объеме материала, ОКТ предоставляет уникальные данные о морфологии внутренних структур, распределении армирующих элементов, дефектоскопии на субповерхностном уровне и качестве адгезионных соединений [8].

Главным вектором исследований по применению ОКТ для ПКМ является переход от качественной визуализации к количественному, высокоскоростному анализу и прогнозированию свойств, а также к неинвазивному методу исследований КМ. Так в [11–16] применили ОКТ для обследования эпоксидной смеси из стекловолокна, которая обычно используется для изготовления лопастей ветряных турбин. Через ОКТ-изображения, полученные при статическом испытании расслаивающегося стекловолоконного композиционного материала, были обнаружены трещины и места расслоения.

Фундаментальный принцип ОКТ базируется на интерферометрии Майкельсона с использованием источника низкокогерентного света, который от источника разделяется све-

тоделителем на эталонный и пробный пучки [12]. Ключевым параметром для анализа ПКМ является рассеивающая способность. Различные компоненты таких материалов (полимерная матрица, стеклянные/углеродные волокна, границы раздела) обладают разными показателями преломления, что приводит к частичному обратному рассеянию света. Регистрируя амплитуду и временную задержку этого сигнала, ОКТ-система строит одномерный А-скан. Последовательное сканирование по двум координатам позволяет реконструировать двумерное изображение В-скана (поперечное сечение) или трехмерный объем.

В настоящее время в литературе крайне мало материалов, описывающих опыт применения данного метода относительно широкого круга ПКМ, что обуславливает актуальность данного направления. В связи с этим актуальным представляется определение возможностей ОКТ применительно к ПКМ, изготовленным методом послойного наплавления из углеродных волокон и термопластов, что обусловлено развитой морфологией поверхности наполнителя и коротким периодом повышенной вязкости расплава термопласта, в частности – полиэфирэфиркетона (ПЭЭК).

## Материалы и методы

В данной работе исследовались образцы монослоя, сформированного на 3D принтере Anisoprint Composer A4 из препрега, армированного жгутом из непрерывных углеродных волокон, пропитанного эпоксидной смолой марки ЭД-20 и покрытого полиэфирэфиркетонном (ПЭЭК). Верхний слой образцов был представлен слоем ПЭЭК. Ниже него располагался тонкий слой реактопластичного полимера (эпоксидная смола марки ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА)), в средней части располагались углеродные волокна. Особенности структуры используемого композитного материала приведены в работах [17].

Для исследования были использованы 2 группы образцов с размерами  $30 \times 10 \times 1,2$  мм – контрольные и опытные, подвергнутые электрофизическому воздействию, в частности – прошедшие СВЧ обработку на частоте

2450 МГц. Обработку образцов в СВЧ электромагнитном поле осуществляли на лабораторных СВЧ технологических установках производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.).

Для инструментальной реализации метода низкокогерентной рефлектометрии был использован оптический когерентный томограф OSC 1300 SS (ThorLabs, США) с длиной волны зондирующего излучения 1300 нм, максимальной глубиной зондирования 3 мм, длиной трека сканирования 5 мм с размером изображения 512 на 720 пикселей в режиме В-сканирования.

После получения набора экспериментальных данных проводился анализ В-сканов и А-сканов.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных изображений В-сканов позволяет выявить характерные особенности контрольных образцов (рис. 1), прошедших модификацию. Волокна углепластика в значительной мере поглощают зондирующее излучение. Верхний слой исследуемого материала, представленный полимером, прозрачен для него, что позволяет использовать ОКТ для контроля состояния верхнего слоя полимера и области примыкания полимера к матрице.

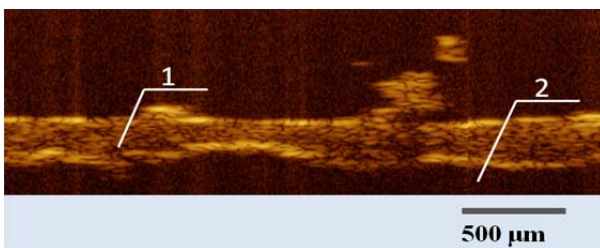


Рис. 1. В-скан контрольного образца:  
1 – матрица, 2 – волокно

Отмечено, что для контрольных образцов ярко выражено наличие области скачка показателя преломления на границе «полимер-волокно», что визуально отображается как яркая горизонтальная линия. В обработанных образцах размеры области со скачком показателя преломления значительно менее протяженные.

При анализе В-сканов выявлен схожий характер ярких линий при переходе зондирующего излучения через границы «воздух–полимер» и «матрица–наполнитель», что определило целесообразность поиска объективных методов для их сравнения.

В качестве количественной оценки полученных результатов была проведена бинаризация сформированных В-сканов (рис. 2).

Рассматривалась максимальная интенсивность пикселя изображения и вводилось граничное условие. Пикселям с меньшей интенсивностью назначалось нулевое значение, с большей – единичное. Полученные изображения имеют больший контраст, выделяют области с нужными значениями величин отклика и отображают области с резкими скачками показателя преломления. Образована система уравнений (1)

$$\begin{cases} I_{\text{бин}}(i, j) = 1, & \text{если } I(i, j) \geq I_b, \\ I_{\text{бин}}(i, j) = 0, & \text{если } I(i, j) < I_b, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I(i, j)$  – интенсивность пикселя исходного В-скана,  $I_{\text{бин}}(i, j)$  – бинаризованное значение интенсивности В-скана,  $I_b$  – граничное условие бинаризации.

Граничное условие бинаризации определяется долей от максимальной интенсивности  $I_{\text{max}}$  исходного В-скана:

$$I_b = K \times I_{\text{max}}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент бинаризации.

Небольшие значения граничных условий –  $K = 30\%$  бинаризации – сохраняют информацию о неоднородностях, сформированных в В-скане в слое полимера (рис. 2), а большие значения –  $K = 50\%$  бинаризации – оставляют только самые яркие участки границ и не позволяют получить информацию о слое полимера (рис. 2). Промежуточные варианты, соответственно, оставляют часть неоднородности в слое полимера.

Также осуществлялась оценка исходных и бинаризованных А-сканов. Оценка единичного А-скана вдоль вертикальной линии тоже проводится в соответствии с граничными условиями бинаризации, которая позволяет выделить границы и распределение интенсивности сигнала в объеме полимера.

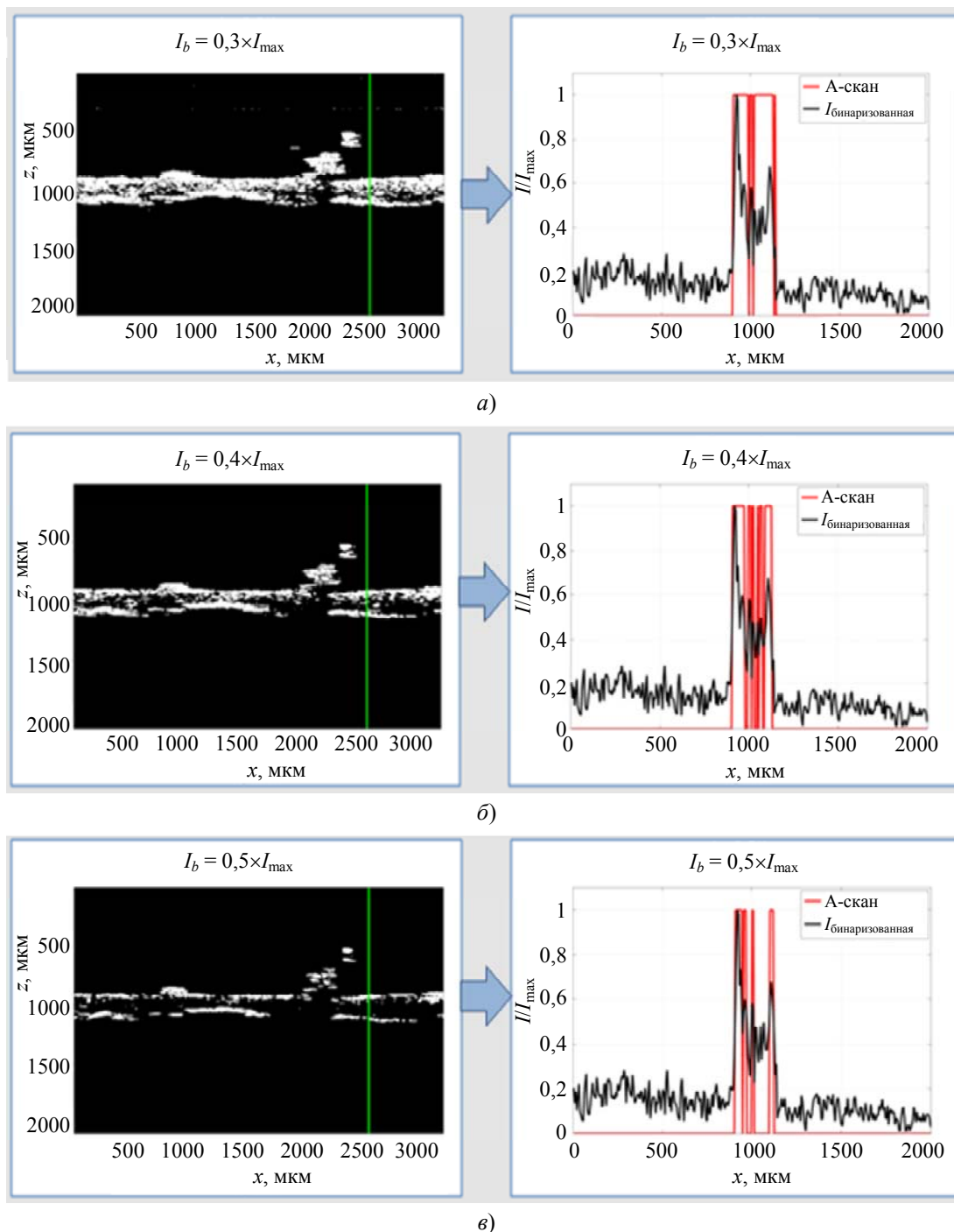


Рис. 2. Результаты бинаризации В-сканов (слева) и соответствующие им А-сканы (справа). Бинаризация 30 % (а), 40 % (б) и 50 % (в)

Для получения графического выражения, позволяющего произвести количественную оценку полученных результатов бинаризованных В-сканов, были выделены А-сканы.

Наиболее информативным является А-скан, соответствующий В-скану, бинаризованному на 40 % – отчетливо показаны границы полимера, контрастная область границы «полимер-волокно». Условием данной бина-

ризации было уменьшение интенсивности в  $e$  раз относительно максимального значения. Среднее значение условия бинаризации порядка 40 % от максимальной интенсивности обеспечивает информативное отображение границы «матрица–волокно» (без потери информации, возникающей при  $I_b = 0,5 \times I_{max}$ , и без лишних шумов, которые сохраняются при низком пороге бинаризации.

Высокое значение пика отклика на границе «полимер–волокно» характеризует скачок показателя преломления вещества до величин, порядка показателя преломления воздуха. С учетом технологии изготовления подобных композитных материалов и специфики структуры поверхности углеродных волокон можно заключить, что часть области контакта матрицы и наполнителя содержит воздух, который частично растворяется в полимере при модифицирующем воздействии на образцы, что согласуется с результатами сравнительного анализа физико-механических характеристик образцов аналогичного состава [17, 18].

### Заключение

Бинаризация В-сканов с низким порогом позволяет информативно отобразить слой полимера, определить толщину слоя полимера и оценить её распределение по поверхности исследуемого ПКМ.

Бинаризация В-сканов с высоким порогом позволяет выделить области с резким скачком показателя преломления и определять дефекты соединения полимера и углеродного волокна.

Средний уровень бинаризации сохраняет информацию о толщине слоя полимера и о наличии контрастных фрагментов в области контакта «матрица–волокно», что позволяет произвести комплексную оценку указанных параметров.

С учетом распределения интенсивности сигнала с экспоненциальным затуханием в качестве граничных условий бинаризации предлагается использовать падение значения интенсивности в  $e$  раз от максимального.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравский А. А., Аликин М. Б., Дворко И. М., Лавров Н. А. / Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. Т. 64. № 90. С. 58–66.
2. Biggham C. J. / Resinate. 2018. № 5.
3. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А., Торлова А. С., Никалов Е. С. / Фундаментальные науки. 2018. № 5. С. 459–465.
4. Mahboubizadeh S., Sadeq A., Arzaqi Z., Ashkani O., Samadoghi M. / Discover Materials. 2024. Vol. 4. № 1. P. 47.
5. Дегтярева М. А., Журнова Е. А. / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. С. 78–80.
6. Гришианов В. Н. Оптическая когерентная томография в медицинской диагностике: электрон. метод. указания. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015.
7. Зайцев В. Ю., Виткин И. А., Матвеев Л. А., Геликонов В. М., Матвеев А. Л., Геликонов Г. В. / Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 3. С. 231–250.
8. Stifter D. / Applied Physics B. 2007. Vol. 88. № 3. P. 337–357.
9. Лю П., Яо Л., Groves R. / Труды 7-го Международного симпозиума по неразрушающему контролю в аэрокосмической промышленности. 2015. С. 2–5.
10. Huang D., Swanson E., Lin C. et al. / Science. 1991. Vol. 254. № 5035. P. 1178–1181.
11. Dunkers J. P. / Оптика и лазеры в технике. 2001. Т. 35. № 3. С. 135–147.
12. Liu P., Groves R. M., Benedictus R. / NDT & E International. 2014. Vol. 65. P. 2–9.
13. Гуров И. П., Жукова Е. В., Маргарянц Н. Б. / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 12. № 3. С. 40–45.
14. Fercher A. F. / Z. Med. Phys. 2010. Vol. 20. № 4. P. 251–276.
15. Гуров И. П. / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. Т. 5. № 21. С. 5–20.
16. Wenninger M., Marschik C., Felbermayer K., Heise B. / AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2884. P. 6.
17. Бекренев Н. В., Злобина И. В. / Материалы XIV Всерос. науч. и студ. конф. с междунар. участием. — Санкт-Петербург, 14–18 мая 2024 г. – СПб.: СПбГУПТД, 2024. С. 11–12.
18. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О., Пасечная А. А. / Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сб. материалов Всерос. конф., посв. 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 г. – Киров: МЦИТО, 2024. С. 217–219.

## The possibilities of using optical coherence tomography as a method for detecting defects in polymer composites

I. V. Zlobina<sup>1\*</sup>, M. V. Alonova<sup>1</sup>, N. V. Bekrenev<sup>1</sup>, D. A. Zimnyakov<sup>1,2</sup>, A. V. Pasechnaya<sup>1</sup>, and V. O. Nefedov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, 410054 Russia

\* E-mail: irinka\_7\_@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028 Russia

Received 8.12.2025; revised 5.03.2026; accepted 5.06.2026

*Research has been carried out in the field of using optical coherence tomography to detect defects at the "matrix-fiber" interface in polymer composite materials based on continuous carbon fiber and superconstructive thermoplastic polyesteresterketone. Defective areas were recorded on the received B-scans. Binarization of various degrees has been carried out. The percentage of binarization has been identified, providing visual information content while reducing artifacts and noise typical of B-scans. To form a graphical expression and further quantify the results obtained from binarized B-scans, A-scans were generated. It was found that the binarization of B-scans at the level of 40 % makes it possible to informatively display the polymer layer, determine its thickness, reduce the appearance and evaluate the continuity at the polymer-filler boundary.*

*Keywords:* optical coherence tomography, polymer composite materials, binarization, structural defects, matrix-fiber boundary.

### REFERENCES

1. Muravskii A. A., Alikin M. B., Dvorko I. M., and Lavrov N. A., Proc. St. Petersburg State Institute of Technology, № 90, 58–66 (2023).
2. Biggham C. J., Resinate, № 5, (2018).
3. Kolosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A., Torlova A. S., and Nikalov E. S., Fundamental Research, № 5, 459 (2018) [in Russian].
4. Mahboubzadeh S., Sadeq A., Arzaqi Z., Ashkani O., and Samadoghi M., Discover Materials **4** (1), 47 (2024).
5. Dektiareva M. A. and Zhirnova E. A., Aktualnye Problemy Aviatsii i Kosmonavtiki – Actual Problems of Aviation and Cosmonautics **2**, 78–80 (2015) [in Russian].
6. Grishanov V. N. Optical Coherence Tomography in Medical Diagnostics [Electronic Methodological Guidelines]. Samara: Samara State Aerospace University Press, 2015 [in Russian].
7. Zaitsev V. Yu., Vitkin I. A., Matveev L. A., Gelikonov V. M., Matveev A. L., and Gelikonov G. V., Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika [Radiophysics and Quantum Electronics] **57** (3), 231–250 (2014).
8. Stifter D., Applied Physics B **88** (3), 337–357.
9. Liu P., Yao L., and Groves R., Proc. 7th Int. Symp. on NDT in Aerospace, 2015, pp. 2–5.
10. Huang D., Swanson E., Lin C. et al., Science **254** (5035), 1178–1181 (1991).
11. Dunkers J. P., Optika i Lazery v Tekhnike [Optics and Lasers in Engineering] **35** (3), 135–147 (2001) [in Russian].
12. Liu P., Groves R. M., and Benedictus R., NDT & E International **65**, 2–9 (2014).
13. Gurov I. P., Zhukova E. V., and Margaryants N. B., Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics **12** (3), 40–45 (2012).
14. Fercher A. F., Z. Med. Phys. **20** (4), 251–276 (2010).
15. Gurov I. P., Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics **5** (21), 5–20 (2005).

16. Wenninger M., Marschik C., Felbermayer K., and Heise B., AIP Conf. Proc. **2884**, 6 (2023).
17. Bekrenev N. V. and Zlobina I. V. Proc. XIV All-Russ. Sci. and Student Conf. with Int. Participation, St. Petersburg, 14–18 May 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2024, pp. 11–12 [in Russian].
18. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O., and Pasechnaya A. A., Proc. All-Russ. Conf. Dedicated to the 75th Anniv. of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, 19–23 Sept. 2024. Kirov: MTSITO, 2024, pp. 217–219 [in Russian].

#### Об авторах

**Злобина Ирина Владимировна**, к.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: irinka\_7\_@mail.ru SPIN-код: 6730-8099, AuthorID: 686083

**Алонова Марина Васильевна**, к.ф.-м.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: alonova\_marina@mail.ru SPIN-код: 3059-2174, AuthorID: 667431

**Бекренев Николай Валерьевич**, д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru SPIN-код: 8948-8116, AuthorID: 271817

**Зимняков Дмитрий Александрович**, доктор наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77); Институт проблем точной механики и управления РАН (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24). E-mail: zimnykov@mail.ru SPIN-код: 1918-5220, AuthorID: 29094

**Пасечная Алина Владимировна**, студент кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: pasechnaya\_alina\_15.07.03@mail.ru

**Нефедов Владислав Олегович**, студент кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: b640018968@gmail.com SPIN-код: 4115-8463, AuthorID: 1334364

УДК 539.23, 537.312.52  
EDN: JNPCAN

PACS: 73.61.-r, 81.07.Pr

## Увеличение проводимости пленки на основе металлоорганических соединений при воздействии УФ-излучением

© А. С. Тютюник\*, В. Б. Орленсон, А. С. Мазинов, А. Н. Гусев

*Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,  
Симферополь, 295007 Республика Крым, Россия**\*E-mail: tyutyunikas@mail.ru**Статья поступила в редакцию 9.06.2025; после доработки 23.06.2025; принята к публикации 5.06.2025*

*Представлены исследования оптических, люминесцентных и электрических характеристик металлоорганических соединений на основе 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин) иодид меди (Cu(I)). Описана методика получения, микроскопия, а также результаты ИК-спектроскопии тонкопленочных структур. Приведены результаты вольтамперных характеристик тонкопленочных структур в контактной системе оксида индий-олово (ITO)-алюминий (Al). Анализ ВАХ показал, что тонкие пленки иодида меди обладают выпрямляющими световыми характеристиками под действием ультрафиолетового излучения. Облучение электромагнитным излучением УФ-диапазона экспериментальных структур привело к возрастанию прямых токов в 3,5 раза.*

*Ключевые слова:* тонкие пленки; вольт-амперные характеристики; квантовая эффективность; иодид меди.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-75-81

### Введение

В течение последнего десятилетия цветные люминесцентные материалы стали предметом возрастающего интереса в области светодиодов, сенсоров, солнечных батарей и искусственного фотосинтеза [1–4]. Металлоорганические комплексы на основе иодида меди, комплексы Cu(I) привлекают все больше внимания исследователей как перспективные экологически чистые материалы благодаря настраиваемым структурным и фотофизическим свойствам [5, 6]. За счет своих превосходных люминесцентных свойств, высокого квантового выхода при комнатной температуре, комплексы Cu(I) являются многообещающими в области материаловедения и полупроводниковой промышленности [7, 8]. Создание новых систем на основе меди Cu(I),

особенно гетеролептических комплексов, обусловлено высокой мотивацией, так как они представляют собой привлекательную альтернативу системам, использующим более дорогие металлы платиновой группы и редкоземельные элементы [9, 10]. Современные достижения в области технологий производства полупроводниковых материалов вносят значительный и уникальный вклад в разработку электронных устройств [11]. Тонкие пленки в основном изготавливаются с использованием методов обработки растворов, включая капельное литье, спиновое покрытие, метод лезвия дозирования (doctor blade) и распыление [12–15]. Системных работ об использовании металлоорганического соединения Cu(I) в области полупроводниковой электроники явно недостаточно, в связи с чем целью настоящей работы было изучение оптических, люминес-

центных, а также резистивных свойств комплексов Cu(I) на основе 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин) иодид меди.

