

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2022. Том 17, № 1

СОДЕРЖАНИЕ

Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

- Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сковородин Д. И., Никифоров Д. А., Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Кенжебулатов Е. К., Петренко А. В., Никитин О. А., Ахметов А. Р., Протас Р. В., Хренков С. Д., Журавлев И. А., Пензин И. В., Дон А. Р. Исследование поперечной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе 5
- Куксанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н. Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15 23

Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

- Адамов Н. П., Мищенко Н. А., Часовников Е. А. О динамических коэффициентах демпфирования конически-сферического тела при числе Маха $M = 2,3$ 34
- Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А., Художников В. Э. Истечение этанола в среду с варьируемой степенью разрежения 47
- Гулов М. А. Оптимизация параметров лазерной наплавки порошка на основе системы никель-алюминий 65

Физика твердого тела, полупроводников, наноструктур

- Рыбак А. А., Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Николаев Н. А. Разработка узкополосного фильтра для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцевых спектрометрах 78

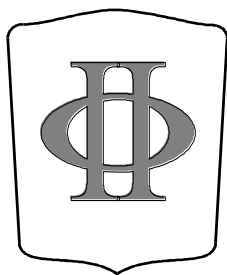
Учебно-методическое обеспечение преподавания физики

- От редактора 93
- Александров В. А., Богоявленская О. А., Ульянов А. П. Кафедра высшей математики физического факультета Новосибирского государственного университета 94
- Альперович В. Л., Квон З. Д., Латышев А. В. Кафедра физики полупроводников физического факультета Новосибирского государственного университета 104
- Анненков В. В., Аржанников А. В., Багрянский П. А., Беклемишев А. Д., Давыденко В. И., Синицкий С. Л., Сковородин Д. И., Судников А. В., Черноштанов И. С., Федоренков Э. А., Шошин А. А. Кафедра физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета 118

Шалагин А. М., Ильичев Л. В. Кафедра квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета	142
Глушак А. А. Кафедра физико-технической информатики физического факультета Новосибирского государственного университета	150
Тельнов В. И. Кафедра физики ускорителей физического факультета Новосибирского государственного университета	155

Краткие сообщения

Ачасов Н. Н. О четырехкварковой природе легких скалярных мезонов	161
Исправление к статье: Кожевников А. А. Электронный спектр графена // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2011. Т. 6, № 3, с. 71	166
Информация для авторов	167



Сибирский физический журнал

Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal

Since 2006

In Russian

2022. Volume 17, № 1

CONTENTS

High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma

- Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Nikiforov D. A., Logachev P. V., Bak P. A., Zhivankov K. I., Kenzhebulatov E. K., Petrenko A. V., Nikitin O. A., Akhmetov A. R., Protas R. V., Khrenkov S. D., Zhuravlev I. A., Penzin I. V., Don A. R.* Investigation of Transverse Instability of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Linear Induction Accelerator 5

- Kuksanov N. K., Vorobev D. S., Salimov R. A., Fadeev S. N.* The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator 23

Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

- Adamov N. P., Mishchenko N. A., Chasovnikov E. A.* About the Dynamic Damping Coefficients of a Segmental-Cone Model at Mach $M = 2.3$ 34

- Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovin K. A., Khudozhitkov V. E.* Flow of Ethanol into a Medium with Varying Degrees of Rarefaction 47

- Gulov M. A.* Optimization of Parameters of Laser Cladding of the Powder Based on Nickel-Aluminium System 65

Solid-State and Semiconductor Physics, Physics of Nanostructures

- Rybak A. A., Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Nikolaev N. A.* Design of a Narrowband Filter for Implementing the Undersampling Method in Terahertz Time-Domain Spectrometers 78

Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

- From Editor 93

- Aleksandrov V. A., Bogoyavlenskaya O. A., Ulyanov A. P.* Higher Mathematics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University 94

- Alperovich V. L., Kvon Z. D., Latyshev A. V.* Department of Semiconductor Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University 104

- Annenkov V. V., Arzhannikov A. V., Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Davydenko V. I., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Sudnikov A. V., Chernoshtanov I. S., Fedorenkov E. A., Shoshin A. A.* Department of Plasma Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University 118

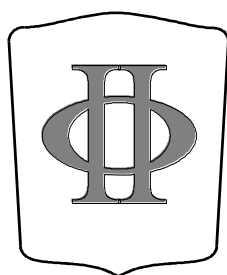
ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1

<i>Shalagin A. M., Ilichev L. V.</i> Quantum Optics Department of the Physics Department at Novosibirsk State University	142
<i>Glushak A. A.</i> Chair of Physical and Technical Informatics of the Physics Department at Novosibirsk State University	150
<i>Telnov V. I.</i> Accelerator Physics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University	155

Brief Communications

<i>Achasov N. N.</i> Four-Quark Nature of Light Scalar Mesons	161
Instructions to Contributors	166



Siberian Journal of Physics

The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physicochemical computer science.