### Методика эксперимента

Объектами исследований являлись соединения 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин) иодид меди вставка (см. рис. 1, приготовленные по аналогичной методике [16]. В плоскодонную коническую колбу на 100 мл заливалось 20 мл метанола и 20 мл хлороформа. Затем при перемешивании и без нагревания поочерёдно растворялось 0,262 гр. (0,001 моль) трифенилфосфина, 0,232 гр. (0,001 моль) оксадиазола, после чего добавлялось 0,190 гр. (0,001 моль) иодида меди(I), далее реакционная смесь нагревалась до 60 °С и перемешивалась в те-

чение 15 минут, затем нагрев выключался и смесь продолжала перемешиваться дополнительно в течение 40 минут. Затем реакционная смесь фильтровалась через складчатый бумажный фильтр. Полученный фильтрат оставлялся для медленного испарения с целью осаждения целевого продукта в связи с высокой скоростью испарения растворителя, испарительная ёмкость снабжалась тонкой проницаемой плёнкой для замедления процесса испарения с целью повышения качества целевого продукта. В течение последующих двух суток на стенках ёмкости аккумулировалась смесь из целевого продукта и непрореагировавших реагентов, целевой продукт осаждался в виде желтых, ромбических кристаллов, люминесцирующих при облучении ультрафиолетом жёлто-оранжевым цветом. Структурная формула полученного Cu(I) металлоорганического соединения представлена на вставке рис. 1.

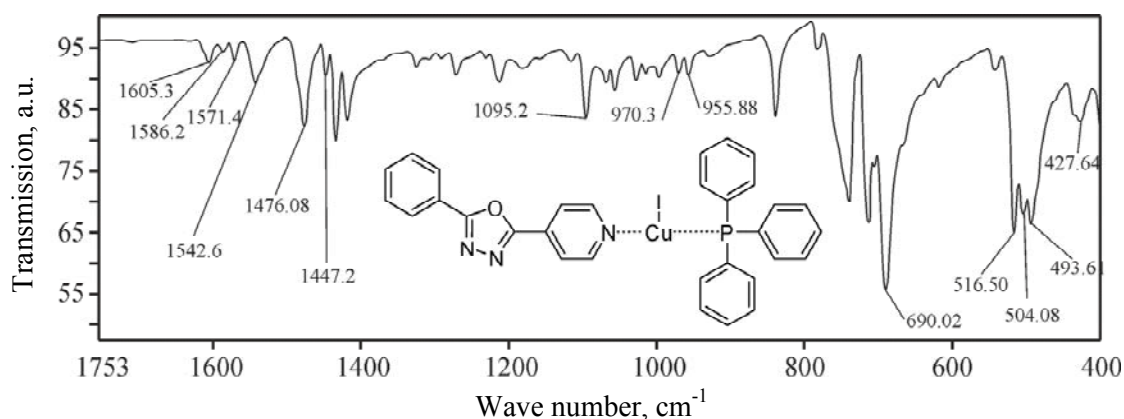


Рис. 1. ИК-спектры прохождения 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин) иодид меди и молекулярная структура полученного соединения (вставка)

Процесс формирования тонких пленок из исходных порошковых материалов выполнялся с использованием центрифуги ПЭ 6900 методом послойного осаждения. В качестве растворителя применялся неароматический хлороформ CH<sub>3</sub>. Масса порошковых материалов контролировалась с помощью высокоточных аналитических весов Сартосом SE124-С. Концентрация исходных веществ в растворе составляла 1 мг/мл. После тщательного перемешивания и выдерживания не менее 48 часов при комнатной температуре полученный раствор объемом 1 мл наносился с использованием пипеточного дозатора на оптически прозрачные диэлектрические и проводящие подложки. Скорость вращения центри-

фуги постепенно увеличивалась до 1500–3000 об/мин с шагом в 500 об/мин.

Инфракрасные спектры исследуемого металлоорганического соединения Cu(I) записывались на ИК-фурье-спектрометре PerkinElmer Spectrum Two FT-IR с Фурье преобразованием в диапазоне 8300–350 см<sup>-1</sup> с разрешением 0,5 см<sup>-1</sup>. Спектры люминесценции исследовались с использованием прибора Fluorolog-FL 3-22 (HORIBA Jobin-YvonInc) при комнатной температуре. Для определения оптимального максимума возбуждающего излучения применялась стандартная методика импульсного возбуждения, которая включает многократное облучение рабочих слоев органических плёночных структур. С учётом па-

раметров максимумов возбуждения были измерены спектры люминесценции. Оценка морфологии поверхности тонких пленок Cu(I) осуществлялась при помощи отражающей и просвечивающей микроскопии на микроинтерферометре ЛОМО МиИ-4М с дополнительным освещением, полупроводниковым лазером и удлинённым оптическим путем на ПЗС матрицы от  $\frac{1}{4}FF - \frac{1}{2}FF$  и разрешением от 0,5 до 15 Мп. Термогравиметрическое исследование (ТГА) осуществлялось при помощи ТГ анализаторов PerkinElmer STA6000.

Проводящие свойства в режиме постоянного тока исследовались при помощи анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A. В процессе исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) металлоорганических соединений Cu(I) раствор наносился на алюминиевые тонкие плёнки, которые получены методом вакуумного напыления на ситалл, толщина которых составляла 120 нм и с сопротивлением – 20 Ом/кв [15], с последующим формированием «сэндвич» структуры Al–Cu(I)–ITO. Измерения проводились в диапазоне напряжений от –1 до 1 В. Алюминиевая тонкая пленка образует омический контакт с Cu(I), поскольку ее работа выхода соизмерима с работой выхода Cu(I). Геометрические параметры проводящих подложек составляли 10×10 мм.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Первичный анализ поверхности тонких пленок иодида меди показал относительную однородность полученных тонких плёнок

(рис. 2а). Толщина пленки Cu(I) составила приблизительно 2 мкм. На поверхности плёнки также наблюдалось образование отдельных агломераций диаметром ~40 мкм. Квантовый выход люминесценции, а именно значения энергий триплетных уровней соответствующих материалов, был определён на основе спектров фотолюминесценции. Расчёт относительного квантового выхода люминесценции проводился по следующей формуле (1):

$$Q = \frac{S}{S_{\text{эт}}} \times \frac{(1-R)}{(1-R_{\text{эт}})}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь под кривой спектра люминесценции,  $A$  – поглощение при длине волны возбуждения,  $R$  – коэффициент отражения. В качестве эталонов были использованы: хинин сульфат, родамин В и салицилат натрия, точность измерений составила 10 %.

Первоначально были установлены максимумы спектров возбуждения металлоорганического соединения Cu(I). Пик возбуждения для Cu(I) составил 465 нм (рис. 2б). Максимум люминесцентного спектра Cu(I) наблюдался в диапазоне от 510 до 740 нм (рис. 2б). Изученное металлоорганическое соединение продемонстрировало жёлто-оранжевое излучение с максимумом длины волны 625 нм. Также следует подчеркнуть высокую степень квантовой эффективности исследуемого соединения (EQE), которая составила 55,84 % (вставка рис. 2б). В результате наглядно продемонстрировано, что полученное металлоорганическое соединение Cu(I) в перспективе может быть использовано в качестве активных переизлучающих для полупроводниковых структур.

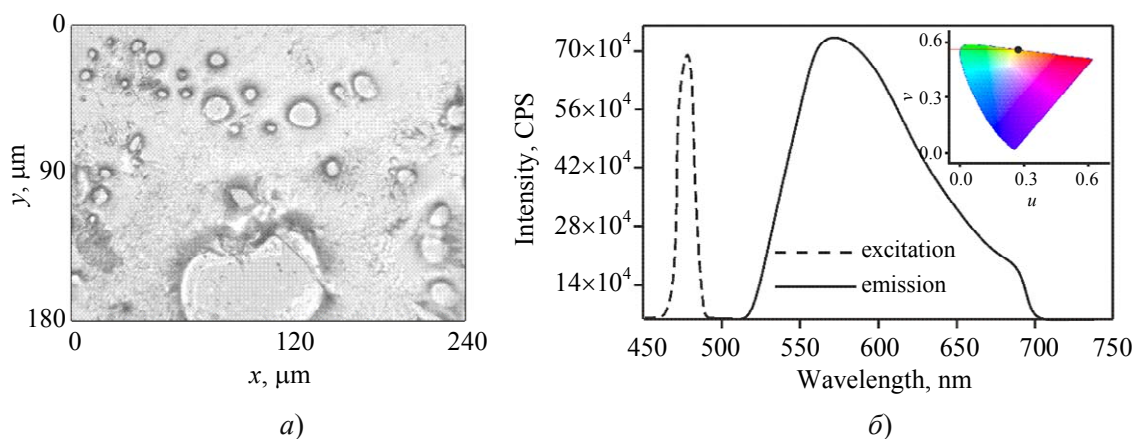


Рис. 2. Микротметрия поверхности иодида меди (а) и спектры возбуждения и люминесценции Cu(I)(б)

В полученном ИК-спектре зафиксированы полосы, лежащие в диапазоне  $1605,3$ – $1447,2$   $\text{cm}^{-1}$  и являющиеся характерными для колебания ароматического кольца, входящего в состав 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазола, а также трифенилфосфина. Важно отметить, что полоса  $1542,6$   $\text{cm}^{-1}$  обладает большей интенсивностью в сравнении с полосами, лежащими до нее, что свойственно именно для колебаний ароматического цикла. Также в спектре можно заметить незначительное смещение пика, характерного для связи  $\text{Cu(I)}-\text{P}$   $1095,2$   $\text{cm}^{-1}$ , возникающего вследствие образования координационной связи молекулы меди с донорным атомом фосфора трифенилфосфина. Ввиду техниче-

ских характеристик прибора запись сигналов с интенсивностью менее  $400$   $\text{cm}^{-1}$  невозможна, однако потенциально в данной области должны содержаться характерные колебания по связям  $\text{Cu(I)}-\text{I}$ , а также  $\text{Cu(I)}-\text{N}$  (рис. 1).

Проводящие и фотоэлектрические свойства исследуемых структур измерялись при помощи анализатора полупроводников Keysight B1500A с использованием экранирующей камеры («клетка Фарадея»). В качестве источника освещения использовалась интегрированная в камеру светодиодная матрица, спектр излучения которой представлен на рисунке 3а. Общая приходящая мощность на образец составила приблизительно  $60$  мВ, а плотность ее потока – порядка  $300$   $\text{В}/\text{м}^2$ .

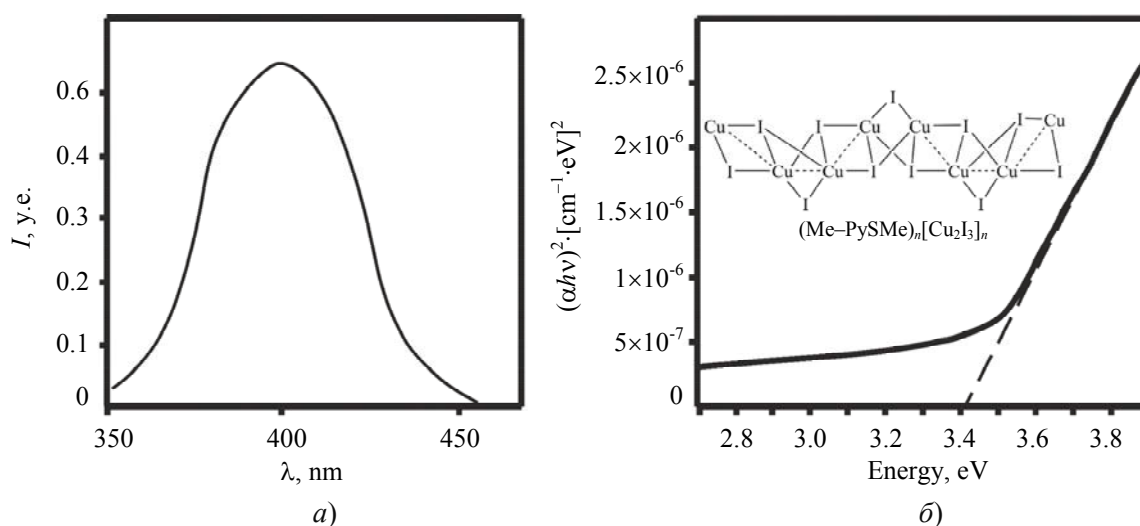


Рис. 3. а) – спектр излучения LED матрицы, б) – оптическая ширина запрещенной зоны иодида меди

Для учета смещения фундаментальной полосы поглощения было выдвинуто предположение о поглощении зона-зона при косвенных разрешенных переходах с коэффициентом 2 [17, 18].

$$ah\nu = A(h\nu - E_g)^m, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $A$  – константа,  $h\nu$  – энергия оптического кванта,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны материала.

Оценка влияния атомарности стехиометрии молекул  $\text{Cu(I)}$  на смещение края фундаментального поглощения и изменения ширины запрещенной зоны металлоорганического

полупроводника показала значение  $3,4$  эВ (рис. 3б). По данным ТГА (рис. 4а) установлено, что в интервале температур  $180$ – $200$   $^\circ\text{C}$ , происходит потеря массы вплоть до  $55$  %, сопровождающаяся эндотермическим эффектом. Это соответствует удалению координированной молекулы воды. Соединение термически стабильно до температуры  $350$   $^\circ\text{C}$ . Нагревание выше  $350$   $^\circ\text{C}$  приводит к медленному разложению образца. Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о термической стабильности соединения 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин) иодид меди вплоть до  $180$   $^\circ\text{C}$ .

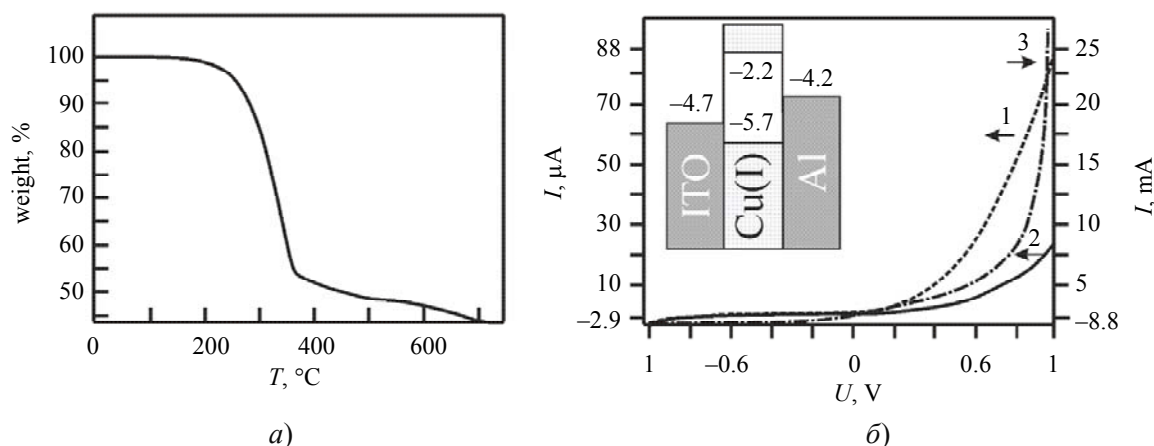


Рис. 4. Термогравиметрическое исследование полученного соединения Cu(I) (а); Темновые (2) и световые (1) вольтамперные характеристики структуры ITO–Cu(I)–Al (б)

Исследование проводящих свойств, в том числе фотопроводимости, осуществлялось посредством анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения проводились в диапазоне напряжений от  $-1$  до  $1$  В. На рисунке 4б представлены темновые и световые ВАХ структуры ITO–Cu(I)–Al (кривые 1 и 2), в контактной системе ITO–Al (кривая 3). Общий вид зависимостей тока от напряжения – нелинейный, несимметричный и в пределах экспериментального цикла стабильный. Световое воздействие ультрафиолетовым излучением на структуру Al–Cu(I)–ITO привело к увеличению силы тока при прямом направлении с  $25 \mu\text{A}$  до  $88 \mu\text{A}$  за счет генерации фотоиндуцированных носителей заряда в цепочке меди, «легированной» йодом (вкладка рис. 3б [19]).

ширины запрещенной зоны показала значение  $3,4$  эВ. Фотоэлектрические характеристики системы Al–Cu(I)–ITO, в сравнении с темновыми ВАХ, показали увеличение прямых токов с  $25 \mu\text{A}$  до  $88 \mu\text{A}$  под действием УФ-излучения. Подробные фотохимические механизмы, ответственные за большое изменение электропроводности, вызванное ультрафиолетовым излучением в полимере, кажутся очень сложными и станут предметом будущих исследований.

Исследование выполнено за счёт гранта  
Российского научного фонда № 25-22-20022  
и региона Крым.

### Заключение

В данной работе были исследованы фотоэлектрические и спектральные свойства тонких плёнок соединения 2-(4-перидил)-5-фенил-1,3,4-оксадиазолий (трифенилфосфин)идид меди. Исследование спектров в ИК-диапазоне показало наличие множества пиков поглощения, соответствующих данному классу веществ. По результатам исследований люминесцентных свойств наглядно продемонстрирована перспектива применения Cu(I) в качестве активных переизлучающих слоёв, квантовая эффективность данного материала составляет  $55,84\%$ . Максимум возбуждения такого комплекса наблюдался при длине волны  $465$  нм и соответствующем переизлучении в диапазоне  $510$ – $740$  нм. Оценка оптической

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mirzadeh N., Privér S. H., Blake A. J., Schmidbaur H., Bhargava S. K. / Chemical Reviews. 2020.
2. Yang Z., Mao Z., Xie Z., Zhang Y., Liu S., Zhao J., Aldred M. P. / Chemical Society Reviews. 2017. Vol. 46. P. 915–1016.
3. Wang W., Zhang Y., Jin W. J. / Coordination Chemistry Reviews. 2020. Vol. 404. P. 213107.
4. Li H.-Y., Zhao S.-N., Zang S.-Q., Li J. / Chemical Society Reviews. 2020.
5. Liu Y., Yiu S.-C., Ho C.-L., Wong W.-Y. / Recent advances in copper complexes for electrical/light energy conversion. 2018. Vol. 375. P. 514.
6. Tsuge K., Chishina Y., Hashiguchi H., Sasaki Y., Kato M., Ishizaka S., Kitamura N. / Coordination Chemistry Reviews. 2016. Vol. 306. P. 636–651.
7. Bissessar D., Thierry T., Egly J., Giuso V., Achard T. / Symmetry. 2023. Vol. 15. P. 1210.
8. Yam V. W.-W., Au V. K.-M., Leung S. Y.-L. / Chemical Reviews. 2015. Vol. 115. P. 7589–7728.

9. Hashimoto M., Igawa S., Yashima M., Kawata I., Hoshino M., Osawa M. / Journal of the American Chemical Society. 2011. Vol. 133. P. 10348–10351.
10. Gusev A., Kiskin M., Braga E., Zamnius E. / Royal Society of Chemistry RSC Advances January. 2013. Vol. 13. P. 3899–3909.
11. Jiang H., Hu W. / Angewandte Chemie International Edition. 2018. Vol. 59. P. 1408–1428.
12. Dobužinskas R., Poškus A., Viliūnas M., Jankauskas V., Daškevičienė M., Getautis V., Arlauskas K. / Physica Status Solidi. 2019.
13. Ahmad Z., Zafar Q., Sulaiman K., Akram R., Karimov K. / Sensors. 2013. Vol. 13. P. 3615–3624.
14. Gusev A. N., Mazinov A. S., Tyutyunik A. S., Baryshnikov G. V. / Tech. Phys. 2021. Vol. 66. P. 84–92.
15. Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S., Braga E. V. / Tech. Phys. Lett. 2019. Vol. 45. P. 997–1000.
16. Gusev A., Braga B., Zamnius E., Kiskin M., Ali A., Baryshnikov G., Linert W. / Dalton Trans. 2023. Vol. 52. P. 14995–15008.
17. Saravanan S., Anantharaman M. R., Venkatachalam S., Avasthi D. K. / Vacuum. 2007. Vol. 82. P. 56–60.
18. Gusev A. N., Mazinov A. S., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S. / Radio Electronics, Nanophysics and Information Technologies. 2019. Vol. 11. P. 331–336.
19. Strelnik I. D., Kolesnikov I. E., Kalinichev A. A., Gerasimova T. P., Akhmadgaleev K. D., Dayanova I. R., Karasik A. A. / Mendeleev Communications. 2024. Vol. 34. P. 457–471.

PACS: 73.61.–r, 81.07.Pr

## Increase in conductivity in 2-(4-peridil)-5-phenyl-1,3,4-oxadiazolium (triphenylphosphine) copper iodide films when exposed to UV radiation

A. S. Tyutyunik\*, V. B. Orlenson, A. S. Mazinov and A. N. Gusev

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, 295007 Republic of Crimea Russia*

\*E-mail: tyutyunikas@mail.ru

*Received 9.06.2025; revised 23.06.2025; accepted 5.06.2025*

***The paper presents a study of optical, luminescent and electrical characteristics of organometallic compounds based on copper iodide, the method of obtaining, microscopy, and the results of IR spectroscopy of thin-film structures. The results of the current-voltage characteristics of Cu(I) in the ITO–Al contact system are presented. As a result of the analysis of the current-voltage characteristics, it was demonstrated that thin films of copper iodide have rectifying light characteristics under the action of ultraviolet radiation. It is shown that irradiation of experimental structures with electromagnetic radiation of the UV range led to an increase in direct currents by 3.5 times.***

***Keywords:*** thin films; volt-amp characteristics; quantum efficiency; copper iodide.

### REFERENCES

1. Mirzadeh N., Privér S. H., Blake A. J., Schmidbauer H. and Bhargava S. K., Chemical Reviews (2020).
2. Yang Z., Mao Z., Xie Z., Zhang Y., Liu S., Zhao J. and Aldred M. P., Chemical Society Reviews **46**, 915–1016 (2017).
3. Wang W., Zhang Y. and Jin W. J., Coordination Chemistry Reviews **404**, 213107 (2020).
4. Li H.-Y., Zhao S.-N., Zang S.-Q. and Li J., Chemical Society Reviews (2020).
5. Liu Y., Yiu S.-C., Ho C.-L. and Wong W.-Y., Recent advances in copper complexes for electrical/light energy conversion **375**, 514 (2018).
6. Tsuge K., Chishina Y., Hashiguchi H., Sasaki Y., Kato M., Ishizaka S. and Kitamura N., Coordination Chemistry Reviews **306**, 636–651 (2016).
7. Bissessar D., Thierry T., Egly J., Giuso V. and Achard T., Symmetry **15**, 1210 (2023).
8. Yam V. W.-W., Au V. K.-M. and Leung S. Y.-L., Chemical Reviews **115**, 7589–7728 (2015).
9. Hashimoto M., Igawa S., Yashima M., Kawata I., Hoshino M. and Osawa M., Journal of the American Chemical Society **133**, 10348–10351 (2011).

10. Gusev A., Kiskin M., Braga E. and Zamnius E., Royal Society of Chemistry RSC Advances January **13**, 3899–3909 (2013).
11. Jiang H. and Hu W., Angewandte Chemie International Edition **59**, 1408–1428 (2018).
12. Dobužinskas R., Poškus A., Viliūnas M., Jankauskas V., Daškevičienė M., Getautis V. and Arlauskas K., Physica Status Solidi (2019).
13. Ahmad Z., Zafar Q., Sulaiman K., Akram R. and Karimov K., Sensors **13**, 3615–3624 (2013).
14. Gusev A. N., Mazinov A. S., Tyutyunik A. S. and Baryshnikov G. V., Tech. Phys. **66**, 84–92 (2021).
15. Gusev A. N., Mazinov A. S., Shevchenko A. I., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S. and Braga E. V., Tech. Phys. Lett. **45**, 997–1000 (2019).
16. Gusev A., Braga B., Zamnius E., Kiskin M., Ali A., Baryshnikov G. and Linert W., Dalton Trans. **52**, 14995–15008 (2023).
17. Saravanan S., Anantharaman M. R., Venkatachalam S. and Avasthi D. K., Vacuum **82**, 56–60 (2007).
18. Gusev A. N., Mazinov A. S., Tyutyunik A. S. and Gurchenko V. S., Radio Electronics, Nanophysics and Information Technologies **11**, 331–336 (2019).
19. Strel'nik I. D., Kolesnikov I. E., Kalinichev A. A., Gerasimova T. P., Akhmadgaleev K. D., Dayanova I. R. and Karasik A. A., Mendeleev Communications **34**, 457–471 (2024).

#### Об авторах

**Тютюник Андрей Сергеевич**, к.ф.м.-н., младший научный сотрудник, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Физико-технический институт (295007, Россия, Республика Крым, Симферополь, просп. Вернадского, 4). E-mail: tyutyunikas@mail.ru SPIN-код: 9764-5385, AuthorID: 1029125, orcid.org/0000-0002-8270-3820, Scopus ID: 57211513819

**Орленсон Вульф Борисович**, младший научный сотрудник, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Крымская астрофизическая обсерватория (295007, Россия, Республика Крым, Симферополь, просп. Вернадского, 4).

**Мазинов Алим Сейт-Аметович**, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой радиофизики и электроники, доцент, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Физико-технический институт (295007, Россия, Республика Крым, Симферополь, просп. Вернадского, 4). E-mail: mazinovas@cfuv.ru SPIN-код: 7412-4956, AuthorID: 754027, orcid.org/0000-0001-8015-8841

**Гусев Алексей Николаевич**, д.х.н., заведующий кафедрой общей и физической химии, биолого-химический факультет, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Институт биохимических технологий, экологии и фармации (295007, Россия, Республика Крым, Симферополь, просп. Вернадского, 4). E-mail: galex0330@gmail.com SPIN-код: 7536-3490, AuthorID: 226531, orcid.org/0000-0001-5674-1519

## Применение нейросетевых методов в программно-аппаратные комплексы контроля оптических систем

© Ш. И. Зарипов<sup>1,2\*</sup>, А. В. Полесский<sup>1</sup>, Н. А. Семенченко<sup>1</sup>, О. А. Медведев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

\* E-mail: mail@tonyferro.com

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

Статья поступила в редакцию 21.05.2026; после доработки 1.06.2026; принята к публикации 5.06.2026

*Разработана интеллектуальная система для автоматизированного контроля параметров оптических систем – таких, как фокусное расстояние, разрешающая способность и дисторсия различных диапазонов спектра. Система базируется на архитектуре сверточных нейронных сетей семейства YOLO и специализированном аппаратно-программном комплексе. Разработанная автоматизированная система контроля параметров объективов работает в спектральных диапазонах 0,4–2,0 и 8–14 мкм. Комплекс перспективен для серийного выпуска оптики благодаря сокращению времени измерений, уменьшению трудозатрат.*

*Ключевые слова:* сверточная нейронная сеть, YOLO, система компьютерного зрения, обнаружение объектов, оптика, объективы, автоматизация измерений, фокусное расстояние, дисторсия, разрешающая способность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-82-90

### Введение

Производство оптических систем (далее – ОС) включает в себя этап контроля выходных параметров конечной продукции, к которым относятся фокусное расстояние, дисторсия и разрешающая способность, являющиеся ключевыми в характеристике ОС для работы в составе оптико-электронного прибора [1].

Целевая задача внедрения систем искусственного интеллекта в технологическую цепь производства объективов для различных систем технического зрения заключается в наращивании отечественного производства при уменьшении себестоимости продукции за счет создания автоматизированных систем, позволяющих проводить более быстрые и точные измерения оптических параметров с минимизацией человеческого фактора.

Современная отечественная метрологическая база, используемая для производства ОС, включает в себя методы контроля параметров ОС, однако не подразумевает автоматизацию, что порождает несколько проблем: длительный цикл производства, низкая производительность труда при серийном выпуске и субъективность в измерениях.

Для проведения автоматизированного измерения фокусного расстояния, дисторсии и разрешающей способности с использованием методов искусственного интеллекта необходимо было решить следующие задачи:

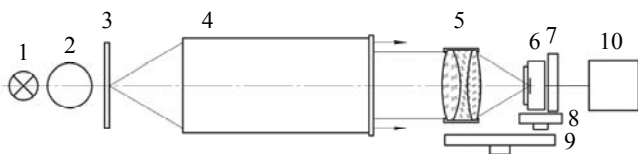
1. Разработка алгоритмов автопозиционирования и автофокусирования ОС;
2. Разработка нейронной сети для распознавания контрольных точек тест-объекта, которая будет использоваться для измерения фокусного расстояния и дисторсии ОС, а также при автопозиционировании;

3. Разработка нейронной сети для распознавания групп штрихов тест-объекта, необходимой для определения разрешающей способности ОС;

4. Разработка алгоритмов проведения анализа и выполнения необходимых расчетов для определения значений фокусного расстояния, разрешающей способности и дисторсии ОС.

### Техническая реализация

Отправной точкой для разработки системы контроля с применением методов искусственного интеллекта стал ряд методик измерений и техническая реализация прецизионной измерительной установки, предназначенной для проведения измерений фокусного расстояния, дисторсии и разрешающей способности в двух спектральных диапазонах: 0,4–2,0 мкм и 8–14 мкм. Обобщенная схема измерений приведена на рисунке 1.



**Рис. 1. Обобщенная схема измерений значений фокусного расстояния, дисторсии и разрешающей способности ОС: 1 – источник излучения; 2 – фотометрическая сфера (для спектрального диапазона 0,4–2,0 мкм); 3 – тест-объект; 4 – коллиматор; 5 – контролируемый объектив; 6 – матричное фотоприемное устройство; 7 – двухосный линейный транслятор; 8 – линейный транслятор; 9 – поворотная платформа; 10 – ПК с ПО**

Спектральный диапазон работы стенда определяется в первую очередь видом используемого источника излучения и матричного фотоприемника. Источник излучения 1 представляет из себя модель абсолютно черного тела (АЧТ) для спектрального диапазона 8–14 мкм и узел освещения с лампой накаливания для спектрального диапазона 0,4–2,0 мкм. При работе в спектральном диапазоне 0,4–2,0 мкм при необходимости может использоваться фотометрическая сфера 2 для обеспечения равномерного распределения излучения в плоскости тест-объекта. В то же время вместо фотометрической сферы может использоваться конструкция узла освещения, выпол-

няющая аналогичную функцию. В качестве матричного фотоприемника 6 для регистрации изображения в фокальной плоскости контролируемого объектива в стенде поочередно используются неохлаждаемый микроболометр и SWIR-камера, включающая работу в видимом диапазоне – для контроля объективов соответствующих спектральных диапазонов. Используемые тест-объекты 3 представляют собой набор специально разработанных миш, включающих в себя группы штрихов для определения разрешающей способности и реперные точки для определения фокусного расстояния и дисторсии. Для формирования параллельного пучка лучей, имитирующего расположение объекта в бесконечности, используется коллиматор 4. Для обеспечения измерения разрешающей способности в технической реализации стенда используется проекционная вспомогательная оптическая система, она необходима для решения проблемы соизмеримости размеров шага матрицы и изображения штрихов.

В качестве объектов интереса для автоматизации с помощью нейросетевых методов выбраны методы измерений, принцип которых основан на следующем:

– метод измерений фокусного расстояния объективов основан на классическом методе увеличений: линейное увеличение оптической системы, состоящей из объектива коллиматора и контролируемого объектива, является одновременно отношением размеров предмета и его изображения и отношением фокусных расстояний контролируемого объектива и объектива коллиматора, в связи с чем фокусное расстояние объектива  $f'_{к.о}$  определяется по одной из формул, в зависимости от того, известно ли фокусное расстояние коллиматора с достаточной точностью, либо же путем измерения угловых размеров тест-объектов с помощью теодолита:

$$f'_{к.о} = f'_{кол} \cdot \frac{y'}{y}, \quad f'_{к.о} = \frac{y'}{\text{tg}\varphi}, \quad (1)$$

где  $f'_{кол}$  – фокусное расстояние объектива коллиматора, мм;  $y$  – линейный размер тест-объекта, мм;  $y'$  – линейный размер изображения тест-объекта, мм;  $\varphi$  – угловой размер тест-объекта, град.;

– метод измерений разрешающей способности объективов основан на определении предельно разрешаемой штриховой меры через контролируемый объектив, которой соответствует наименьшее разрешаемое расстояние между серединами двух соседних светлых (темных) штрихов штриховой меры; искомое значение предела разрешающей способности  $R_{к.о}$ , лин/мм, определяется в соответствии с угловым размером элемента предельно разрешаемой меры  $\bar{\varphi}$ , град., по формуле

$$R_{к.о} = \frac{1}{f'_{к.о} \cdot \text{tg}\bar{\varphi}}; \quad (2)$$

– метод измерений дисторсии объективов основан на измерении отклонения координаты изображения точки от расчетного значения при повороте объектива с помощью поворотной платформы 9, соответствующему отклонению положения изображения объекта на краю поля объектива (по полю объектива), возникающего из-за дисторсии ОС; значение дисторсии  $\nu$ , %, при этом вычисляется по формуле

$$\nu = \frac{y' - l}{l} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $l = f'_{и.о} \cdot \text{tg} \omega$  – расчетное значение перемещения изображения тест-объекта, мм, при повороте объектива на угол  $\omega$ , град.;  $y'$  – фактическое перемещение изображения тест-объекта, мм.

Управление системой осуществляется через интерфейс разработанного ПО, реализующего протоколы взаимодействия с контроллерами шаговых двигателей, и захват видеопотока в режиме реального времени.

### Автоматическое позиционирование и фокусирование

Базовыми функциями автоматизированной системы являются возможность автоматической фокусировки и совмещения центра тест-объекта с центром матрицы фотоприемного устройства. Данные процессы происходят при подготовке к измерениям оптических

параметров на стенде следующим образом: выполняется автоматическое позиционирование изображения тест-объекта в центр матричного фотоприемника с помощью двухосного линейного транслятора 7 (см. рис. 1), после чего происходит автоматическое фокусирование с помощью линейного транслятора 8.

Фокусировка системы – совмещение фокальной плоскости контролируемого объектива и плоскости предметов вспомогательной проекционной ОС – важна для корректной работы системы и для повышения точности приводимых измерений. Для автоматизации этого процесса в системе применен способ оценки резкости методом Таненграда [2], основанного на анализе градиентов яркости изображения. Идея метода следующая: чем больше резкость изображения, тем сильнее перепады яркости (границы объектов) и, соответственно, больше значения градиента. Этот метод базируется на операторе Собеля и демонстрирует высокую помехоустойчивость в ИК кадрах с повышенным шумовым фоном [3]. Соответственно, алгоритм автоматической фокусировки сводится к перебору диапазона линейного транслятора, отвечающего за фокусировку, с определенным оператором шагом. На каждой остановке происходит считывание кадра и расчет значения резкости методом Таненграда. Наибольшее значение запоминается системой и в конце, пройдя весь диапазон, линейный транслятор выставляется в положение с наибольшим значением градиента.

Позиционирование системы происходит в два этапа: калибровка осей – расчет количества шагов двигателей, необходимых для прохождения 1 мм линейными трансляторами; сдвиг по каждой из осей до центральной точки изображения. Калибровка осей происходит с помощью таблицы юстировки – набора корректировок для точной настройки положения. Система с помощью нейронной сети распознает центр тест-объекта, запоминает начальное положение, затем оси сдвигаются на 1 мм и выполняется повторное распознавание для определения конечного положения, далее вычисляется разница между двумя положениями – расстояние в пикселях, которое проходит система при физическом сдвиге оси на 1 мм. Причем сдвиг выполняется в несколько итераций и не только на 1 мм для более точной калибровки. Определив, какое требуется пройти

расстояние на физическом уровне, чтобы свети центр тест-объекта в центр матрицы изображения, система сдвигает оси.

### Разработка нейросетевых моделей

Современный прогресс в области нейронных сетей демонстрирует возможность их использования даже со слабыми вычислительными ресурсами [4, 5], что, несомненно, закладывает в них потенциал широкого внедрения в измерительное оборудование. Это открывает путь к созданию интеллектуальных установок, способных выполнять быстрый и точный анализ данных непосредственно в процессе их получения, обеспечивая оперативное принятие решений без значительных задержек. Благодаря этому повышается эффективность работы систем в условиях ограниченного времени и ресурсов, а также снижается зависимость от внешней вычислительной инфраструктуры. Такие установки могут адаптироваться к изменяющимся условиям среды и обеспечивать высокий уровень автоматизации всего производства в целом. В результате расширяется спектр их применения – от единичных измерений до условий серийного производства.

Существующие классические не-нейросетевые методы также построены на анализе изображения (в том числе путем вычисления сверток), но не приспособлены к многоэтапным измерениям и требуют разработки сложных алгоритмов, что особенно трудно реализуемо в универсальных установках, приспособленных для проведения измерений различных оптических систем, отличающихся,

например, по спектральным диапазонам или фокусным расстояниям.

С учетом требований к системе был проведен анализ семейств нейросетевых архитектур [6–12]. Для решения задачи распознавания контрольных точек и групп штрихов рассматривались современные одностадийные архитектуры, так как они обеспечивают наилучшее соотношение скорости и точности при выполнении вычислений на центральном процессоре без использования дискретного графического ускорителя. Среди них выделяются три основных направления: классические детекторы, современные универсальные модели и сверхлегкие мобильные архитектуры. Также выделяются трансформерные модели, являющиеся наиболее актуальным направлением в компьютерном зрении. Несмотря на их высокую точность, они не рассматривались для данной системы из-за чрезмерной требовательности к ресурсам процессора. В условиях ограниченной производительности такие архитектуры работают значительно медленнее сверточных аналогов. Тем не менее, для полноты анализа трансформерные модели включены в сравнительную характеристику архитектур, приведенную в таблице 1.

На основании проведенного анализа установлено, что современные одностадийные архитектуры семейства YOLO обеспечивают наилучшее соотношение точности локализации мелких объектов, вычислительной сложности и простоты интеграции. В отличие от трансформерных моделей они демонстрируют стабильную работу в режиме реального времени на целевом оборудовании, что обусловило их выбор для реализации системы.

Таблица 1

Сравнительная таблица одностадийных нейросетевых архитектур

Архитектура	Представители	Точность для мелких объектов	Сложность интеграции в систему	Используется в режиме реального времени
Сверхлегкие	PicoDet, NanoDet	Средняя	Средняя	Да
Классические одностадийные	SSD, RetinaNet	Средняя	Низкая	Ограниченно
Современные универсальные	YOLO	Высокая	Низкая	Да
Трансформерные	RT-DETR	Высокая	Средняя	Ограниченно

Для обучения нейросетевых моделей отснято более 8 000 изображений видимого с коротковолновым (0,4–2,0 мкм) и длинноволнового (8–14 мкм) ИК диапазонов спектра для объективов с фокусными расстояниями 10 мм и 35 мм.

Отработка нейросетевой модели при проведении измерений разрабатываемых объективов с известными значениями фокусов проводилась с использованием специально разработанных мир, ширина штрихов которых соответствует увеличению, создаваемому системой «контролируемый объектив – объектив коллиматора» для того, чтобы изображение тест-объектов было хорошо различимо и читаемо, что требуется не только для получения достоверных результатов измерения, но и для стабильной работы нейросетевой модели. При этом данные миры могут использоваться для контроля объективов с другими фокусными расстояниями при условии сохранения качества изображения.