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite scientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum Optics, Quantum Electronics;
- Radiophysics and Electronics;
- The theoretical and Mathematical Physics;
- Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases;
- High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma;
- Solid-state and semiconductor physics, physics of nanostructures;
- Chemical, Biological and Medical Physics;
- Computer Science, Information-Communication Technologies;
- Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

Periodicity of an exit of the edition – 4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov
Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar
 S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, B. A. Knyazev, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev
 A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin
 V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

*The series is published quarterly in Russian since 2006
 by Novosibirsk State University Press*

The address for correspondence
 Physics Department, Novosibirsk State University
 Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia
 Tel. +7 (383) 363 44 25

E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru
On-line version: <http://elibrary.ru>; <http://www.phys.nsu.ru/vestnik/>

Научная статья

УДК 537.533.7

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22

Исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе

Евгений Сергеевич Сандалов¹, Станислав Леонидович Синицкий²
Дмитрий Иванович Сковородин³, Данила Алексеевич Никифоров⁴
Павел Владимирович Логачев⁵, Петр Алексеевич Бак⁶
Кирилл Игоревич Живанков⁷, Ермек Какимович Кенжебулатов⁸
Алексей Васильевич Петренко⁹, Олег Альфредович Никитин¹⁰
Александр Рамзисович Ахметов¹¹, Роман Викторович Протас¹²
Сергей Дмитриевич Хренков¹³, Игорь Алексеевич Журавлев¹⁴
Илья Владимирович Пензин¹⁵, Антон Робертович Дон¹⁶

¹⁻⁹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹⁻⁴ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹⁰⁻¹⁶ Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
Снежинск, Россия

¹ E.S.Sandalov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-0126-7519>

² S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>

³ D.I.Skovorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>

⁴ D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

⁵ P.V.Logatchov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3238-8703>

⁶ P.A.Bak@inp.nsk.su; ⁷ K.I.Zhivankov@inp.nsk.su

⁸ E.K.Kenzhebulatov@inp.nsk.su

⁹ A.V.Petrenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-7772-8206>

¹⁰⁻¹⁶ vniitf@vniitf.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований развития поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) на энергию электронов до 5 МэВ, созданном в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ. Эти результаты получены с помощью программного комплекса, позволяющего моделировать динамику развития неустойчивости, а также рассчитывать средний инкремент ее развития по длине ускорителя. Комплекс состоит из четырех основных частей. Первая из них, выполненная на основе трехмерной модели электродинамической системы ускоряющего модуля ЛИУ, позволяет рассчитывать основные характеристики собственных электромагнитных колебаний такого модуля, вторая и третья части созданы для нахождения трехмерных ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей соответственно. В последней части комплекса производится решение системы обыкновенных

© Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сковородин Д. И., Никифоров Д. А.,
Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Кенжебулатов Е. К.,
Петренко А. В., Никитин О. А., Ахметов А. Р., Протас Р. В.,
Хренков С. Д., Журавлев И. А., Пензин И. В., Дон А. Р., 2022

дифференциальных уравнений, описывающих как движение макрочастиц пучка в электрических и магнитных полях, создаваемых в том числе и собственными модами ускорительных модулей, так и возбуждение полей этих мод самим пучком электронов. Адекватность используемых физических моделей, заложенных в программный комплекс, тестировалась путем сравнения спектров колебаний полей в ускорительных модулях, полученных в расчетах и зарегистрированных в эксперименте. На основе полученных данных выявлены основные закономерности развития поперечной неустойчивости пучка в диапазоне частот $\Delta f = 0,3\text{--}1,1$ ГГц, а также предложены возможные способы подавления этой неустойчивости в ЛИУ.

Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, сильнооточный релятивистский электронный пучок, поперечная неустойчивость пучка, ускорительный модуль, дипольные колебания

Источник финансирования

Основная доля исследований проведена в ИЯФ СО РАН: работы, описанные в разделах 3.2 и 3.3 выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (грант № 19-12-00212), а в остальных разделах – за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-32-90057).

Эксперименты с получением пучка электронов при энергии 5 МэВ проводились в коллаборации с РФЯЦ ВНИИТФ.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. В. Бурдакову, А. В. Аржанникову, П. В. Калинину и В. Н. Волкову за полезные замечания и обсуждения в ходе проведения исследований.

Для цитирования

Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сквородин Д. И., Никифоров Д. А., Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Кенжебулатов Е. К., Петренко А. В., Никитин О. А., Ахметов А. Р., Протас Р. В., Хренков С. Д., Журавлев И. А., Пензин И. В., Дон А. Р. Исследование поперечной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 5–22. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22

Investigation of Transverse Instability of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Linear Induction Accelerator

Evgeniy S. Sandalov¹, Stanislav L. Sinitsky², Dmitry I. Skovorodin³
Danila A. Nikiforov⁴, Pavel V. Logachev⁵, Petr A. Bak⁶
Kirill I. Zhivankov⁷, Ermek K. Kenzhebulatov⁸, Alexey V. Petrenko⁹
Oleg A. Nikitin¹⁰, Alexander R. Akhmetov¹¹, Roman V. Protas¹²
Sergey D. Khrenkov¹³, Igor A. Zhuravlev¹⁴, Iliya V. Penzin¹⁵
Anton R. Don¹⁶

^{1–9} Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

^{1–4} Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

^{10–16} Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center –
Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”
Snezhinsk, Russian Federation