Для обучения нейронной сети проводилась следующая разметка тест-объектов (см. рис. 2): красный цвет – метки для измерения фокусного расстояния; голубой цвет – центр штриховой миры, используется для позиционирования и для измерения дисторсии; зеленый цвет – группы штрихов для определения предела разрешающей способности. При этом координаты областей интересов вычисляются посредством нахождения геометрического центра.

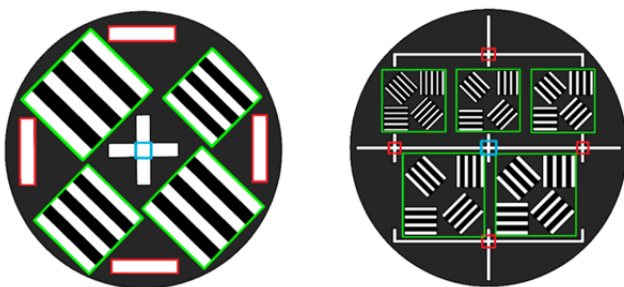


Рис. 2. Разметка штриховых мир (слева – для ОС с  $f' = 10$  мм, справа –  $f' = 35$  мм)

Каждая выделенная зеленым цветом группа штрихов имеет свое значение пространственного разрешения с шагом в 5 лин/мм и соответствующая фокусному расстоянию контролируемого объектива, которое оператор устанавливает в программе. Группы на мире справа из рис. 2 расположены в порядке воз-

растания, сверху вниз. На левой мире – группы штрихов расположены «крест-накрест»: самая маленькая по размеру группа имеет самое маленькое пространственное разрешение, далее идет группа, расположенная диаметрально противоположно к первой, следующая группа располагается левее от второй, и, наконец, последняя группа – самая большая и, соответственно, имеющая самое большое пространственное разрешение. Анализ и вычисление результатов происходят с учетом данных особенностей расположения групп на координатных осях матрицы изображения.

Для повышения робастности обучаемых нейросетевых моделей [13] применены методы аугментации [14]: геометрические трансформации (вращение, масштабирование), изменение яркости и контрастности для имитации температурного дрейфа.

Хотя обученные на этих данных нейросетевые модели успешно демонстрируют свойство запоминания образов штриховых мир, потенциал улучшения набора данных и создания алгоритмов предобработки изображений для улучшения точности и увеличения скорости отработки моделей не исчерпан. Глубокая модификация алгоритмов предобработки изображений требует отдельного исследования и не рассматривалась на данном этапе.

## Оценка работы моделей

При обучении нейросетевых моделей были использованы различные модификации YOLO, начиная с 8-го поколения до 26-го, в различных конфигурациях: от наиболее компактных и быстрых (Nano) до массивных (Large). Обучение проводилось при варьировании гиперпараметров и условий среды. Наилучших результатов удалось достичь при выборе моделей средней размерности: YOLOv8m – для задачи обнаружения контрольных точек; YOLO26m – для распознавания штриховых групп мир.

Для оценки качества работы моделей использовался набор метрик, позволяющий оценить как правильность распознавания объектов, так и точность их «обводки» рамкой. Чтобы интерпретировать эти показатели, необходимо понимать четыре возможных сценария работы нейросети:

1. True Positive (TP) – истинно положительный результат: нейросеть правильно распознала объект там, где он есть;

2. False Positive (FP) – ложно положительный результат: «ложная тревога», нейросеть приняла за объект пустой участок или помеху;

3. False Negative (FN) – ложно отрицательный результат: пропуск цели, когда нейросеть не заметила существующий объект;

4. True Negative (TN) – истинно отрицательный результат: нейросеть верно определила, что на пустом участке ничего нет (в задачах обнаружения объектов этот параметр обычно не учитывается, так как количество «пустых» зон в кадре бесконечно велико).

На основе этих сценариев рассчитываются ключевые метрики, представленные в таблице 2:

– Точность (Precision) — это доля реальных объектов среди всех, которые нейросеть пометила как найденные. Высокая точность означает, что система практически не допускает «ложных тревог». Она рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}; \tag{4}$$

– Полнота (Recall) — это доля найденных объектов от их общего реального количества. Высокая полнота говорит о том, что система находит почти все объекты и минимизирует пропуски. Рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}; \tag{5}$$

Для оценки качества локализации используется коэффициент IoU (Intersection over Union) – отношение площади пересечения

предсказанной и эталонной рамок к площади их объединения (0 = нет перекрытия, 1 = идеальное совпадение).

Центральным показателем эффективности является mAP (mean Average Precision) – средняя точность, которая объединяет в себе показатели точности и полноты. В зависимости от строгости требований к локализации (наложению рамок) выделяют две модификации:

– mAP@0,5: рассчитывается при условии, что объект считается найденным (TP), если площадь перекрытия предсказанной и эталонной рамок составляет не менее 50 %. Этот показатель характеризует общую способность модели распознавать объекты;

– mAP@0,5:0,95: представляет собой усредненное значение при различных порогах IoU (от 50 % до 95 % с шагом 5 %). Данный показатель является более жестким и критичным к качеству подгонки границ рамки, позволяя оценить устойчивость модели к геометрическим погрешностям и точности определения координат объекта.

Таким образом, модель YOLOv8m продемонстрировала высокое качество обнаружения контрольных точек (mAP@0,5 = 0,975), обеспечив высокие значения точности и полноты. Это означает, что в 97,5 % случаев система корректно находит, классифицирует и определяет местоположение контрольной точки на изображении, допуская лишь минимальный процент ошибок в виде пропусков или ложных срабатываний. При этом показатель mAP@0,5:0,95 оказался ниже, что свидетельствует о меньшей точности локализации объектов при строгих IoU-порогах. Следует отметить, что эффективность системы может быть повышена за счет разработки и интеграции алгоритмов дополнительного анализа и поиска центров контрольных точек, но исследование данной возможности остается за рамками данной статьи.

Таблица 2

Результаты обучения нейросетевых моделей

Задача	Модель	Precision (точность)	Recall (полнота)	mAP@0,5	mAP@0,5:0,95
Распознавание контрольных точек тест-объекта	YOLOv8m	0,956	0,955	0,975	0,598
Распознавание штрихов мир тест-объекта	YOLO26m	0,813	0,932	0,874	0,737

Модель YOLO26m при распознавании штрихов показала более низкую точность классификации ( $mAP@0,5 = 0,874$ ), однако обеспечила лучшую устойчивость локализации объектов, что подтверждается более высоким значением  $mAP@0,5:0,95$ . Иными словами, модель верно обнаруживает и классифицирует группы штрихов в 87,4 % случаев.

Таким образом, использование комбинации данных моделей позволяет эффективно решать комплексную задачу контроля параметров оптических систем. Несмотря на различия в характере ошибок достигнутые показатели точности для каждой из подзадач формируют достаточную базу для корректной работы системы в целом, обеспечивая необходимый баланс между обнаружением ключевых точек и стабильностью распознавания штриховых групп.

### Заключение

Разработанная автоматизированная система контроля параметров объективов, основанная на двух нейросетевых моделях (YOLOv8m – для измерения фокусного расстояния и дисторсии; YOLO26m – для измерения разрешения) позволяет проводить контроль параметров оптических систем различных диапазонов спектра (0,4–2,0 и 8–14 мкм).

Преимуществом данной системы является быстрота, точность, независимость от человеческого фактора, благодаря чему применение системы особенно актуально в условиях серийного выпуска оптических систем. Система продемонстрировала снижение трудозатрат при выполнении измерений: при проверке всех параметров объективов (фокусного расстояния, дисторсии и разрешающей способности) с помощью данной интеллектуальной системы требуется менее 15 минут, когда при измерении вручную у человека-оператора может потребоваться более 60 минут.

Первая нейросетевая модель на основе YOLOv8m находит контрольные точки практически идеально: в 97,5 % случаев они распознаются абсолютно верно. Это высокий показатель, который говорит о том, что ошибки при поиске точек почти исключены.

При распознавании штрихов тест-объекта вторая модель на основе YOLOv26m показы-

вает точность чуть ниже – 87,4 %. Это означает, что в 87,4 % случаев система правильно понимает, что перед ней именно группа штрихов и верно выделяет ее. При этом итоговая погрешность измерений не превышает значений, установленных методикой измерения.

Система была отлажена и протестирована на компьютере без дискретного графического ускорителя. При выполнении нейросетевых вычислений использовался центральный процессор. Несмотря на это система обеспечивает проведение быстрых измерений с требуемой точностью, что свидетельствует о правильности выбранных моделей и подходов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения: учебник для вузов по специальности «Оптические приборы и установки» / Под ред. Пуряева Д. Т. – М.: Машиностроение, 1987.
2. Sun Y., Duthaler S., Nelson B. J. / *Microscopy Research and Technique*. 2004. V. 65. № 3. P. 139–149.
3. Гашиников М. В. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфера В. А. Изд. 2, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. ISBN 5-9221-0270-2
4. Liu H.-I. et al. / *ACM Computing Surveys*. 2024. V. 57. № 6. P. 1–42. <https://doi.org/10.1145/3657282>.
5. Bouguettaya A., Kechida A., Taberkit A. M. / *International Journal of Informatics and Applied Mathematics*. 2019. V. 2. № 2. P. 28–44.
6. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. / *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>.
7. Yaseen M. What is YOLOv8: An In-Depth Exploration of the Internal Features of the Next-Generation Object Detector / arXiv preprint. 2024. arXiv:2408.15857.
8. Liu W., Angelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S., Fu C.-Y., Berg A. C. / *Computer Vision – ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*. V. 9905. – Cham: Springer, 2016. P. 21–37. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2).
9. Mittal P. / *Artificial Intelligence Review*. 2024. V. 57. Art. 242. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10877-1>.
10. Lin T.-Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. / *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. P. 2980–2988. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>.
11. Андриянов Н. А., Дементьев В. Е., Таулинский А. Г. / *Радиотехника и электроника*. 2022. Т. 67. № 10. С. 1015–1034.
12. Zhao Y., Lv W., Xu S., Wei J., Wang G., Dang Q., Liu Y., Chen J. / *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2024. P. 16965–16974. arXiv:2304.08069.
13. ГОСТ Р 70462.1-2022. Информационные технологии. Интеллект искусственный. Оценка робаст-

ности нейронных сетей. Часть 1. Обзор. – М.: Стандарт-информ, 2022.

14. Емельянов С. О., Иванова А. А., Швец Е. А., Николаев Д. П. / Сенсорные системы. 2018. Т. 32. № 3. С. 236–245. <https://doi.org/10.1134/S0235009218030058>.

15. Padilla R., Netto S. L., da Silva E. A. B. / International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). IEEE. 2020. P. 237–242.

<https://doi.org/10.1109/IWSSIP48289.2020.9145130>.

PACS: 07.05.Mh; 42.30.Va; 42.62.Eh

## Neural network-based methods for optical system measurement

Sh. I. Zaripov<sup>1,2\*</sup>, A. V. Polesskiy<sup>1</sup>, N. A. Semenchenko<sup>1</sup>, and O. A. Medvedev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

\* E-mail: [mail@tonyfierro.com](mailto:mail@tonyfierro.com)

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

Received 21.05.2026; revised 1.06.2026; accepted 5.06.2026

*The paper presents theoretical research and the development results of an intelligent system for the automated inspection of optical system parameters, including focal length, resolving power, and distortion, across various spectral ranges. The system is based on the YOLO convolutional neural network architecture and a specialized hardware-software complex. By employing a neural network-based approach, the software complex performs measurements of optical parameters without continuous operator intervention. This makes the system highly promising for the mass production of optical devices, as it reduces time of measurement, decreases labor costs, and eliminates the impact of the human factor.*

*Keywords:* convolutional neural network, YOLO, computer vision system, object detection, optics, lenses, automated measurements, focal length, distortion, resolving power.

### REFERENCES

1. Kreopalova G. V., Lazareva N. L., and Puryaev D. T. Optical Measurements: A Textbook for Universities / Ed. Puryaev D. T. Moscow: Mashinostroenie, 1987.
2. Sun Y., Duthaler S., and Nelson B. J., Microscopy Research and Technique **65** (3), 139–149 (2004).
3. Gashnikov M. V. Methods of Computer Image Processing / Ed. Soifer V. A., 2nd ed. Moscow: FIZMATLIT, 2003.
4. Liu H.-I., et al., ACM Computing Surveys **57** (6), 1–42 (2024). <https://doi.org/10.1145/3657282>.
5. Bouguettaya A., Kechida A., and Taberkit A. M., International Journal of Informatics and Applied Mathematics **2** (2), 28–44 (2019).
6. Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779–788 (2016). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>.
7. Yaseen M. What is YOLOv8: An In-Depth Exploration of the Internal Features of the Next-Generation Object Detector, 2024. arXiv preprint. arXiv:2408.15857.
8. Liu W., et al. Computer Vision – ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science **9905**. Cham: Springer, 21–37 (2016). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2).
9. Mittal P., Artificial Intelligence Review **57**, Art. 242 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10877-1>.
10. Lin T.-Y., et al. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2980–2988 (2017). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.324>.
11. Andriyanov N. A., Dementiev V. E., and Tashlinskiy A. G., Journal of Communications Technology and Electronics **67** (10), 1015–1034 (2022).
12. Zhao Y., et al., Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 16965–16974 (2024). arXiv:2304.08069.

13. GOST R 70462.1-2022. Information technology. Artificial intelligence. Assessment of neural network robustness. Part 1. Overview. Moscow: Standartinform, 2022.
14. Emelyanov S. O., Ivanova A. A., Shvets E. A., and Nikolaev D. P., *Sensory Systems* **32** (3), 236–245 (2018). <https://doi.org/10.1134/S0235009218030058>.
15. Padilla R., Netto S. L., and da Silva E. A. B., *International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 237–242 (2020). <https://doi.org/10.1109/IWSSIP48289.2020.9145130>.

#### Об авторах

**Зарипов Шамиль Ильнурович**, инженер-программист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: mail@tonyferro.com

**Полесский Алексей Викторович**, д.т.н., директор по НИОКР, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: poleskiyav@orion-ir.ru SPIN-код РИНЦ 3992-4520, Author ID 571156

**Семенченко Наталья Александровна**, начальник отдела, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: nafara@mail.ru SPIN-код РИНЦ 8094-5126, Author ID 775858

**Медведев Олег Александрович**, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1). E-mail: om15032006@yandex.ru

УДК 620.197.5+ 57.087.1+ 57.033  
EDN: QBZHKY

PACS: 68.90.+g, 43.80.-n

**Биоцидные свойства двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода**© В. Я. Печеркин<sup>1\*</sup>, Л. М. Василяк<sup>1</sup>, Е. А. Дешева<sup>2</sup>, Н. Д. Новиков<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

\* E-mail: vpcherkin@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, 123007 РоссияСтатья поступила в редакцию 5.03.2026; после доработки 23.04.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 2.2.12; 2.6.6

*Проведены лабораторные испытания биоцидных свойств образцов из нержавеющей стали с защитным нанослоем из линейно-цепочечного углерода различных модификаций в условиях замкнутого объема воздуха при атмосферном давлении, влажности 100 % и комнатной температуре. Покрытия проявляли бактериостатическую активность к спорообразующим грамположительным бактериям вида *Bacillus pumilus*, не позволяющую данным микроорганизмам размножаться. В отношении вегетативных форм грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* все испытанные образцы проявляли бактерицидную активность, выражающуюся в практически полном подавлении их жизнеспособности на всех видах покрытий. В отношении грибов только один вид покрытия, допированный атомами лития, обладал антифунгальными свойствами, когда наблюдалось полное отсутствие роста грибов и отсутствие жизнеспособных единиц микромицетов.*

*Ключевые слова:* двумерно-упорядоченный линейно-цепочечный углерод, защитный нанослой, нержавеющая сталь, микромицеты, бактерии.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-91-97

**Введение**

В настоящее время углерод и новые композитные материалы на его основе представляют большой практический и научный интерес для всех отраслей деятельности человека. Долгое время активно исследовались только две аллотропные модификации углерода – графит и алмаз. В настоящее время хорошо изучены и описаны политипы алмаза и графита [1–3]. Если рассматривать алмаз – пространственный полимер углерода – как предельный случай парафинового ряда, а графит – плоскостной полимер – как предельный случай ароматического ряда, то далее логически предположить, что следующая форма будет представлять собою предельный случай ненасыщенного ряда, которую можно представить как линейный полимер, молекулы ко-

торого построены из полииновых либо из кулуеновых цепочек [4]. Возможность существования линейных полимеров углерода с *sp*-гибридизацией рассматривал еще в 1885 г. Байер. Он пытался осуществить синтез цепочечного углерода – полиина. Попытки получить одномерные нити полиина из тетраацетилена оказались неудачными из-за неустойчивости тетраацетилена [5]. В итоге продолжительных исследований Байер постулировал невозможность получения линейно-цепочечного углерода. Работы в этом направлении надолго прекратились. Однако, в 1960 г. в Институте элементоорганических соединений РАН (ИНЭОС) им. А. Н. Несмеянова была открыта третья кристаллическая аллотропная форма углерода, названная авторами карбин [6]. В дальнейшем были разработаны различные методы получения карбина [5, 7, 8, 9]. Следу-

ющим шагом стала модификация свойств поверхности при создании на ней тонких углеродных пленок либо слоистых пленочных структур, толщина которых может быть от микрон до долей микрона. Ориентацией цепочек молекул углерода можно управлять в процессе выращивания структур [10–12]. Такие пленочные структуры служат основой для построения элементной базы современной микро- и нано-электроники. Тонкие пленки могут выполнять и функциональные задачи упрочнения поверхности, изменения ее смачиваемости, коэффициента трения и др. При осаждении на поверхность твердого тела атомы углерода могут образовывать различные аллотропные модификации, отличающиеся типом гибридизации:  $sp^3$  и  $sp^2$  – этим типам соответствуют устойчивые модификации алмаз и графит;  $sp^1$  и  $sp^0$  – это метастабильные модификации линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) и ганцетрированного (ГЦК) углерода). При конденсации на поверхности цепочки сшиваются, образуя графитоподобный конденсат. При определенных условиях конденсации углеродных паров на поверхности могут образовываться пленки двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ), состоящие из линейных углеродных цепочек, ориентированных нормально к поверхности и образующих упорядоченные ансамбли [10–12]. ДУ ЛЦУ пленки – это упорядоченные ансамбли квантовых нитей, располагающиеся на расстоянии  $0,4 \div 0,5$  нм и потому слабо взаимодействующие друг с другом и обладающие уникальными электрофизическими свойствами. Встраивание дополнительных атомов в углеродные цепочки или сшивание цепочки полимерных молекул линейного углерода позволяет изменять как их физические свойства, так и биологическую активность.

Биомедицинские исследования с имплантатами с покрытиями линейно-цепочечного углерода показали отсутствие денатурации белков на его поверхности и исключительно низкий потенциал свертывания крови. Нанесение покрытий из ДУ ЛЦУ на поверхность придает ей исключительную тромборезистентность и позволяет улучшить биосовместимость медицинских имплантантов и устройств, уменьшает риск образования тромбов, отторжения имплантанта, развития воспаления [13]. Исследования также показали,

что карбин в виде нанопорошков обладает биоцидным действием на микроорганизмы различных видов, в частности на представителей аутомикрофлоры человека и условно патогенные микроорганизмы [14].

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных по влиянию покрытий из различных модификаций ДУ ЛЦУ на жизнеспособность микроорганизмов в воздухе при атмосферном давлении, влажности 100 % и комнатной температуре.