¹ E.S.Sandalov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-0126-7519>

² S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>

³ D.I.Skovorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>

⁴ D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

⁵ P.V.Logatchov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3238-8703>

⁶ P.A.Bak@inp.nsk.su; ⁷ K.I.Zhivankov@inp.nsk.su

⁸ E.K.Kenzhebulatov@inp.nsk.su

⁹ A.V.Petrenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-7772-8206>

^{10–16} vniitf@vniitf.ru

Abstract

The article presents the results of studies on the transverse instability of a high-current relativistic electron beam developing in a linear induction accelerator LIA for 5 MeV electron energy, which is created at the BINP SB RAS together with RFNC VNIITF. These results were obtained using a software package that makes it possible to simulate

the dynamics of the instability development, as well as to calculate the increment of this instability averaged over the accelerator length. The package consists of four main parts. The first of them, made on the base of a three-dimensional model of the accelerating module electrodynamic system of the LIA, allows calculating the main characteristics of electromagnetic dipole modes of such a module, the second and third parts are designed to find three-dimensional accelerating electric and focusing magnetic fields, respectively. In the last part of the package, a system of ordinary differential equations is solved that describes both the motion of beam macroparticles in electric and magnetic fields, including the eigenmode fields, and the excitation of the mode fields by the electron beam. The adequacy of the physical models used in the software package was tested by comparing the spectra of field oscillations in the accelerator modules obtained in calculations and recorded in the experiment. On the base of the data obtained, the main regularities of the transverse beam instability development in the frequency range $\Delta f = 0.3\text{--}1.1$ GHz were revealed, and possible methods for suppressing this instability in the LIA were proposed.

Keywords

linear induction accelerator, high-current relativistic electron beam, beam transverse instability, accelerator module, dipole oscillations

Funding

The main part of the research was carried out at the Institute of Nuclear Physics SB RAS: the works described in sections 3.2 and 3.3 were supported by the Russian Science Foundation (project № 19-12-00212), and in other sections were supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-32-90057). Experiments with an electron beam at an energy of 5 MeV were carried out in collaboration with RFNC VNIITF.

The authors express their sincere gratitude to A. V. Burdakov, A. V. Arzhannikov, P. V. Kalinin, V. N. Volkov for useful remarks and discussions in the course of the research.

For citation

Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Nikiforov D. A., Logachev P. V., Bak P. A., Zhivankov K. I., Kenzhebulatov E. K., Petrenko A. V., Nikitin O. A., Akhmetov A. R., Protas R. V., Khrenkov S. D., Zhuravlev I. A., Penzin I. V., Don A. R. Investigation of Transverse Instability of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Linear Induction Accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 5–22. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22

Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведутся работы по созданию нового линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) для генерации интенсивного релятивистского электронного пучка высокой яркости. Основные параметры пучка, которые планируется достигнуть в таком ускорителе: энергия электронов $E_e = 20$ МэВ, ток пучка $I_b = 2$ кА, длительность импульса $\tau_b = 160$ нс и нормализованный эмиттанс ~ 1000 п·мм·мрад. Получение таких параметров пучка и особенно указанного значения эмиттанса приводят к необходимости изучения различного рода источников возмущения траекторий электронов в ЛИУ, а также поиска путей их подавления. Одним из основных источников поперечных возмущений пучка является развитие поперечной неустойчивости пучка (Beam-Breakup Instability, BBU), которая при наложении ограничения на амплитуду поперечных колебаний центроида пучка ограничивает величину его тока.

В первых экспериментах по генерации и ускорению пучка в ЛИУ на энергию 5 МэВ были зарегистрированы сильные поперечные колебания пучка как целого с частотой 0,318 ГГц и добротностью 40, возникающие при токе пучка выше 1 кА. Одной из наиболее вероятных причин развития подобных колебаний является поперечная неустойчивость электронного пучка, известная как BBU [1–3]. Механизм возбуждения этой неустойчивости обусловлен раскачкой пучком собственных дипольных мод в ускорительных модулях ЛИУ, которые, в свою очередь, возбуждают поперечные колебания пучка как целого. Такая модуляция поперечного движения центроида пучка (центроид – это центр распределения плотности заряда в поперечном сечении пучка) существенно увеличивает эффективность возбуждения пучком таких же мод в последующих ускорительных модулях. В результате этого механизма поперечная неустойчивость приобретает конвективный характер, т. е. в каждом отдельно взятом модуле амплитуда колебаний дипольных мод может даже уменьшаться с течением времени, но вследствие модуляции поперечного движения пучка амплитуда колебаний экспоненциальным образом возрастает от модуля к модулю. Помимо колебаний центроида пучка такая

неустойчивость может приводить к размыванию поперечного сечения пучка и соответственно к росту его эмиттанса.

В данной статье будут представлены описание программного комплекса, позволяющего моделировать динамику развития поперечной неустойчивости во времени, а также результаты проведенных с его помощью исследований этой неустойчивости в случае электронного пучка с килоамперными токами.