### Экспериментальная часть

Для исследований были изготовлены 16 образцов из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с размерами  $50 \times 25 \times 1$  мм. На поверхности 12 образцов ионно-плазменным методом синтезировался слой двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода (ДУ ЛЦУ) толщиной примерно 200 нм [10]. На поверхность 4 образцов слой наносился в присутствии водорода в остаточной атмосфере (ДУ ЛЦУ + H), на 4 образца слой наносился в присутствии азота (ДУ ЛЦУ + N), на 4 образцах слой был допирован атомами лития в инертной атмосфере (ДУ ЛЦУ + Li) и 4 образца использовались в качестве контрольных без покрытия. Испытания биоцидных свойств изготовленных образцов проводили с использованием представителей бактериальной и грибной флоры. В качестве бактериальных тест-культур использовали представителей грамтрицательной флоры – бактерии вида *Pseudomonas aeruginosa* и спорообразующие грамположительные палочки вида *Bacillus pumilus*, а в качестве культур микромицетов следующие виды грибов Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ): *Aspergillus niger van Tieghem* – ВКМ F – 1119; *Aspergillus terreus Thom* ВКМ F-1025; *Aspergillus oryzae (Ahlburg) Cohn* ВКМ F – 55; *Chaetomium globosum Kunze* ВКМ F – 109; *Paecilomyces varioti Bainier* ВКМ F – 378; *Penicillium funiculosum Thom* ВКМ F – 1115; *Penicillium chrysogenum Thom* ВКМ F – 245; *Penicillium cyclopium Westling* ВКМ F – 265; *Trichoderma viride Pers. ex Fr.* ВКМ F – 426. На два образца из каждой группы наносились микрокапли подготовленной бактериальной суспензии с количеством бактерий от  $1 \times 10^6$  до  $4 \times 10^6$  КОЕ. На два образца из каждой группы

наносились капли суспензии спор грибов. Суспензия приготавливалась путем смешивания суспензий каждого вида грибов в равных частях. Далее все образцы с нанесенной суспензией помещались в замкнутый герметичный объем с атмосферным давлением воздуха при комнатной температуре и влажности 100 %. Для создания герметичного объема использовалась камера из нержавеющей стали с внутренним радиусом 60 мм и высотой 140 мм (рис. 1). В камеру помещались исследуемые образцы, которые устанавливались на алюминиевый держатель в форме этажерки. Для создания требуемой влажности газовой среды в верхней части держателя было изготовлено углубление объемом 2 см<sup>3</sup>, которое наполнялось дистиллированной водой (рис. 1). Продолжительность испытаний для бактериальных культур составляла 14 суток, для культур грибов – 28 суток.

После завершения бактериальных испытаний образцы подвергались микробиологическому анализу для выявления различий в количественном уровне жизнеспособных микроорганизмов на опытных и контрольных образцах. Анализы проводились по стандартным методикам [15]. Результаты исследований ан-

тимикробных свойств образцов с различными типами покрытий представлены в таблице 1.

В таблице 1 видно, что на незащищенных образцах из нержавеющей стали находилось около 4×10<sup>2</sup> КОЕ/образец микроорганизмов вида *Pseudomonas aeruginosa*, а на защищенных обнаруживались лишь единичные клетки (от 0 до 9), что соответствовало 97,75 % до 100 % эффективности защиты. Сравнительные испытания защищенных и незащищенных образцов из стали показывают, что спорообразующие микроорганизмы вида *Bacillus pumilus* сохраняют свою жизнеспособность, но ни в одном случае не отмечено увеличение их количественного уровня выше, чем на контрольных образцах.

По окончании микологических испытаний образцы материалов осматривались в рассеянном свете при десятикратном увеличении с помощью стереомикроскопа Stemi 2000. Грибостойкость оценивали по интенсивности развития грибов на образцах по 6-балльной шкале по ГОСТ 9.048-75 [16], приведенной в таблице 2. В таблице 3 представлены результаты осмотра поверхности образцов в баллах согласно таблице 2.

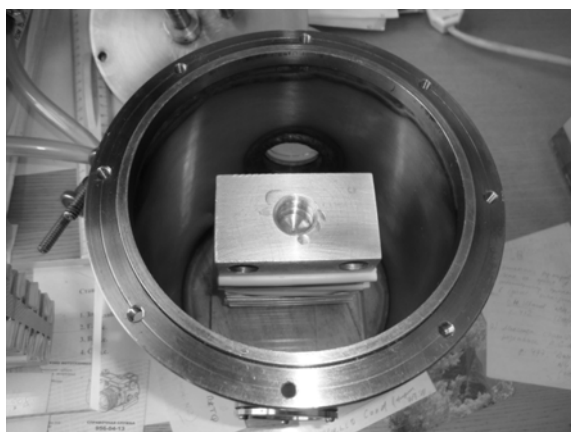


Рис. 1. Камера с установленным держателем. Вид сверху

Таблица 1

Результаты испытаний антимикробных свойств покрытий в отношении грамотрицательных микроорганизмов вида *Pseudomonas aeruginosa* и *Bacillus pumilus*

Образец и тип покрытия	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , КОЕ/образец	<i>Bacillus pumilus</i> , КОЕ/образец
Нержавеющая сталь (контроль)	4,0×10 <sup>2</sup>	6,0×10 <sup>4</sup>
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Н	0–9	3,6×10 <sup>4</sup>
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ +N	0–8	3,0×10 <sup>4</sup>
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Li	0	4,5×10 <sup>4</sup>

Таблица 2

*Оценка роста грибов*

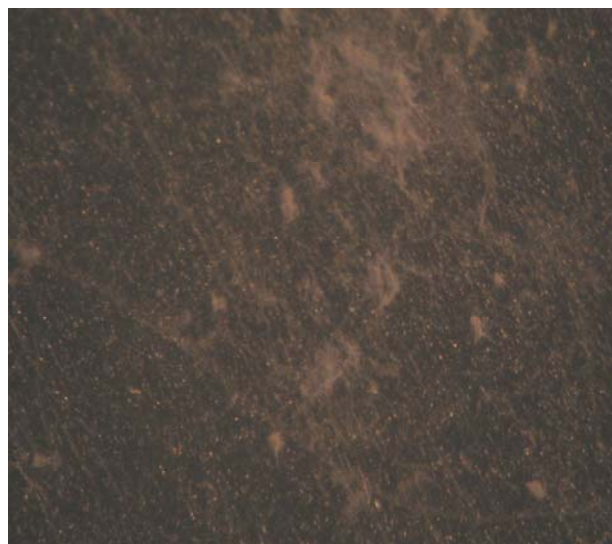
Балл	Характеристика балла
0	При осмотре под микроскопом рост плесневых грибов не виден
1	При осмотре под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий в виде неветвящихся гиф
2	При осмотре под микроскопом виден мицелий в виде ветвящихся гиф и спороношение
3	При осмотре невооруженным глазом рост грибов едва виден, но отчетливо виден под микроскопом
4	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих менее 25 % испытываемой поверхности
5	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих более 25 % испытываемой поверхности

Таблица 3

*Оценка роста грибов на поверхности образцов после экспонирования*

Материал	Степень развития плесневых грибов в баллах	Оценка образцов
Нержавеющая сталь (контроль)	2	В газовой среде есть химические соединения, используемые грибами для незначительного развития
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + N	2–3	В газовой среде и в покрытиях есть химические соединения, используемые грибами для большего роста, чем в контроле
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + N	2–3	В газовой среде и в покрытиях есть химические соединения, используемые грибами для большего роста, чем в контроле
Нержавеющая сталь + ДУ ЛЦУ + Li	0	На поверхности материала нанесено покрытие, препятствующее росту грибов

Как видно из представленных данных, в состав воздушной среды входят соединения, которые микромицеты способны использовать для своего конструктивного обмена. Это подтверждается ростом микромицетов на контрольных образцах. На исследуемых покрытиях отмечался рост грибов в виде ветвящихся гиф и слабого спороношения (рис. 2). Исключением являлись образцы нержавеющей стали с покрытием ДУ ЛЦУ + Li, на которых рост грибов не обнаружен (рис. 3). После посева смыва с этих образцов жизнеспособных единиц микромицетов не было обнаружено. Таким образом, по результатам проведенных микробиологических испытаний только покрытие, нанесенное на подложку из нержавеющей стали и состоящее из ДУ ЛЦУ, допированного атомами лития, обладало антифунгальными свойствами.



**Рис. 2. Поверхность образца с нанесенным слоем ДУ ЛЦУ + N после испытаний. Наблюдается рост грибов. Увеличение –  $\times 10$**



**Рис. 3. Поверхность образца с нанесенным слоем ДУ ЛЦУ + Li после испытаний. Не наблюдается рост грибов. Увеличение –  $\times 10$**

### Заключение

В отношении вегетативных форм грамотрицательных микроорганизмов *Pseudomonas aeruginosa* испытанные все образцы нанопокрывтий ДУ ЛЦУ проявляли бактерицидную активность, выражающуюся в практически полном подавлении их жизнеспособности. В отношении спорообразующих грамположительных бактерий вида *Bacillus pumilus* покрытия проявляли бактериостатическую активность, не позволяющую данным микроорганизмам размножаться и увеличивать численность на защищенных образцах. По результатам проведенных микробиологических испытаний в отношении грибов один вид покрытия ДУ ЛЦУ + Li обладал антифунгальными свойствами, когда наблюдалось полное отсутствие роста грибов и отсутствие жизнеспособных единиц микромицетов. Для остальных образцов наблюдался незначительный рост грибов по сравнению с контрольными образцами.

Покрывтия ДУ ЛЦУ нанометровой толщины являются перспективными для предотвращения роста грибов и подавления бактерий. Различие в биологических свойствах защитных нанопокрывтий двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода требует дальнейшего исследования свойств поверхности и механизма подавления жизнедеятельности микроорганизмов.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (Государственное задание  
№ 075-00270-26-00; Соглашение 075-03-2025-045,  
тема FMFR -2024-0035).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумилова Т. Г. Алмаз, графит, карбин, фуллерен и другие модификации углерода. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
2. Романенко А. В., Симонов П. А. Углеродные материалы и их физико-химические свойства / под общей ред. д.т.н., проф. А. С. Носкова. – М.: Калвис, 2007.
3. Сладкова Т. А. Исследование углерода – успехи и проблемы (отв. ред. Ю. Н. Бубнов. Ин-т элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН). – М.: Наука, 2007.
4. Сладков А. М. Карбин – третья аллотропная форма углерода (отв. ред. Ю. М. Бубнов). – М.: Наука, 2003.
5. Кулакова И. И. / Химия. 2007. № 13. С. 731.
6. Сладков А. М., Касаточкин В. И., Коршак В. В., Кудрявцев Ю. П. / Бюлл. изобрет. 1972. № 6.
7. Btao Pan, Jun Xiao, Jiling Li, Pu Liu, Chengxin Wang, Guowei Yang / Sci. Adv. 2015. Vol. 1 (9). P. 1:e1500857.
8. Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Новиков Н. Д., Савченко Н. Ф., Хвостов В. В. / Нанотехнологии: Разработка, применение. 2010. Т. 2. № 1. С. 88–95.
9. Гарнов С. В., Абрамов Д. В., Бухаров Д. Н., Худайберганов Т. А., Хорьков К. С., Осипов А. В., Журнова С. В., Кучерик А. О., Аракелян С. М. / УФН. 2024. Т. 194. № 2. С. 138–168.
10. Коцаков В. Д., Новиков Н. Д., Яблоков М. Ю., Ерёмкин А. В., Васильев А. И. / Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 12. С. 11–15.
11. Бабаев В. Г., Новиков Н. Д., Гусева М. Б., Хвостов В. В., Савченко Н. Ф., Коробова Ю. Г., Александров А. Ф. / Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2010. Т. 2. № 1. С. 53.
12. Новиков Н. Д., Василяк С. Л., Баркова М. И., Яненко Ю. Б. / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 3. С. 167–175.
13. Бабаев В. Г., Гусева М. Б., Савченко Н. Ф., Новиков Н. Д., Хвостов В. В., Флад П. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 3. С. 16.
14. Поликарпов Н. А., Новикова Н. Д., Вальяно Г. Е., Василяк Л. М., Климовский И. И., Печеркин В. Я., Добринский Э. К., Малашин С. И. / Авиакосмическая и экологическая медицина. 2010. № 6. С. 53.
15. Руководство по медицинской микробиологии. Кн. 1: Общая санитарная микробиология / под ред. А. С. Лабинской, Е. Г. Волиной. – М.: БИНОМ, 2008.
16. ГОСТ 9.048-75. Материалы и изделия. Методы испытаний на микробиологическую устойчивость. – М.: Издательство стандартов, 1978.

## Bactericidal properties of two-dimensional ordered linear-chain carbon

V. Ya. Pecherkin<sup>1\*</sup>, L. M. Vasilyak<sup>1</sup>, E. A. Deshevaya<sup>2</sup>, and N. D. Novikov

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\* E-mail: vpecherkin@yandex.ru

<sup>2</sup> Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, 123007 Russia

Received 5.03.2026; revised 23.04.2026; accepted 5.06.2026

**Laboratory tests of the bactericidal properties of stainless steel samples with a protective nanolayer of linear-chain carbon of various modifications were carried out in a closed volume of air at atmospheric pressure, 100 % humidity and room temperature. After testing, it was shown that with respect to spore-forming gram-positive bacteria of the *Bacillus pumilus* species, the coatings showed bacteriostatic activity, which did not allow these microorganisms to multiply, and with respect to vegetative forms of Gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, all tested samples showed bactericidal activity, expressed in almost complete suppression of their viability on all types of coatings. For fungi, only one type of coating doped with lithium atoms had antifungal properties when there was a complete absence of fungal growth and the absence of viable micromycete units. For the remaining samples, there was a slight growth of fungi compared to the control samples.**

**Keywords:** stainless steel, two-dimensionally ordered linear-chain carbon, protective nanolayer, micromycetes, bacteria.

### REFERENCES

1. Shumilova T. G. Diamond, graphite, carbine, fullerene and other carbon modifications. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002.
2. Romanenko A. V. and Simonov P. A. Carbon materials and their physico-chemical properties, Under the general editorship of Dr. of Technical Sciences, professor A. S. Noskova. Moscow: Kalvis, 2007.
3. Sladkova T. A. Carbon research – successes and problems / Ed. by Yu. N. Bubnov. In-t elementorgan. A. N. Nesmeyanov Compounds of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Nauka Publ., 2007.
4. Sladkov A. M. Carbine is the third allotropic form of carbon / Ed. by Yu. M. Bubnov. Moscow: Nauka, 2003.
5. Kulakova I. I., Chemistry, № 13, 731 (2007) [in Russian].
6. Sladkov A. M., Kasatochkin V. I., Korshak V. V., and Kudryavtsev Yu. P., Byull. invent., № 6, (1972) [in Russian].
7. Bitao Pan, Jun Xiao, Jiling Li, Pu Liu, Chengxin Wang, and Guowei Yang, Sci. Adv. **1** (9), 1:e1500857 (2015).
8. Babaev V. G., Guseva M. B., Novikov N. D., Savchenko N. F., and Khvostov V. V., Nanotechnology: Development, application **2** (1), 88–95 (2010) [in Russian].
9. Garnov S. V., Abramov D. V., Bukharov D. N., Khudaiberganov T. A., Khor'kov K. S., Osipov A. V., Zhirnova S. V., Kucherik A. O., and Arakelyan S. M., Physics Uspekhi, **67** (2), 109 (2024).
10. Kochakov V. D., Novikov N. D., Yablokov M. Yu., Eremkin A. V., and Vasiliev A. I., Actual problems of humanities and natural sciences, № 12, 11 (2009) [in Russian].
11. Babaev V. G., Novikov N. D., Guseva M. B., Khvostov V. V., Savchenko N. F., Korobova Yu. G., and Alexandrov A. F., Nanotechnology: development, application – XXI century **2** (1), 53 (2010) [in Russian].
12. Novikov N. D., Vasilyak S. L., Barkova M. I., and Yanenko Yu. B., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **8** (3), 167–175 (2020) [in Russian].
13. Babaev V. G., Guseva M. B., Savchenko N. F., Novikov N. D., Khvostov V. V., and Flood P., Surface. X-ray, synchrotron, and neutron studies, № 3, 16 (2004) [in Russian].
14. Polikarpov N. A., Novikova N. D., Vallano G. E., Vasilyak L. M., Klimovsky I. I., Pecherkin V. Ya., Dobrinsky E. K., and Malashin S. I., Aerospace and environmental medicine, № 6, 53 (2010) [in Russian].

15. A guide to medical microbiology. Book 1: General sanitary microbiology / ed. by A. S. Labinskaya, E. G. Volina. Moscow: BINOM, 2008.
16. GOST 9.048-75. Materials and products. Methods of testing for microbiological resistance. Moscow: Publishing House of Standards, 1978.

#### Об авторах

**Печеркин Владимир Яковлевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vpcherkin@yandex.ru SPIN-код: 4910-0417, AuthorID: 1089774

**Василяк Леонид Михайлович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599

**Дешевая Елена Андреевна**, к.б.н., ведущий научный сотрудник, Институт медико-биологических проблем РАН (123007, Россия, Москва, Хорошевское шоссе, 76 а). E-mail: deshevaya@imbp.ru SPIN-код: 3206-9869, AuthorID: 126892

**Новиков Николай Дмитриевич**, к.ф.-м.н. E-mail: nick.d.nov@mail.ru AuthorID: 138271

УДК 535.2  
EDN: QUFCMC

PACS: 42.60.-v, 42.62.-b, 42.81.Pa

## Исследование устойчивости периметра кольцевого лазера к вибрационным перегрузкам

© А. О. Синельников<sup>1,2\*</sup>, П. С. Романов<sup>2</sup>, Н. В. Тихменев<sup>2</sup>, А. А. Ушанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

<sup>\*</sup>E-mail: [mr.sinelnikov.a@mail.ru](mailto:mr.sinelnikov.a@mail.ru)

<sup>2</sup> АО «ГосНИИП», Москва, 129226 Россия

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; после доработки 17.02.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 2.2.6, 2.2.9

*В работе экспериментально исследована чувствительность периметра кольцевого гелий-неонового лазера к внешним динамическим воздействиям. Объектом исследования являлся лазер с длиной волны генерации 633 нм и периметром резонатора 28 см. Экспериментально установлена количественная зависимость расстройки периметра от величины перегрузки по оси подвижного пьезо зеркала. Порог устойчивой работы лазера определен при перегрузке в 56g, соответствующей критической расстройке в 222 нм. При превышении данного порога нарушается одномодовый режим генерации в лазере, что приводит к значительной погрешности в выходном сигнале. Рассчитана чувствительность периметра лазера к динамическим воздействиям, составившая 3,75 нм/g. Полученные результаты определяют границы применимости кольцевых лазеров данного типа в условиях вибрационных нагрузок.*

*Ключевые слова:* кольцевой лазер, расстройка периметра, динамическое воздействие, вибрация, устойчивость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-98-104

### Введение

Кольцевые лазеры (КЛ) нашли широкое применение в качестве высокоточных датчиков угловой скорости в современных навигационных и управляющих системах [1]. Принцип их действия основан на эффекте Саньяка, в результате которого возникает разность частот  $\Delta f$  встречных волн, пропорциональная угловой скорости вращения прибора  $\Omega$ :  $\Delta f = K\Omega$ , где  $K$  — масштабный коэффициент КЛ [2, 3]. Без учета активной среды данный коэффициент определяется геометрией резонатора: длиной оптического пути  $L$ , площадью  $S$ , охватываемой контуром, и длиной волны генерации  $\lambda$ . Ключевым условием стабильной и точной работы КЛ является поддержание длины резонатора (периметра) с

точностью до единиц нм [3, 4]. В процессе эксплуатации внешние воздействия (температура, вибрационные ускорения) могут вызывать механические деформации резонатора, приводящие к его расстройке  $\xi$  — изменению эффективного периметра  $\Delta L$  [5, 6]. Это явление вызывает смещение частоты генерации от центра линии усиления активной среды, что ведёт к ухудшению ключевых параметров лазера: снижению интенсивности излучения, росту порога захвата и нестабильности масштабного коэффициента.

Для компенсации тепловых деформаций КЛ оснащается системой регулировки периметра (СРП), воздействующей на подвижные пьезо зеркала [6, 7]. Однако быстрые колебания пьезо зеркал, вызванные вибрацией, система может не успевать парировать [8].

В этом случае расстройка периметра  $\xi$  приводит к выходу лазера из оптимального режима генерации. А изменение оптического пути резонатора, вызванное движением зеркал, может индуцировать ложный сигнал, интерпретируемый как вращение [4].