1. Общая схема ЛИУ

Общая схема ЛИУ на энергию 5 МэВ представлена на рис. 1. Он состоит из инжектора электронного пучка и ускоряющей структуры [4–6]. Основным элементом инжектора является оксидный катод с диаметром 180 мм, который генерирует электронный пучок с током до 2 кА. Генерируемый катодом пучок ускоряется в инжекторе до энергии 2 МэВ с помощью индукционного электрического поля, создаваемого синхронной работой последовательности 92 расположенных в нем магнитных индукторов. Проводка электронного пучка внутри инжектора осуществляется с помощью трех магнитных линз. С выхода инжектора электронный пучок направляется далее в ускоряющую структуру, состоящую из восьми ускорительных модулей, максимальное ускоряющее напряжение каждого из которых достигает значения $U = 400$ кВ. В составе ускоряющей структуры располагаются пятнадцать магнитных линз с индукцией магнитного поля на оси $\sim 0,2$ Тл, система которых обеспечивает высокую эффективность прохождения пучка по всей ее длине. В результате проведения нескольких серий экспериментов с целью выбора наиболее оптимального режима работы ускорителя, а также частичной модернизации его ускорительных модулей [7] были получены заложенные в проекте параметры пучка: энергия электронов $E_e = 5$ МэВ, ток пучка $I_b = 2$ кА, длительность импульса $\tau_b = 160$ нс, радиус пучка $r_b = 2$ см.

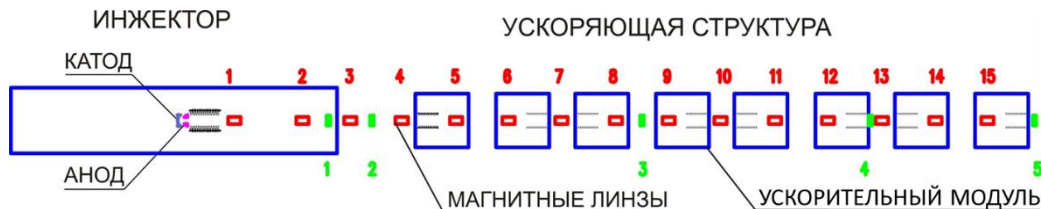


Рис. 1. Схема линейного индукционного ускорителя на энергию $E_e = 5$ МэВ. Синим цветом показаны корпуса ускорительных модулей и инжектора, красным – фокусирующие магнитные линзы, зеленым – датчики положения пучка в канале транспортировки, серым – ускоряющие трубки

Fig. 1. Scheme of a linear induction accelerator for an energy of $E_e = 5$ MeV. Accelerator modules shells and the injector are shown in blue, the focusing magnetic lenses are in red, the beam position sensors in the transport channel are in green, and the accelerating tubes are in gray

Как уже упоминалось, практически во всех сериях экспериментов, начиная с самых первых отладочных опытов и заканчивая финальной серией, проведенной в оптимальном режиме работы ускорителя с модернизированными ускорительными модулями, наблюдались колебания центроида пучка на выходе ускорителя с дискретными частотами в интервале $\Delta f = 0,3\text{--}1,1$ ГГц и добротностями $Q = 40\text{--}100$. Эти колебания были зарегистрированы прямым образом с помощью серии датчиков положения пучка (пикапов, Beam Position Monitor), расположенных вдоль всего канала транспортировки пучка в ускорительной структуре. Сигналы с такой же временной динамикой были зарегистрированы с помощью быстрых транс-

форматоров тока, предназначенных для регистрации тока пучка внутри каждого ускорительного модуля (см. (б) на рис. 2). Как оказалось, эти датчики регистрировали помимо сигнала магнитного поля тока пучка, прошедшего через ускорительный модуль, также и сигнал, пропорциональный напряженности полей собственных мод колебаний в этом модуле. Из анализа характера нарастания амплитуды колебаний в датчиках тока пучка от модуля к модулю вдоль направления его распространения в ЛИУ, а также из зависимости этих амплитуд от магнитного поля в фокусирующих линзах был сделан вывод о механизме развития поперечной неустойчивости пучка [7].

2. Теоретические оценки инкремента поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ

В связи со сложностью аналитического описания механизма генерации колебаний пучка на частотах дипольных мод ускорительных модулей в условиях конкретной конструкции линейного индукционного ускорителя в настоящее время не существует общей теории поперечной неустойчивости. Тем не менее, для сформированной структуры рассматриваемого ЛИУ, в котором фокусировка пучка осуществляется с помощью системы дискретных коротких магнитных линз, наиболее приемлемые результаты дает рассмотрение данной задачи в рамках теоретической модели Нила – Холла – Купера [2]. Использование этого модельного рассмотрения требует выполнения ряда условий, среди которых ключевыми являются возбуждение пучком единственной, одинаковой для всех ускорительных модулей, дипольной моды, а также тождественность преобразований координат и импульсов частиц пучка фокусирующими линзами на всех промежутках между соседними ускоряющими зазорами. При соблюдении отмеченных ключевых требований, данная теоретическая модель предсказывает рост амплитуды колебаний центроида пучка во времени в N -м ускорительном модуле ЛИУ в соответствии со следующим выражением (в единицах СГС):

$$\xi_N(t) \approx d \frac{\exp[\sqrt{\delta\omega}t - \alpha t]}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\delta\omega}t}, \quad (1)$$

где d – это начальная амплитуда колебаний в первом модуле ЛИУ, $\delta = \frac{2Nk\rho I_b}{I_A}$ – безразмер-

ный параметр, $\alpha = \frac{\omega}{2Q}$ – декремент затухания и ω – реальная часть частоты дипольной мо-

ды, Q – ее добротность, N – номер ускорительного модуля, k – коэффициент связи моды с пучком, пропорциональный поперечному импедансу Z_{\perp} ускоряющего промежутка

$\left(k = \frac{Z_{\perp}}{Qc}\right)$, $\rho = \frac{pc}{eB}$ – ларморовский радиус электрона в среднем магнитном поле B между

ускорительными модулями, p – полный импульс электрона, I_b – ток пучка, $I_A = \gamma\beta \frac{mc^3}{e}$ –

ток Альфвена.

Однако в реальных условиях экспериментов на ЛИУ, как правило, наблюдается одновременное возбуждение в модулях нескольких дипольных мод с различными частотами. Кроме того, для достижения наибольшей яркости пучка настройка фокусирующей системы ЛИУ производится с целью снижения амплитуды колебаний его огибающей до уровня ниже 10 %, что несовместимо со вторым из указанных требований в условиях применимости этой теоретической модели. Таким образом, структура ускорителя и требования по достижению оптимальных условий генерации и ускорения пучка не позволяют удовлетворить требованиям

применимости теоретической модели Нила – Холла – Купера. В связи с этими обстоятельствами для разработки сильноточных ЛИУ создаются компьютерные коды, предназначенные для численного моделирования транспортировки пучка в ускорительной структуре, позволяющие включать в описание процесса и развитие поперечной неустойчивости. Примеры подобных зарубежных кодов приведены в работах [3; 8–10]. В то же время нельзя не отметить, что даже при некотором нарушении требований в условиях применимости модели Нила – Холла – Купера полученное в ее рамках решение правильно описывает характерные особенности развития поперечной неустойчивости пучка во времени на качественном уровне.

Следуя этой теоретической модели, можно предположить, что при неограниченной длительности импульса пучка в каждом отдельном ускорительном модуле существует два следующих друг за другом по времени режима развития поперечной неустойчивости. На начальном отрезке времени, когда реализуется первый режим развития неустойчивости, показатель экспоненты (см. (1)) растет приблизительно корневым образом от времени до момента достижения его максимума. После этого момента времени наступает второй режим, в котором изменяется характер поведения показателя во времени. Далее по времени показатель уменьшается, и вдали от момента времени прохождения через максимум его снижение носит линейный характер. Такое поведение показателя экспоненты свидетельствует об экспоненциальном затухании колебаний пучка по времени в каждом отдельном модуле. Однако при переходе от модуля к модулю в один и тот же момент времени амплитуда колебаний имеет всегда нарастающий характер. Продолжительность первого режима развития колебаний в отдельном модуле $-t_{\max}$ дается выражением $t_{\max} = \frac{2Nk\rho I_b}{\omega I_A} Q^2$, где обозначение вели-

чин совпадает с таковым для выражения (1).

При этом в конце указанного отрезка времени достигается максимальное значение показателя экспоненты в (1), равное $\frac{Nk\rho I_b Q}{I_A}$, которое при делении на номер модуля определяет максимальный инкремент неустойчивости:

$$\Gamma_m = \frac{k\rho I_b Q}{I_A}, \quad (2)$$

Как видно из (2), максимум инкремента падает с уменьшением добротности дипольной моды Q .

Таким образом, при длительности пучка $\tau < t_{\max}$ для данного ускорительного модуля будет происходить непрерывный рост амплитуды колебаний в течение всего импульса тока, а при $\tau > t_{\max}$ будут наблюдаться вначале рост, а затем экспоненциальный спад. Поскольку современные ЛИУ генерируют пучки с токами в несколько килоампер при длительностях импульса более 100 нс в условиях, когда добротности наиболее неустойчивых дипольных мод снижены применением поглотителей до величин 5–10, то длительность пучка существенно превышает t_{\max} для большинства модулей ЛИУ. Этот факт позволяет для оценки характерной величины коэффициента усиления амплитуды поперечных колебаний пучка при переходе от одного модуля к другому использовать максимальное значение инкремента этой неустойчивости, который дается следующим выражением:

$$K = \exp(\Gamma_m) = \exp\left(\frac{k\rho I_b Q}{I_A}\right). \quad (3)$$

Исходя из выражения (3), очевидными способами снижения коэффициента усиления K при постоянном токе пучка являются: уменьшение коэффициентов связи мод с пучком, уве-

личение магнитных полей линз и уменьшение добротностей наиболее неустойчивых дипольных мод ускоряющих модулей. Помимо этого амплитуда поперечных колебаний пучка на выходе из ЛИУ может быть уменьшена путем сокращения полного числа ускорительных модулей, а также разведением частот наиболее неустойчивых мод по разным неперекрывающимся диапазонам за счет изменения конструкции части модулей ЛИУ, что эквивалентно уменьшению эффективного числа ускорительных модулей с одинаковыми частотами мод.