Особую актуальность проблема динамических воздействий приобретает при использовании КЛ в условиях повышенных механических нагрузок, например, в геофизическом оборудовании или системах управления подвижными объектами [1, 9]. Как показано в работах [10, 11], конструкция КЛ обладает собственными резонансными частотами (до 2000 Гц), на которых виброускорения на корпусе резонатора могут достигать десятков  $g$ . Наиболее чувствительным к перегрузкам элементом является подвижное пьезозеркало, смещение которого напрямую влияет на периметр резонатора. Таким образом, количественная оценка устойчивости периметра КЛ к вибрациям является важной задачей, определяющей надежность и область применения этих высокоточных приборов.

Целью работы является экспериментальное исследование чувствительности периметра кольцевого лазера к внешним динамическим воздействиям и определение физических механизмов влияния вибрации на его выходные характеристики.

### Теоретическая часть

Основу функционирования кольцевого лазера как датчика угловой скорости составляет поддержание стабильного одномодового режима генерации в центре контура усиления активной среды. Как отмечено во введении, внешние динамические воздействия вызывают расстройку периметра  $\xi$ , что приводит к изменению оптической длины резонатора  $\Delta L$  и смещению собственной частоты продольной моды, которая определяется выражением [2, 12]:

$$v = q \frac{c}{L + l(n_a - 1)}, \quad (1)$$

где  $q$  – целое число (порядок моды);  $c$  – скорость света;  $l$ ,  $n_a$  – длина и коэффициент преломления активной среды, соответственно.

Зависимости интенсивности генерации  $I$  от длины резонатора  $L$  хорошо изучены [5, 2].

При изменении периметра  $\Delta L$  интенсивность  $I$  будет изменяться, причем аргументом функции интенсивности удобно выбрать именно изменение (расстройку) периметра  $\xi$ , определяемую как  $\xi = \Delta L = L - L_0$ , где  $L_0$  – длина резонатора, соответствующая максимуму интенсивности ( $I = I_0$ ). Связь между расстройкой периметра  $\xi$  и интенсивностью генерируемого излучения  $I$  является ключевой для понимания устойчивости работы прибора. Вблизи  $L_0$  зависимость  $I(\xi)$  аппроксимируется параболой [5, 11]:

$$I_\xi = I_0 (1 - a \cdot \xi^2), \quad \text{при } |\xi| \leq \pm \xi_f, \quad (2)$$

где  $a$  – постоянный коэффициент;  $\xi_f$  – граница области стабильного одномодового режима. При дальнейшем увеличении расстройки происходит переход в зону конкуренции мод,

$$\begin{aligned} -I_\xi &= I_0 [1 - a \cdot (\xi \pm 1)^2], \\ \text{при } -\xi_f \pm 1 &\leq |\xi| \leq \pm \xi_f \pm 1, \end{aligned} \quad (3)$$

с последующим выходом на нерегулярный режим, описываемый случайной функцией  $SQR(\xi)$  [11]. Таким образом, пороговое значение расстройки  $\xi_f$  является критическим параметром, определяющим границы рабочего режима КЛ.

В условиях вибрационного воздействия перегрузка  $P_g$ , возникающая на резонансных частотах конструкции  $f_B$ , вызывает приложенное к пьезозеркалу усилие, приводящее к его смещению и модуляции периметра. Данный процесс может быть описан зависимостью:

$$\xi(t) = P_g(f_B) \cdot \xi_g \cdot \sin(2\pi f_B t), \quad (4)$$

где  $\xi_g$  – чувствительность расстройки периметра к проекции виброускорения на нормаль к поверхности пьезозеркала. Коэффициент перегрузки  $P_g$ , зависящий от частоты воздействия  $f_B$ , для линейного приближения может быть выражен через собственные частоты резонансных мод  $f_{Bi}$  с амплитудами возбуждения  $a_{Pi}$  и добротностями  $Q_{Pi}$  [8]:

$$P_g(f_B) = \frac{a_{Pi}}{\sqrt{(f_B^2 - f_{Bi}^2)^2 + \left(\frac{f_B \cdot f_{Pi}}{Q_{Pi}}\right)^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, теоретическая модель устанавливает прямую связь между внешним вибрационным воздействием, описываемым частотой  $f_B$ , перегрузкой  $P_g$ , и результирующей расстройкой периметра  $\xi$ , которая непосредственно определяет интенсивность излучения  $I_\xi$  и, следовательно, стабильность выходных характеристик КЛ. Экспериментальная проверка данных зависимостей позволяет количественно оценить порог устойчивости лазера.

### Экспериментальное исследование и результаты

Объектом исследования служил гелий-неоновый КЛ с четырехзеркальным резонатором, периметром 28 см и длиной волны генерации  $\lambda = 633$  нм [9]. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Резонатор лазера образован двумя подвижными (3) и

двумя неподвижными зеркалами (4). Для контроля и компенсации тепловых деформаций корпуса КЛ использовалась система регулировки периметра, воздействующая на пьезокорректоры (5) подвижных зеркал с помощью управляющего напряжения  $U_{ПК}$ . Информация о состоянии резонатора регистрировалась двумя фотодиодами контроля интенсивности (1), сигналы которых  $I_{M1}$ ,  $I_{M2}$  несли данные об интенсивности встречных волн. Измерение разностной частоты  $\Delta f$  сигналов  $U_{\sin}$  и  $U_{\cos}$ , пропорциональное угловой скорости  $\Omega$ , осуществлялось с помощью информационного фотодиода (2). Корпус лазера (6) был установлен на виброподвес (7), закрепленный винтами к подвижной плите (8) вибростенда, обеспечивая жесткую передачу механических воздействий в заданном направлении (9). На корпусе (6) были закреплены акселерометры для регистрации перегрузок  $P_g$  по трем осям внешних воздействий.

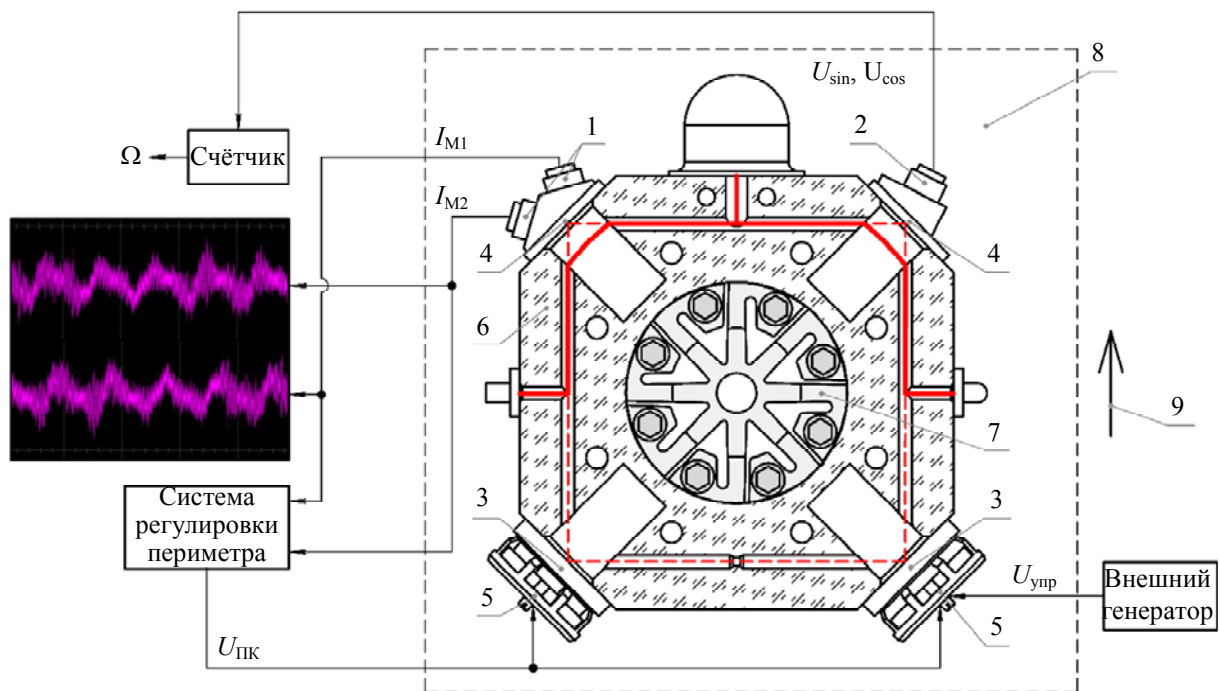


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – фотодиоды контроля интенсивности; 2 – информационный фотодиод; 3 – подвижные зеркала; 4 – неподвижные зеркала; 5 – пьезокорректоры; 6 – корпус КЛ; 7 – виброподвес; 8 – плита вибростенда; 9 – направление внешнего динамического воздействия

На первом этапе эксперимента было проведено исследование зависимости выходного сигнала  $\Omega$  от контролируемой расстройки периметра  $\xi$ , создаваемой подачей напряжения  $U_{упр}$  на пьезокорректор при отключённой

СРП. Установлено, что в диапазоне  $\xi$  от 0 до 222 нм сигнал  $\Omega$  оставался стабильным и соответствовал проекции скорости суточного вращения Земли (~12,45 град/час). При превышении порога в 222 нм наблюдался резкий,

пятикратный рост показаний, что свидетельствует о выходе КЛ из рабочего одномодового режима. Дополнительно исследовалась модуляция интенсивности  $I_M$  при синусоидальной расстройке с частотой 2 КГц. Было зафиксировано, что амплитуда модуляции сигнала линейно росла с увеличением  $\xi$  до 222 нм, после чего в сигнале появлялись характерные нелинейные искажения. Второй этап был посвящен влиянию внешней гармонической вибрации в диапазоне частот  $f_B$  от 20 до 2000 Гц при амплитуде ускорения  $P = 4g$ . КЛ с виброподвесом был установлен на динамический стенд. После предварительного прогрева лазера СРП была переведена в ручной режим (напряжение на пьезокорректорах зафиксировано), что исключало ее влияние на модуляцию сигнала  $I_M$

и позволяло регистрировать расстройку  $\xi$ , вызванную исключительно внешней вибрацией. Значимое увеличение амплитуды модуляции сигнала интенсивности  $I_M$  наблюдалось лишь в узких полосах частот (675–690 Гц, 720–750 Гц, 1010–1045 Гц), соответствующих областям механических резонансов конструкции КЛ. На рис. 2 представлен фрагмент сигнала  $I_M$  при частоте вибрации  $f_B$  920–1120 Гц.

Показания акселерометров, зарегистрированные по трём осям (в направлении воздействия, оси чувствительности КЛ и оси подвижного пьезозеркала), подтвердили, что в данных диапазонах спектра частот возникают существенные перегрузки  $P_g$ , направленные преимущественно по оси, нормальной к поверхности подвижного пьезозеркала (рис. 3).

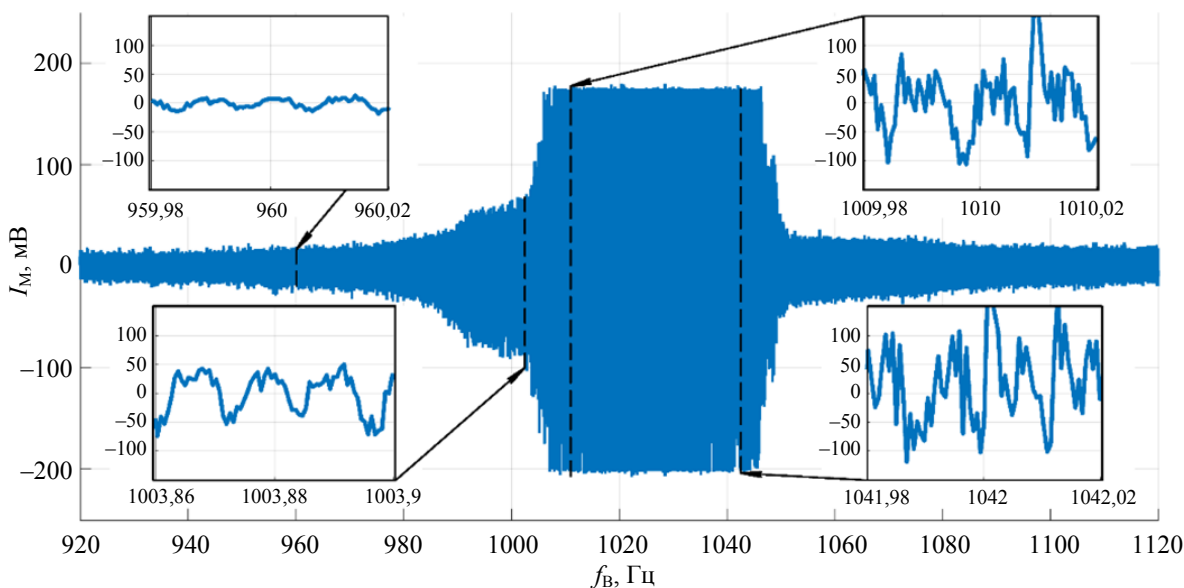


Рис. 2. Модуляция сигнала интенсивности при внешнем динамическом воздействии

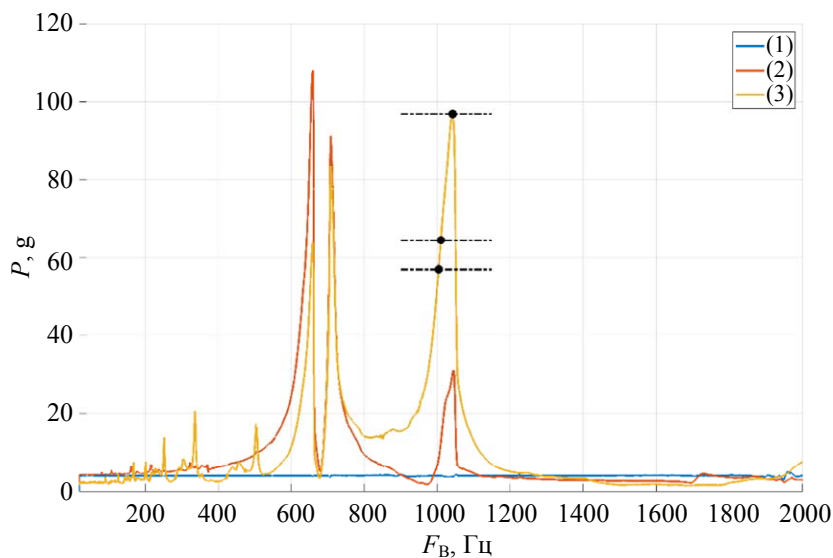


Рис. 3. Перегрузки по осям кольцевого лазера: (1) – по оси воздействия (задающее воздействие), (2) – по оси чувствительности КЛ, (3) – по оси пьезозеркала КЛ

Сопоставление вида модуляции оптического сигнала  $I_M$  при вибрации с калибровочной зависимостью, полученной на первом этапе эксперимента, позволило установить количественную связь между перегрузкой  $P_g$  по оси зеркала и вызываемой ею расстройкой периметра  $\xi$ . Аппроксимация экспериментальных данных (рис. 4) дала следующую зависимость:

$$\xi(P) = 0,057P^2 + 0,789P. \quad (6)$$

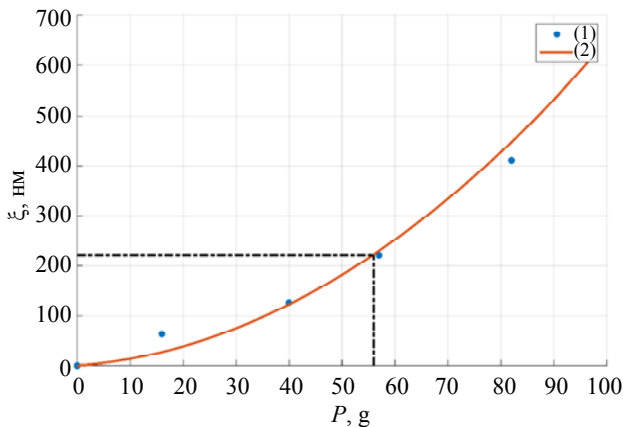


Рис. 4. Зависимость расстройки периметра КЛ от перегрузки по оси подвижного зеркала

Из данной зависимости следует, что критическое значение расстройки  $\xi \approx 222$  нм достигается при перегрузке  $P \approx 56$  г. Линейная аппроксимация в рабочей области определяет чувствительность периметра исследуемого КЛ к динамическим воздействиям как  $3,75$  нм/г.

### Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о высокой динамической устойчивости исследуемого кольцевого лазера и количественно связать механические воздействия с изменениями его оптических параметров. Установленный критический порог расстройки периметра в  $222$  нм соответствует теоретической границе зоны стабильного одномодового режима генерации. Превышение этого значения приводит к переходу в область конкуренции продольных мод, что полностью объясняет наблюдаемое пятикратное увеличение ошибки выходного сигнала прибора. Данный результат подтверждает базовый принцип, согласно которому стабильность масштабного коэффициента КЛ определяется сохранением условия  $\xi < \xi_f$ .

Выявленная избирательность отклика выходных сигналов лазера на вибрацию, выражающаяся в значительной модуляции интенсивности излучения только в узких частотных диапазонах, указывает на резонансный характер влияния. Это согласуется с данными о наличии собственных резонансов конструкции КЛ в диапазоне  $f_B$  до  $2000$  Гц. Преобладание перегрузки именно по оси, нормальной к поверхности подвижного пьезо зеркала, экспериментально доказывает, что данный элемент является основным каналом передачи динамических возмущений в оптический контур резонатора.

Квадратичный характер зависимости (7), вероятно, отражает нелинейность упругих свойств крепления пьезо зеркала к корпусу лазера при больших амплитудах прогиба. Рассчитанная чувствительность периметра  $3,75$  нм/г и определённый порог устойчивой работы  $56$  г являются ключевыми количественными характеристиками для оценки применимости прибора. Эти значения показывают, что при перегрузках ниже  $56$  г СПП потенциально способна компенсировать возникающую расстройку, так как она остаётся в пределах её рабочего диапазона и не превышает критического значения  $\xi_f$ .

Сравнение с известными исследованиями [8, 10] подтверждает общий механизм влияния вибрации через возбуждение резонансов конструкции. В то же время полученные конкретные численные характеристики ( $3,75$  нм/г,  $56$  г) для лазера с периметром  $28$  см вносят новый вклад в понимание эксплуатационных ограничений подобных приборов в составе инерциальных измерительных систем и расширяют представления о возможности их применения в условиях умеренных вибрационных нагрузок.

### Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния внешних динамических воздействий на стабильность периметра кольцевого лазера. На основе анализа взаимосвязи между вибрационными перегрузками, расстройкой периметра и выходными характеристиками прибора получены количественные оценки его устойчивости.

Результаты работы подтверждают теоретическую модель, согласно которой стабильность одномодового режима генерации критически зависит от величины расстройки периметра. Экспериментально установленный порог расстройки в 222 нм соответствует границе зоны стабильной одномодовой генерации. Превышение этого порога приводит к переходу в режим конкуренции мод и существенному росту погрешности измерения.

Определена прямая зависимость между перегрузкой, действующей по оси подвижного пьезо зеркала, и вызываемой ею расстройкой периметра. Установлено, что критическая расстройка достигается при перегрузке 56g, что задаёт чёткий эксплуатационный предел для приборов данного типа. Рассчитанная чувствительность периметра к динамическим воздействиям составляет 3,75 нм/g.

Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки и применения кольцевых лазерных гироскопов в условиях вибрационных нагрузок. Они показывают, что при сохранении перегрузок ниже указанного порога система регулировки периметра способна обеспечить штатный режим работы прибора, что расширяет потенциальные области его применения. Данное исследование вносит вклад в понимание механизмов влияния вибрации на точность инерциальных измерительных систем и предоставляет конкретные количественные критерии для оценки их устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А., Медведев В. М. / Фотоника. 2024. Т. 18. № 6. С. 450–466. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>.
2. Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В. Прикладная теория гироскопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015.
3. Aronowitz F. Optical gyros and their application. 1999. Vol. 339.
4. Lee J. I. / International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13. № 8. P. 1439–1443.
5. Грушин М. Е., Колбас Ю. Ю., Медведев А. А. / Фотоника. 2020. Т. 14. № 2. С. 150–159. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.150.157>.
6. Fenercioglu T. O., Yalçinkaya T. / International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2019. Vol. 61. № 3. P. 429–443. <https://doi.org/10.3233/JAE-190019>.
7. Lee S. H., Shon W. H., Suh S. W., Yu S. N., Han C. S. / International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011. Vol. 12. № 1. P. 91–96. <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0011-1>.
8. Болотнов С. А., Назаров С. И., Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А. / Гироскопия и навигация. 2024. Т. 32. № 3 (126). С. 3–20.
9. Кузнецов А. Г., Молчанов А. В., Чиркин М. В., Измайлов Е. А. / Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78–88.
10. Тихменев Н. В., Назаров С. И., Ушанов А. А., Синельников А. О. Управление большими системами: сборник трудов. 2024. № 109. С. 293–309. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.109.13>.
11. Синельников А. О., Тихменев Н. В., Ушанов А. А., Назаров С. И. / Наноиндустрия. 2025. Т. 18. № S11–1 (135). С. 380–387. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.11s.380.387>
12. Liu J., Guo L., Weng J., Liu W., Yang Y., Zhao K., Zheng Y. / Optics Express. 2023. Vol. 31. № 22. P. 36314. <https://doi.org/10.1364/oe.503255>.