3. Моделирование поперечной неустойчивости сильноточного электронного пучка в ЛИУ

В отсутствие возможности теоретического рассмотрения динамики поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с приемлемой точностью мы сосредоточились на разработке программного кода для решения задачи о транспортировке и ускорении сильноточного релятивистского электронного пучка в структуре ЛИУ в условиях максимального учета ее конкретных особенностей. Процесс решения задачи был разбит на несколько этапов. На первом из них мы проводили расчеты характеристик всех дипольных мод ускоряющего модуля ЛИУ, из которых отбирали моды с наибольшими добротностями и коэффициентами связи их с пучком [7]. На втором этапе осуществлялся расчет ускоряющих электрических полей в модулях ЛИУ, после чего производился выбор магнитной конфигурации фокусирующей системы ЛИУ, обеспечивающей минимальную амплитуду осцилляций огибающей пучка на всём пути его следования внутри ускорителя. Для этого решалась самосогласованная задача о транспортировке сильноточного РЭП в стационарных ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полях с учетом действия собственных электрических и магнитных полей пучка. Более детально методика расчета и подбора магнитных полей, а также сравнение результатов расчетов транспортировки релятивистского электронного пучка с экспериментальными данными описаны в [6]. На третьем этапе осуществлялся расчет транспортировки и ускорения пучка в ЛИУ с учетом его взаимодействия с полями наиболее неустойчивых дипольных мод, отобранных на первом этапе.

3.1. Расчеты свойств дипольных мод электродинамической системы ускорительного модуля ЛИУ

Электродинамическая система ЛИУ представляет собой группу последовательно расположенных ускорительных модулей, соединенных между собой цилиндрическими каналами круглого сечения. Поскольку эти каналы являются односвязными волноводами с частотой отсечки 1,16 ГГц, то все моды такой системы могут быть разделены на две группы: моды с частотами ниже частоты отсечки, локализованные в отдельных модулях, и обобществленные по совокупности модулей моды, частота которых выше этой величины. Согласно экспериментальным данным по спектральному составу возбуждаемых при поперечной неустойчивости мод, который был выявлен в мировой практике использования сильноточных ЛИУ, в том числе и в наших исследованиях, наиболее эффективно возбуждаются пучком именно низкочастотные моды, локализованные в отдельных модулях. По этой причине в дальнейшем будем рассматривать процесс возбуждения и эволюции только этих мод [7; 11; 12]. Очевидно, что поля этих изолированных мод должны экспоненциально спадать при удалении от каждого конкретного модуля в обе стороны по транспортным каналам. Это позволяет без потери точности замкнуть каждый транспортный канал проводящим торцом и тем самым получить замкнутую проводящую оболочку, состоящую из ускоряющего модуля и примыкающих к нему двух каналов, заглушенных на свободном торце (рис. 2). Далее, решая задачу Штурма – Лиувилля с помощью стандартных численных алгоритмов на основе метода конечных элементов, можно найти собственные моды такой полости. Вследствие незначительных отклонений конструкции модуля от аксиально-симметричной геометрии можно провес-

ти стандартную классификацию всех мод такой полости по зависимостям их полей от азимутального угла. Очевидно, что поля монопольных мод, не зависящие от азимутального угла, могут создавать только продольную модуляцию пучка. В отличие от них, поля дипольных мод, зависящие от угла как $\sin\alpha$ или $\cos\alpha$, должны приводить к смещению пучка как целого в поперечной плоскости и тем самым возбуждать его поперечные колебания. Для экономии компьютерных ресурсов и выделения в ходе расчета из всего обширного набора мод с частотами ниже отсечки только мод дипольного типа нами был использован метод, основанный на применении специальных граничных условий. Для его реализации из всей геометрии задачи вырезалась только одна четвертая ее часть по азимутальному углу, причем на одной из боковых граней этой четверти полагалось $E_\tau = 0$, а на другой – $H_\tau = 0$. Результаты расчетов частот и полей дипольных мод для геометрии ускорительного модуля ЛИУ приведены в [7]. В этой же работе были верифицированы частоты и добротности мод путем их сравнения с результатами измерения спектров собственных колебаний ускорительного модуля в «холодных» (без пучка) измерениях на специальном стенде.