PACS: 42.60.–v, 42.62.–b, 42.81.Pa

## Investigation of the perimeter stability of a ring laser to vibration overloads

A. O. Sinelnikov<sup>1,2\*</sup>, P. S. Romanov<sup>2</sup>, N. V. Tikhmenev<sup>2</sup>, and A. A. Ushanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RUDN University, Moscow, 117198 Russia

<sup>2</sup> JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, 129226 Russia

\* E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru

Received 29.12.2025; revised 17.02.2026; accepted 5.06.2026

*The paper presents an experimental study of the perimeter sensitivity of a helium-neon ring laser to external dynamic impacts. The laser under investigation had a generation wavelength of 633 nm and a resonator perimeter of 28 cm. A quantitative dependence of perimeter detuning on the overload along the axis of the movable piezo-mirror was experimentally established.*

*It was determined that the operational stability threshold of the laser corresponds to an overload of 56g, at which the critical detuning of 222 nm is reached. Exceeding this threshold disrupts the single-mode generation regime in the laser, leading to a significant error in the output signal. The sensitivity of the laser perimeter to dynamic impacts was calculated to be 3.75 nm/g. The obtained results define the applicability limits of this type of ring laser under vibration load conditions.*

*Keywords:* ring laser, perimeter detuning, dynamic effect, vibration, overload.

## REFERENCES

1. Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., Ushanov A. A., and Medvedev V. M., *Photonics of Russia* **18** (6), 450–466 (2024). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>.
2. Lukyanov D. P., Raspopov V. Ya., and Filatov Yu. V. *Applied Theory of Gyroscopes*, St. Petersburg: GSC RF OJSC Concern TsNII Elektropribor, 2015 [in Russian].
3. Aronowitz F. *Optical Gyroscopes and Their Applications*, **339**, (1999).
4. Lee J. I., *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **13** (8), 1439–1443 (2012).
5. Grushin M. E., Kolbas Yu. Yu., and Medvedev A. A., *Photonics* **14** (2), 150–159 (2020) [in Russian]. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.Ot.2020.14.2.150.157>
6. Fenercioglu T. O. and Yalçinkaya T., *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **61** (3), 429–443 (2019). <https://doi.org/10.3233/JAE-190019>
7. Lee S. H., Shon W. H., Suh S. W., Yu S. N., and Han C. S., *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **12** (1), 91–96 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0011-1>
8. Bolotnov S. A., Nazarov S. I., Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., and Ushanov A. A., *Gyroscopy and Navigation* **15** (3), 215–225 (2024). <https://doi.org/10.1134/S2075108724700317>
9. Kuznetsov A. G., Molchanov A. V., Izmailov E. A., and Chirkin M. V., *Quantum Electronics* **45** (1), 78–88 (2015). <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n01ABEH015420>.
10. Tikhmenev N. V., Nazarov S. I., Ushanov A. A., and Sinelnikov A. O., *Management of Large Systems: Collection of Papers, № 109*, 293–309 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.109.13>.
11. Sinelnikov A. O., Tikhmenev N. V., Ushanov A. A., and Nazarov S. I., *Nanoindustry* **18** (S11–1 (135)), 380–387 (2025) [in Russian]. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.11s.380.387>
12. Liu J., Guo L., Weng J., Liu W., Yang Y., Zhao K., and Zheng Y., *Optics Express* **31** (22), 36314 (2023). <https://doi.org/10.1364/oe.503255>.

## Об авторах

**Синельников Антон Олегович**, к.т.н., доцент, начальник лаборатории, Российский университет дружбы народов (117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6); АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru SPIN-код: 2442-7507, AuthorID: 887339, ORCID 0000-0002-5579-3509

**Романов Павел Сергеевич**, инженер-стажёр, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: romanov\_p7274@mail.ru SPIN-код: 2329-2940, AuthorID: 1306982, ORCID 0009-0006-3309-0657

**Тихменев Николай Вадимович**, к.ф.-м.н., начальник отдела, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: nvtikhmenev@mail.ru AuthorID: 602152

**Ушанов Александр Александрович**, ведущий инженер-электроник, АО «ГосНИИП» (129226, Россия, Москва, пр-кт Мира, д. 125). E-mail: a.a.ushanov@mail.ru SPIN-код: 1666-3279, AuthorID: 1211000, ORCID 0009-0009-3703-9981

УДК 577.15, 543.55  
EDN: NYTMOM

PACS: 87.15.R-

**Исследование изменений адсорбционных свойств L-аспарагиназы на слюде при тепловом воздействии для разработки нанопорового детектора**

© Е. Е. Важенкова<sup>1</sup>, И. Д. Шумов<sup>1\*</sup>, Д. Д. Жданов<sup>1</sup>, В. В. Шумянцева<sup>1</sup>, В. С. Зиборов<sup>2</sup>,  
А. Н. Аблеев<sup>1</sup>, Н. В. Ваулин<sup>3</sup>, Д. В. Лебедев<sup>3</sup>, А. С. Букатин<sup>3</sup>, И. С. Мухин<sup>3</sup>, О. Н. Афонин<sup>1</sup>,  
В. Ю. Татур<sup>4</sup>, А. А. Лукьяница<sup>4,5</sup>, Е. А. Пономаренко<sup>1</sup>, А. И. Арчаков<sup>1</sup>, Ю. Д. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича», Москва, 119121 Россия

\* E-mail: shum230988@yandex.ru

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» (Алфёровский университет), Санкт-Петербург, 194021 Россия

<sup>4</sup> Фонд перспективных технологий и новаций, Москва, 125315 Россия

<sup>5</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Статья поступила в редакцию 10.03.2026; после доработки 24.03.2026; принята к публикации 5.06.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.13

**Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследована адсорбция фермента L-аспарагиназы (L-ASNase) *E. carotovora* на слюду в диапазоне температур от 25 °С до 60 °С. Выявлены термически индуцированные изменения олигомерного состояния L-ASNase и ее адсорбционной способности на слюде. Максимум адсорбции L-ASNase в виде отдельных глобул наблюдается при 45 °С. При 55 °С фермент адсорбируется в виде нитевидных структур, а при 60 °С теряет адсорбционную способность. Полученные результаты принципиально важны для разработки электрических молекулярных детекторов на базе твердотельных нанопор (ЭДТНП), предназначенных для изучения механизма и кинетики ферментативного катализа, а также могут представлять интерес для разработки противораковых препаратов.**

**Ключевые слова:** L-аспарагиназа, атомно-силовая микроскопия, адсорбция ферментов, температурная денатурация, твердотельная нанопора.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-105-111

**Введение**

Фермент L-аспарагиназа (L-ASNase) относится к гидролазам и катализирует превращение L-аспарагина в аспарат [1]. L-ASNase (II типа) нашла применение в терапии онкологических заболеваний – в частности, лимфобластного лейкоза [2]. Этот фермент также используется в пищевой промышленности для предотвращения либо уменьшения образования акриламида в пищевых продуктах при их

тепловой обработке [3]. В связи с последним, большой интерес представляет исследование эффектов воздействия повышенных температур на физико-химические свойства L-ASNase [3, 4].

Для исследования термостабильности бактериальных L-аспарагиназ II типа в настоящее время повсеместно используются спектроскопические методы [4, 5], не позволяющие получать сигнал от единичных молекул исследуемого фермента [6]. Исследование

физико-химических свойств единичных молекул ферментов, в свою очередь, позволяет глубже изучить кинетику и механизм ферментативного катализа [6]. Для этого используют молекулярные детекторы – атомно-силовой микроскоп и электрические детекторы на базе твердотельных нанопор (ЭДТНП). ЭДТНП позволяют регистрировать каталитическую активность единичных макромолекул ферментов [7], что принципиально важно для изучения кинетики и механизма ферментативного катализа [6, 8]. Отметим, что ключевым элементом ЭДТНП является неорганическая мембрана, часто изготавливаемая на основе соединений кремния [9] с твердотельной нанопорой [7]. Адсорбция исследуемого фермента на поверхность этой мембраны и поведение фермента на этой поверхности могут кардинально влиять на результаты исследования его функционирования с помощью ЭДТНП. Таким образом, принципиально важной задачей является исследование адсорбции ферментов на неорганические кремнийсодержащие поверхности. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет визуализировать единичные макромолекулы ферментов [10, 11] и регистрировать малейшие изменения их адсорбционных свойств. В качестве подложек в АСМ часто используют слюду – соединение кремния, химические свойства поверхности которого сходны с таковыми материалами мембраны ЭДТНП – нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [12, 13].

Цель настоящего исследования – исследование адсорбции L-ASNase II типа на слюду в условиях теплового воздействия на фермент.

### Материалы и методы

*Постановка работы.* Изменения адсорбционных свойств фермента в зависимости от температуры изучали методом АСМ в диапазоне температур от 25 до 60 °С.

*Реактивы и фермент.* Фермент L-аспарагиназа *E. carotovora* был получен и очищен в лаборатории медицинской биотехнологии ИБМХ в соответствии с ранее опубликованными протоколами [14]. Лиофилизированный порошок фермента растворяли в 2 ммоль/л фосфатно-буферном растворе модификации Дульбекко (ФСБ-Д) и разбавляли до требуемой в эксперименте концентрации. ФСБ-Д

(рН 7,4; 2 ммоль/л фосфат, 30 ммоль/л NaCl) готовили из смеси солей, приобретенных у компании Pierce (США). Все растворы, использованные в экспериментах, готовили с использованием деионизированной ультрачистой воды (18,2 МОм·см), полученной с помощью установки Simplicity UV (Millipore, Франция).

*Атомно-силовая микроскопия.* Образцы раствора фермента сначала нагревали в микропробирке до требуемой температуры, а затем фермент адсорбировали из этого раствора на слюдяные подложки для АСМ следующим образом.

Сначала 0,1 мкмоль/л раствор L-ASNase в 2 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7,4) помещали в термостатируемый встряхиватель Thermomixer Comfort (Eppendorf, Германия) и последовательно нагревали до требуемых значений температур (25 °С, 30 °С, 45 °С, 55 °С и 60 °С). При каждой из этих температур отбирали две пробы раствора объемом 1 мл, и нагрев продолжали до достижения температуры 60 °С. Затем фермент из образцов, обработанных, как описано выше, адсорбировали методом непосредственной адсорбции [15] на подложки для АСМ из свежесколотой слюды. Каждый образец раствора фермента объемом 1 мл пипетировали в пробирку типа Эппендорф объемом 1,7 мл, и в раствор погружали прямоугольную пластинку слюды сорта мусковит (SPI, США) размером 7×15 мм. Пробирку непрерывно встряхивали со скоростью 600 об/мин при комнатной температуре (25 °С) в течение 10 мин. После этого АСМ-подложку вынимали из раствора фермента, помещали в другую пробирку с 1 мл воды и снова встряхивали при 600 об/мин и комнатной температуре (25 °С) в течение 10 мин для удаления буферных солей с ее поверхности. Все измерения методом АСМ выполняли на приборе NTEGRA PRIMA (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) в режиме прерывистого контакта на воздухе в контролируемых условиях (температура 25 °С, влажность воздуха 55 %). Для каждой подложки было получено не менее 25 сканов размером 2 мкм × 2 мкм с разрешением 256×256 точек.

Анализ данных АСМ (включая расчет распределений изображений АСМ молекул фермента по высоте  $\rho(h)$  и числа молекул

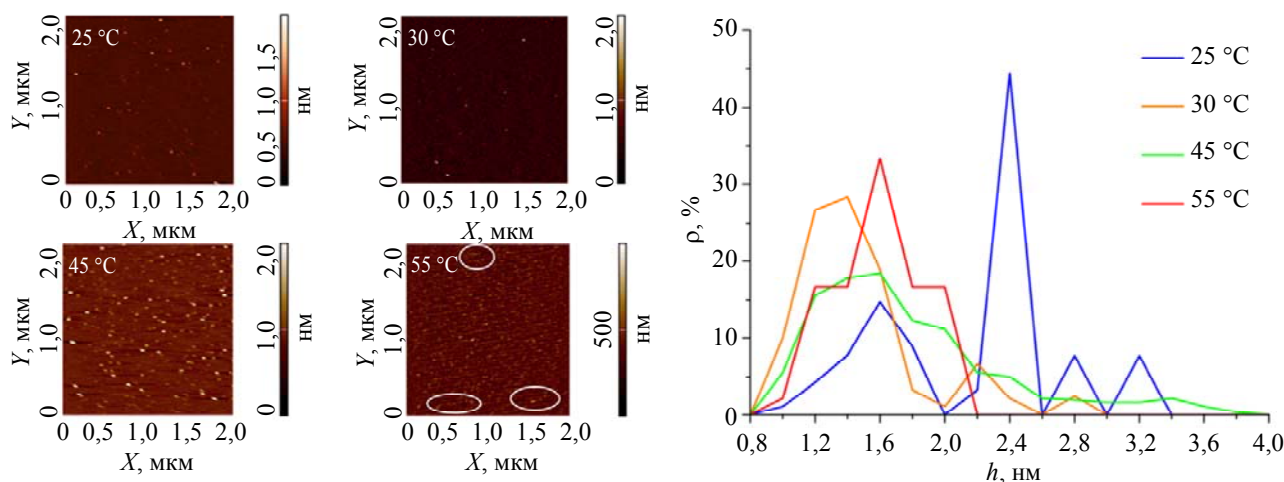
фермента, нормированного на 400 мкм<sup>2</sup> площади подложки АСМ N<sub>400</sub>) выполняли, как описано ранее [16].

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены типичные АСМ-изображения L-ASNase, адсорбированной на слюде из растворов, выдержанных при температурах 25 °С, 30 °С, 45 °С и 55 °С, и типичные кривые распределений  $\rho(h)$ , полученные

для образцов фермента, обработанных при 25 °С, 30 °С, 45 °С или 55 °С. При 60 °С адсорбция фермента не наблюдалась.

Представленные АСМ-изображения иллюстрируют, что в диапазоне температур от 25 до 45 °С фермент адсорбировался на слюде в форме отдельных глобул, тогда как нагревание раствора фермента до 55 °С приводило к его адсорбции в форме нитевидных структур. Последний факт указывает на значительную денатурацию фермента при 55 °С.



**Рис. 1. Типичные АСМ-изображения и кривые распределений  $\rho(h)$  L-ASNase, адсорбированной на слюде из растворов, выдержанных при 25 °С, 30 °С, 45 °С или 55 °С. Эллипсами выделены изображения денатурированных структур фермента. Размер АСМ-изображений 2 мкм × 2 мкм. Экспериментальные условия: концентрация раствора фермента 0,1 мкмоль/л, pH 7,4**

На рис. 1 синяя кривая показывает, что максимум распределения  $\rho(h)$  для образца L-ASNase, адсорбированной на слюде при 25 °С, соответствует значению высоты  $h_{\max} = 2,4$  нм. В предыдущих исследованиях другого фермента – пероксидазы хрена (ПХ), молекулярная масса которой (44 кДа [17]) сопоставима с молекулярной массой L-ASNase (36 кДа [18]), было показано, что максимальная высота АСМ-изображений мономерной формы ПХ на слюде составляет 1,0–1,2 нм [10, 11]; высота же АСМ-изображений агрегатов ПХ высоких порядков на слюде составляет  $\geq 2,4$  нм [11]. Исходя из этих соображений, мы заключаем, что после обработки при 25 °С L-ASNase адсорбируется на слюде в виде агрегатов с высотой АСМ-изображений около 2,4 нм.

При выдержке L-ASNase при более высоких температурах (от 30 до 45 °С) наблю-

дается уменьшение  $h_{\max}$  до значений 1,6 и 1,4 нм (рис. 1, оранжевая и зеленая кривые). Этот факт указывает на дезагрегацию L-ASNase с увеличением относительного содержания мономерной формы фермента в общем числе частиц, адсорбированных на слюде.

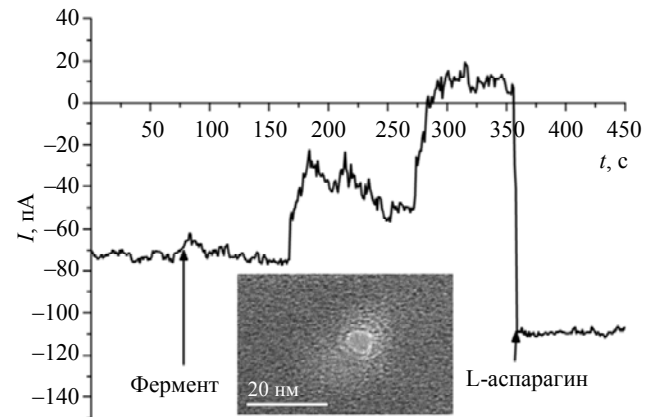
АСМ-изображения отдельных молекул L-ASNase достаточно хорошо различимы при всех исследованных значениях температуры вплоть до 45 °С, но при более высокой температуре (55 °С) компактные объекты практически не наблюдаются (рис. 1). Отсутствие компактных объектов на АСМ-изображениях, полученных в экспериментах с ферментом, выдержанным при 55 °С, указывает на то, что молекулы фермента претерпевают значительные структурные изменения при этой высокой температуре. Эти изменения приводят к образованию вытянутых структур на слюде (рис. 1), при этом адсорбция фермента в его

«обычной» форме не наблюдается. В экспериментах, проведенных при 55 °С, визуализируются только нитевидные структуры денатурированного фермента. Высота АСМ-изображений этих структур составляет от 0,5 до 0,8 нм. Дальнейшее повышение температуры до 60 °С приводит к полному исчезновению адсорбции фермента на слюде: после обработки фермента при такой высокой температуре не наблюдаются ни компактные объекты, ни нитевидные структуры. Отметим, что число частиц фермента  $N_{400}$ , адсорбированных на слюде при температурах 25, 30, 45 и 55 °С, составляло 1003, 540, 1605 и 159 частиц/400 мкм<sup>2</sup>, соответственно.

Таким образом, исследование температурной денатурации L-ASNase методом АСМ показало, что при 25 °С фермент адсорбируется на слюде в агрегированной форме. Повышение температуры до 30 °С привело к двукратному уменьшению числа  $N_{400}$  адсорбированных на слюде частиц фермента. Последний факт указывает на температурно-индуцированные изменения конформации глобул фермента, которые привели к снижению адсорбции фермента. На основании значений  $N_{400}$  и кривых  $\rho(h)$  (рис. 1) можно сделать вывод, что повышение температуры способствует дезагрегации фермента и адсорбции большего числа частиц фермента в мономерной форме. Эти явления, вероятно, связаны с процессами температурной денатурации фермента. Дальнейшее повышение температуры до 45 °С способствует адсорбции фермента, указывая на продолжение процессов денатурации, которые приводят к изменениям конформации глобул фермента. Последний факт способствует более прочному связыванию фермента с поверхностью слюды. Еще раз подчеркнем, что максимальная адсорбция L-ASNase на слюде наблюдается при 45 °С. Однако дальнейшее повышение температуры до 55 °С приводит к резкому снижению адсорбции фермента, сопровождающемуся появлением нитевидных структур денатурированного фермента. При 60 °С фермент полностью теряет свою адсорбционную способность, поскольку на слюде не наблюдаются ни компактных объектов, ни нитевидных структур.

Полученные нами результаты исключительно важны для разработки ЭДТНП. В пи-

лотных экспериментах с L-ASNase на ЭДТНП (устройство которого описано ранее [7]) получена зависимость ионного тока ( $I$ ), протекающего через нанопору, от времени ( $t$ ) при 25 °С (рис. 2).