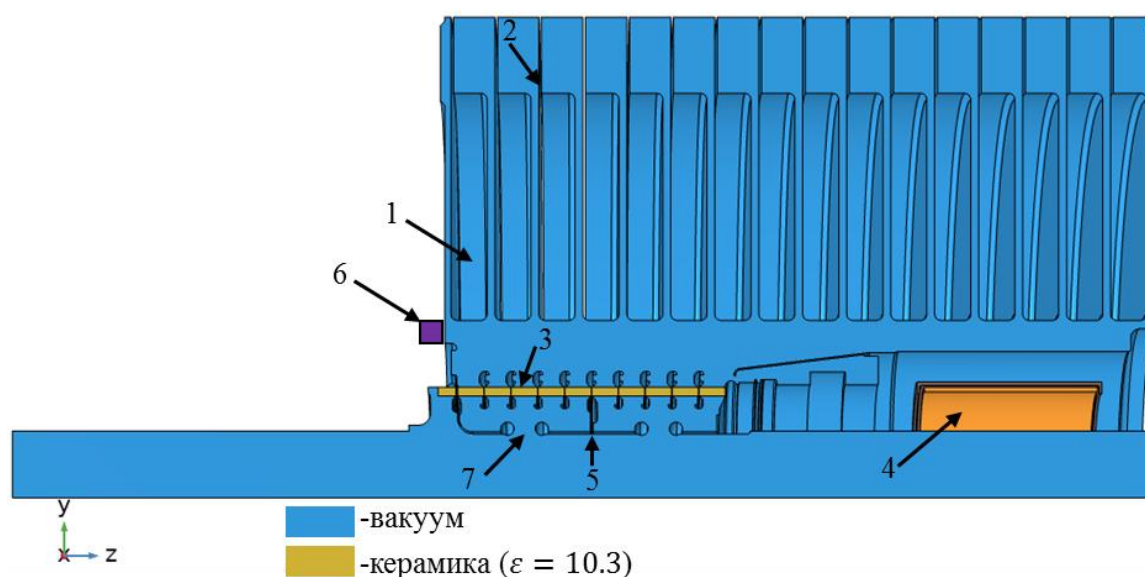


Рис. 2. Схема ускорительного модуля ЛИУ с экранирующими электродами: 1 – индуктор; 2 – первичная обмотка; 3 – ускорительная трубка с делителем напряжения; 4 – магнитная линза; 5 – экранирующие электроды; 6 – быстрый трансформатор тока; 7 – ускоряющий зазор. Длина отдельного ускоряющего зазора $d_{gap} \approx 20$ мм, расстояние между соседними зазорами в модуле $l_{gap} \approx 180$ мм

Fig. 2. Scheme of the LIA accelerator module with shielding electrodes: 1 – inductor; 2 – primary winding; 3 – accelerator tube with a voltage divider; 4 – magnetic lens; 5 – shielding electrodes; 6 – fast current transformer; 7 – accelerating gap. The length of a separate accelerating gap $d_{gap} \approx 20$ mm, the distance between adjacent gaps in the module $l_{gap} \approx 180$ mm

В результате проведенных расчетов нами были выявлены более 200 дипольных мод в диапазоне частот ниже частоты отсечки. Наибольшая доля из числа этих мод имела повышенную плотность энергии электромагнитного поля в пространственной области в окрестности электродов секционированной ускорительной трубки (см. (3) на рис. 2). В соответствии с теорией возбуждения резонаторов электронный пучок наиболее эффективно взаимодействует с модами, имеющими максимальные значения добротности и коэффициента связи с пучком. В случае первоначальной геометрии ускорительного модуля, в которой отсутствовали экранирующие электроды (см. (5) на рис. 2), наиболее неустойчивой из полученных

в расчете мод оказалась дипольная мода с частотой 0,32 ГГц и добротностью около 50, которая и была зарегистрирована нами в первых сериях экспериментов по генерации пучка в ЛИУ. Для подавления этой моды нами была предложена и реализована модификация геометрии ускоряющего модуля, которая заключалась в установке электродов (5), экранирующих ускорительную трубку от области распространения пучка. Чтобы сохранить электрическую прочность конструкции, нами было использовано три таких электрода с зазорами между ними около 20 мм, что позволило в экспериментах подавать на них ускоряющее напряжение вплоть до 400 кВ. Применение экранирующих электродов, существенно сокративших ускорительный зазор, позволило значительно уменьшить область локализации полей мод с частотами 0,3–0,7 ГГц на пути пучка и тем самым понизить коэффициент связи их с пучком. Однако влияние экранирующих электродов на коэффициенты связи дипольных мод с частотами 0,75 и 0,82 ГГц, которые практически полностью локализованы в приосевой области, где проходит пучок внутри этих электродов, оказалось не столь существенным. По этой причине именно эти моды стали доминировать в спектре колебаний пучка на выходе из ЛИУ с модифицированными ускорительными модулями [7].