**Рис. 2.** Типичная зависимость  $I(t)$ , полученная при помощи ЭДТНП со встроенной в твердотельную нанопору макромолекулой L-ASNase и изображение 6 нм нанопоры, сформированной в неорганической мембране, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (на вставке)

Перед добавлением фермента регистрировали базовый уровень  $I$  в 1 ммоль/л ФСБ-Д (рН 7,6). После добавления в цис-камеру измерительной ячейки ЭДТНП 0,1 мкмоль/л L-ASNase абсолютное значение  $I$  уменьшалось, указывая на частичную блокировку нанопоры молекулой фермента. Последующее добавление 10 мкмоль/л раствора L-аспарагина, в свою очередь, приводило к значительному увеличению  $I$ , указывая на разблокировку нанопоры. В холостых опытах, проведенных с использованием чистого буфера вместо раствора фермента, существенных изменений  $I$  не наблюдалось. Учитывая существенные изменения адсорбционных свойств L-ASNase в условиях температурного воздействия, для детального изучения кинетики функционирования единичных молекул этого фермента с помощью ЭДТНП необходимы дальнейшие исследования.

## Заключение

Методом АСМ исследована зависимость адсорбционных свойств L-ASNase при тепловом воздействии на раствор фермента. Обнаружено, что высота АСМ-изображений адсор-

бириванной на слюде L-ASNase уменьшается с 2,4 нм при 25 °С до значений 1,6 и 1,4 нм в диапазоне температур от 35 до 45 °С. При этом число адсорбированных на слюде частиц фермента значительно увеличивается, достигая максимума при 45 °С. Этот факт указывает на то, что изменения в структуре глобулы фермента, вызванные термической денатурацией в этом диапазоне температур, способствуют его адсорбции на слюду. Дальнейшее же повышение температуры до 55 °С приводит к резкому снижению адсорбционной способности фермента, сопровождающемуся образованием нитевидных структур на поверхности слюды. При 60 °С фермент полностью утрачивает способность адсорбироваться на слюду. Полученные результаты принципиально важны для разработки электрических молекулярных детекторов на базе твердотельных нанопор, необходимых для углубленного изучения и понимания механизма и кинетики ферментативного катализа, а также могут быть полезны при разработке противораковых препаратов.

*Работа выполнена в рамках темы*

*«Влияние соединений, обладающих геронпротективными свойствами, на единичные биомолекулы, модельные объекты и организм человека» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-643).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batool T., Makky E. A., Jalal M., Yusoff M. M. / Appl. Biochem. Biotechnol. 2016. Vol. 178. P. 900–923.
2. Aguayo A., Cortes J., Thomas D., Pierce S., Keating M., Kantarjian H. / Cancer. 1999. Vol. 86. № 7. P. 1203–1209.
3. Jia R., Wan X., Geng X., Xue D., Xie Z., Chen C. / Microorganisms. 2021. Vol. 9. P. 1659.
4. Dobryakova N., Zhdanov D., Dumina M. et al. / Catalysts. 2023. Vol. 13. № 5. P. 832.
5. Upadhyay A. K., Singh A., Mukherjee K. J., Panda A. K. / Front. Microbiol. 2014. Vol. 5. P. 486.
6. Xie X. S., Lu H. P. / J. Biol. Chem. 1999. Vol. 274. № 23. P. 15967–15970.
7. Ivanov Y. D., Vinogradova A. V., Nevedrova E. D. et al. / Int. J. Mol. Sci. 2024. Vol. 25. P. 10864.
8. Galenkamp N. S., van den Noort M., Maglia G. / RSC Chem. Biol. 2025. Vol. 6. P. 1686.
9. Dekker C. / Nature Nanotech. 2007. Vol. 2. P. 209–215.
10. Ivanov Y. D., Pleshakova T. O., Shumov I. D. et al. / Sci. Rep. 2020. Vol. 10. P. 9022.
11. Ivanov Y. D., Shumov I. D., Kozlov A. F. et al. / Micromachines. 2023. Vol. 14. P. 1024.
12. Shinohara K., Makida Y. / Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 13982.
13. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P. S., Beltsios K. G., Kakabakos S. E. / Med. Devices Sens. 2020. Vol. 3. P. e10072.
14. Papageorgiou A. C., Posypanova G. A., Anderson C. S., Sokolov N. S., Krasotkina J. / FEBS J. 2008. Vol. 275. № 17. P. 4306–4316.
15. Kiselyova O. I., Yaminsky I. V., Ivanov Yu. D., Kanaeva I. P., Kuznetsov V. Y., Archakov A. I. / Arch. Biochem. Biophys. 1999. Vol. 371. № 1. P. 1–7.
16. Pleshakova T. O., Kaysheva A. L., Shumov I. D. et al. / Micromachines. 2019. Vol. 10. P. 129.
17. Welinder K. G. / Eur. J. Biochem. 1979. Vol. 96. P. 483–502.
18. Michalska K., Jaskolski M. / Acta Biochim. Pol. 2006. Vol. 53. № 4. P. 627–640.

PACS: 87.15.R-

## Study of changes in the adsorption properties of L-asparaginase on mica under thermal action for the development of a nanopore-based detector

E. E. Vazhenkova<sup>1</sup>, I. D. Shumov<sup>1\*</sup>, D. D. Zhdanov<sup>1</sup>, V. V. Shumyantseva<sup>1</sup>, V. S. Ziborov<sup>2</sup>, A. N. Ableev<sup>1</sup>, O. N. Afonin<sup>1</sup>, N. V. Vaulin<sup>3</sup>, D. V. Lebedev<sup>3</sup>, A. S. Bukatin<sup>3</sup>, I. S. Mukhin<sup>3</sup>, V. Y. Tatur<sup>4</sup>, A. A. Lukyanitsa<sup>4,5</sup>, E. A. Ponomarenko<sup>1</sup>, A. I. Archakov<sup>1</sup>, and Yu. D. Ivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Biomedical Chemistry, Moscow, 119121 Russia

\* E-mail: shum230988@yandex.ru

<sup>2</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

<sup>3</sup> Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

<sup>4</sup> Foundation of Perspective Technologies and Novations, Moscow, 125315 Russia

<sup>5</sup> Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Received 10.03.2026; revised 24.03.2026; accepted 5.06.2026

**Atomic force microscopy (AFM) is used to study the adsorption of L-asparaginase (L-ASNase) E. carotovora enzyme on mica within 25 °C to 60 °C temperature range. Thermally induced changes in the oligomeric state of L-ASNase and its adsorbability on mica are revealed. Maximum adsorption of L-ASNase in the form of individual globules is observed at 45 °C. At 55 °C, the enzyme adsorbs in the form of filamentary structures, and at 60 °C it loses its adsorbability. The results obtained are fundamentally important for the development of electrical molecular detectors based on solid-state nanopores (EDTNPs) intended for studies of the mechanism and kinetics of enzymatic catalysis, and may also be of interest for the development of anti-cancer drugs.**

**Keywords:** L-asparaginase, atomic force microscopy, enzyme adsorption, thermal denaturation, solid-state nanopore.

## REFERENCES

1. Batool T., Makky E.A., Jalal M., Yusoff M.M. Appl Biochem Biotechnol. **178**, 900–923 (2016).
2. Aguayo A., Cortes J., Thomas D., Pierce S., Keating M., Kantarjian H. Cancer **86** (7), 1203–1209 (1999).
3. Jia R., Wan X., Geng X., Xue D., Xie Z., Chen C. Microorganisms **9**, 1659 (2021).
4. Dobryakova N., Zhdanov D., Dumina M. et al. Catalysts **13** (5), 832 (2023).
5. Upadhyay A.K., Singh A., Mukherjee K.J., Panda A.K. Front. Microbiol. **5**, 486 (2014).
6. Xie X.S., Lu H.P. J. Biol. Chem. **274** (23), 15967–15970 (1999).
7. Ivanov Y.D., Pleshakova T.O., Shumov I.D. et al. Sci Rep. **10**, 9022 (2020).
8. Galenkamp N.S., van den Noort M., Maglia G. RSC Chem. Biol. **6**, 1686 (2025).
9. Dekker C. Nature Nanotech. **2**, 209–215 (2007).
10. Ivanov Y.D., Vinogradova A.V., Nevedrova E.D. et al. Int J Mol Sci. **25**, 10864 (2024).
11. Ivanov Y.D., Shumov, I.D., Kozlov A.F. et al. Micromachines **14**, 1024 (2023).
12. Shinohara K., Makida Y. Sci. Rep. **8**, 13982 (2018).
13. Antoniou M., Tsounidi D., Petrou P.S., Beltsios K.G., Kakabakos S.E. Med. Devices Sens. **3**, e10072 (2020).
14. Papageorgiou A.C., Posypanova G.A., Andersson C.S., Sokolov N.S., Krasotkina J. FEBS J. **275** (17), 4306–4316 (2008).
15. Kiselyova O.I., Yaminsky I.V., Ivanov Yu.D., Kanaeva I.P., Kuznetsov, V.Y., Archakov A.I. Arch Biochem Biophys. **371** (1), 1–7 (1999).
16. Pleshakova T.O., Kaysheva A.L., Shumov I.D. et al. Micromachines **10**, 129 (2019).
17. Welinder K.G. Eur J Biochem. **96**, 483–502 (1979).
18. Michalska K., Jaskolski M. Acta Biochim Pol. **53** (4), 627–640 (2006).

## Об авторах

**Важенкова Екатерина Евгеньевна**, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: katyajustflash@gmail.com SPIN-код: 5558-6468, AuthorID: 1262654, ORCID: 0009-0001-4224-8907.

**Шумов Иван Дмитриевич**, к.б.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: shum230988@yandex.ru SPIN-код: 3827-1620, AuthorID: 484732, ORCID: 0000-0002-9795-7065.

**Жданов Дмитрий Дмитриевич**, д.б.н., заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: zhdanovdd@gmail.com SPIN-код: 3845-2544, AuthorID: 971666, ORCID: 0000-0003-4753-7588.

**Шумянцева Виктория Васильевна**, д.б.н., профессор, заведующая лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: viktorija.shumyantseva@ibmc.msk.ru SPIN-код: 1104-2003, AuthorID: 46223, ORCID: 0000-0002-1509-7218.

**Зиборов Вадим Серафимович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: ziborov.vs@yandex.ru AuthorID: 31839, ORCID: 0000-0001-7942-3337.

**Аблеев Александр Нариманович**, ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: ableev@mail.ru SPIN-код: 1193-5666, AuthorID: 1293547, ORCID: 0009-0004-3096-107X.

**Ваулин Никита Васильевич**, лаборант, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: nikitavaylin@mail.ru SPIN-код: 7466-5599, AuthorID: 1212356, ORCID: 0000-0001-6080-0729.

**Лебедев Денис Владимирович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: denis.v.lebedev@gmail.com SPIN-код: 8079-9286, AuthorID: 751908, ORCID: 0000-0001-5389-2899.

**Букатин Антон Сергеевич**, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: antbuk.fiztek@gmail.com SPIN-код: 4604-0330, AuthorID: 744078, ORCID: 0000-0002-5459-1438.

**Мухин Иван Сергеевич**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук» (Алферовский университет) (194021, Россия, Санкт-Петербург, улица Хлопина, д. 8, корп. 3, литера А). E-mail: imukhin@yandex.ru SPIN-код: 3242-8122, AuthorID: 546023, ORCID: 0000-0001-9792-045X.

**Афонин Олег Николаевич**, к.т.н., старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: sunweb@mail.ru SPIN-код: 1767-5835, AuthorID: 167545, ORCID: 0009-0008-7947-3674.

**Татур Вадим Юрьевич**, исполнительный директор, Фонд перспективных технологий и новаций (125315, Россия, Москва, 2-й Амбулаторный пр-д, д. 8, стр. 1). E-mail: v\_tatur@mail.ru SPIN-код: 5383-2035, AuthorID: 1292871, ORCID: 0000-0002-6415-5189.

**Лукьяница Андрей Александрович**, д.т.н., ведущий научный сотрудник, Фонд перспективных технологий и новаций (125315, Россия, Москва, 2-й Амбулаторный пр-д, д. 8, стр. 1); Факультет вычислительной математики и кибернетики, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ул. ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52). E-mail: andrei\_luk@mail.ru SPIN-код: 6172-6061, AuthorID: 4162, ORCID: 0000-0002-0517-0602.

**Пономаренко Елена Александровна**, чл.-корр. РАН, д.б.н., директор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: 2463731@gmail.com SPIN-код: 8427-5490, AuthorID: 180406, ORCID: 0000-0001-8527-6003.

**Арчаков Александр Иванович**, Академик РАН, д.б.н., профессор, научный руководитель, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: alexander.archakov@ibmc.msk.ru SPIN-код: 9412-0222, AuthorID: 78435, ORCID: 0000-0002-2290-8090.

**Иванов Юрий Дмитриевич**, д.б.н., профессор, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича» (ИБМХ) (119121, Россия, Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8). E-mail: yurii.ivanov.nata@gmail.com SPIN-код: 7935-0461, AuthorID: 78445, ORCID: 0000-0001-5041-1914.

## Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей (в редакции 2026 г.)

1. Журнал «Прикладная физика» ориентирован в основном на срочную публикацию кратких статей о последних достижениях в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения. Журнал входит в новый Перечень ВАК, вступивший в действие 1 декабря 2015 г.

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии, учредителю и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т. ч. «авторское право»). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

### Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи \_\_\_\_\_ предоставляем редколлегии, учредителю и издателю журнала «Прикладная физика» безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций. Подписи авторов: \_\_\_\_\_ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9, АО «НПО «Орион», Редакция журнала «Прикладная физика» или по электронной почте: [advance@orion-ir.ru](mailto:advance@orion-ir.ru)

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке.

3. Рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке.

4. Объем статьи (вместе с рисунками, библиографией и англоязычной частью) не должен превышать **7 страниц** формата А4 при однократном межстрочном интервале. (Статью большего объема предлагается направлять в аффилированный журнал "**Успехи прикладной физики**", предназначенный для публикации развернутых статей и обзоров). Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word (гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 12), причем текст уже должен содержать в нужном месте рисунки и подписи под ними. Однако следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

- название раздела журнала;
- индекс УДК;
- код классификации PACS ([https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS\\_2010\\_Alpha.pdf](https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf));
- заголовок статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- аннотация статьи (10–15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);
- ключевые слова;
- шифр научной специальности.

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

Внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) (**обязательный раздел**): фамилия, имя, отчество (полностью), **e-mail (всех авторов)**, профили и регистрационные номера в наукометрических базах данных (SPIN-код, РИНЦ Author ID, ArXiv Author ID, Orcid ID, Scopus Author ID), ученая степень, звание, должность, почтовый адрес (предприятия).

Также необходимо указать ответственного за переписку с редакцией.

Авторы могут предложить возможных рецензентов (2–3 человека с указанием ФИО (полностью), места работы и адрес электронной почты). При этом предполагаемые кандидаты не должны работать в учреждениях, в которых работают авторы.

После основного текста – список использованных источников под названием «Список литературы». Примеры обозначения в разделе "Список литературы" использованных источников.

Ссылка на **статьи** дается следующим образом: Фамилия И.О., название журнала, год, том, номер, номера страниц.

*Иванов И. И.* / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12–18; <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-12-18>

*Lang D. V.* / J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023–3034.

Ссылка на **книги**: Фамилия И.О., название книги, город, издательство, год. (При ссылке на определенную главу или страницу в книге после года ставится номер страницы.)

*Корн Г., Корн Е.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.

*Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. С. 371.

*Ультрафиолетовые технологии в современном мире* / под ред. Кармазинов Ф. В. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. – Долгопрудный: Интеллект, 2012.

Ссылка на **материалы конференции**: Фамилия И.О., название публикации, место и дата проведения, номера страниц.

*Романов А. В., Степович М. А., Филиппов М. Н.* / Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2007. С. 592–599.

Ссылка на **патенты**: Фамилия И.О., название, вид, номер, год.

*Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Якубов Р. Х.* Вакуумный искровой разрядник. Патент на изобретение № 2654494 (РФ). 2018.

Ссылка на **диссертации и авторефераты**: Фамилия И.О., название работы (автореферата), дисс. ... канд. (д-ра) физ.-мат. наук, город, организация, год.

*Гречихин В. А.* Разработка и анализ компьютерных алгоритмов обработки одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1996.

Далее размещается подробная англоязычная информация о статье, необходимая для индексирования всего журнала, данной статьи и её авторов в международных наукометрических базах данных, а именно: PACS, название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, его почтовый адрес, e-mail автора (авторов), аннотация, ключевые слова (Keywords), пристатейная библиография (References); поскольку журнал распространяется и за рубежом, редакция оставляет за собой право корректировать английскую часть текста без изменения его смысла.

Оформление пристатейной библиографии в англоязычной части статьи (References) имеет свои особенности. В частности, если цитируемая книга или монография является русскоязычным переводом с зарубежного издания, то указываются исходные данные этого издания (авторы, название книги, издательство, город или страна, год издания), а также русскоязычное издательство и год издания на русском языке. Ниже приведены основные примеры обозначения использованных источников в разделе References:

**Статья из журнала:**

*Ivanov I. I., Applied Physics, № 1, 12–18 (2022) [in Russian].*

*Lang D. V., J. Appl. Phys. 45 (7), 3023–3034 (1974).*

*Примечание:* если русскоязычный журнал имеет печатный англоязычный аналог, то используется английское название аналога и номера страниц должны быть указаны из него. Если англоязычного аналога нет, то применяется английская транслитерация русскоязычного названия.

**Книга:**

*Korn G. and Korn E. Mathematical Handbook. New York-London: McGraw-Hill Book Company, 1968; Moscow, Nauka, 1974.*

*Ultraviolet technologies in the modern world / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N. Dolgoprudny: Intellect, 2012 [in Russian].*

**Материалы конференции:**

*Romanov A. V., Stepovich M. A., and Filippov M. N. Proc. XVII Intern. Meeting on Radiation Physics of Solid State. Sevastopol, 2007, pp. 592–599.*

**Патенты:**

*Davydov S. G., Dolgov A. N., Yakubov R. H. Vacuum spark gap. Patent for invention № 2654494 (RF). 2018.*

**Диссертации и авторефераты:**

Grechikhin V. A. Development and analysis of computer algorithms for processing single-particle signals of laser Doppler anemometers: Abstract. Diss. Candidate of Technical Sciences. M., MEI, 1996.

6. Список использованных источников («Список литературы») должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Эти ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1–3], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (3), уравнение (1), (рис. 2), (табл. 3). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются.

7. Количество рисунков и фотографий для типовой статьи не должно превышать 4. Если один рисунок содержит два, три или более вариантов графических (или фото) изображений типа «рис. 2а», «рис. 2б» и т. д., то каждый отдельный вариант в этом случае засчитывается как отдельный рисунок. При превышении вышеуказанных лимитов на количество рисунков (фотографий) статья возвращается авторам на переработку. Графика (черно-белая и цветная) представляется непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе. Рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только (**строго!**) в символьной (буквенной) форме, а через запятую – размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только (**строго!**) на белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются.

8. Подписи под соответствующими рисунками представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию. Любой указываемый в подписи физический (технический) символ должен иметь там же свое словесное раскрытие.

9. Простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы – с использованием редактора формул MathType. Стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв – наклонный шрифт (курсив). Векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее) или стрелкой над курсивным символом вектора (менее желательно). Для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п. Размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

10. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка – наименование данных и размерность; следующие строки – сами данные.

11. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

12. Рукописи, а также CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

13. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

14. При публикации в журнале каждая статья сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов). В статье указывается также дата поступления статьи в редакцию.

Прикладная физика: Научно-технический журнал / ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», 2026. № 3. С. 1–114.

Главный редактор: И.Д. Бурлаков  
Редакторы: И.В. Терехова, Н.В. Ильина  
Корректор: Г.В. Самарин

Подписано в печать 5.06.2026  
Формат А4. Бумага офсетная.  
Печать цифровая.  
Тираж 140 экз. Цена договорная.  
Отпечатано в типографии ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ».  
Адрес: 119071, Москва, ул. Малая Калужская, 15.  
Тел. (495) 749-45-84