3.2. Расчеты ускоряющих электрических полей в модуле ЛИУ

Вторым важным этапом в моделировании развития поперечной неустойчивости пучка явился расчет распределения ускоряющего электрического поля индукторов в приосевой области ЛИУ. Исходя из анализа геометрии рассматриваемой области с позиции электродинамики, можно утверждать, что ускоряющее поле должно быть локализовано вблизи ускоряющих зазоров каждого из модулей на расстоянии не более нескольких радиусов транспортного канала вдоль оси ускорителя. Поскольку характерная длина волны этого поля $\sim c/\tau_0$ (τ_0 – длительность импульсов тока в индукторах ЛИУ) во много раз превышает характерный размер ускорительного модуля, то эта задача решалась нами в квазистационарном приближении. Для ее решения была построена двумерная аксиально-симметричная модель, в которой электрическое и магнитное поля изменялись во времени гармоническим образом с периодом, равным $2\tau_0$. Геометрия модели приведена на рис. 3, а. Она представляет собой аксиально-симметричную замкнутую проводящую оболочку, внутри которой равномерно вдоль оси расположены 16 тороидальных индукторов с периодическим по времени изменением потока внутри них. Приосевая область, в которой распространяется пучок, отделена от места расположения индукторов секционированной ускорительной трубкой и экранирующими электродами. Каждая секция ускорительной трубки зашунтирована активным сопротивлением делителя напряжения 100 Ом. В качестве источника возбуждения полей мы задавали периодическую во времени остаточную намагниченность сердечников индукторов \vec{B}_{rem} , зависящую от радиуса внутри сердечника таким образом, чтобы молекулярные токи на поверхности сердечника совпадали с токами первичных обмоток индукторов. Поскольку в программном комплексе нами применялись стандартные модули на основе метода конечных элементов, использующие систему единиц СИ, то в дальнейшем все уравнения будут приведены в этих единицах. Система уравнений Максвелла для периодически изменяющихся полей имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -i \cdot \omega \cdot \vec{B}, \\ \vec{E} &= (\sigma + i\omega\epsilon_0\epsilon_r)^{-1} \operatorname{rot} \vec{H},\end{aligned}\tag{4}$$

где \vec{E} и \vec{B} – электрическое поле и индукция магнитного поля; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость; ω – частота; σ – проводимость материала.

Материальное уравнение для описания магнитной индукции внутри сердечников имеет вид

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_{rem}, \quad (5)$$

где остаточная намагниченность \vec{B}_{rem} для корректного замещения токов первичных обмоток индукторов определяется в цилиндрической системе координат следующим выражением:

$$\vec{B}_{rem} = \left(0, B_0 \frac{r_0}{r} e^{i\omega t}, 0 \right).$$

В качестве граничных условий на поверхности замкнутой проводящей оболочки было принято выражение $\vec{E}_\tau = 0$.

На рис. 3, б–г представлены результаты решения системы уравнений (4), (5) в условиях, когда интеграл продольного ускоряющего поля вдоль оси системы равен $\Delta\phi = 285$ кВ.

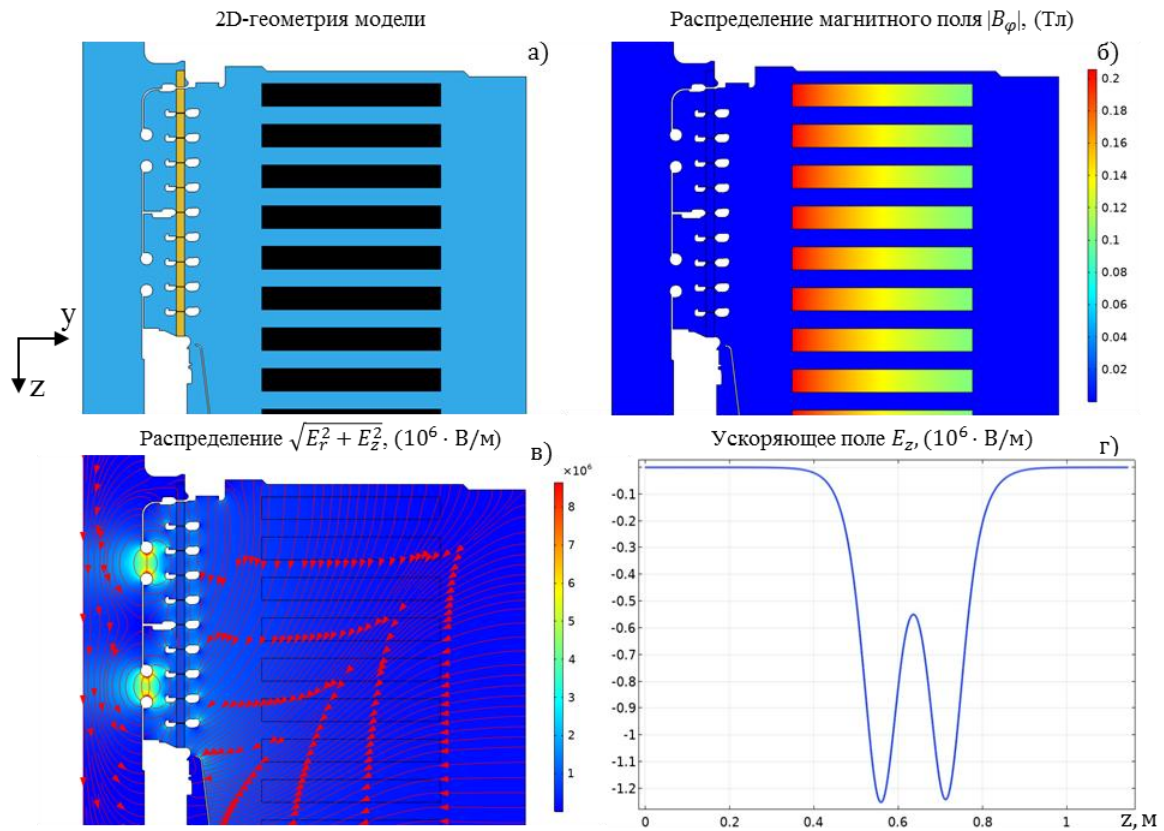


Рис. 3. Геометрия аксиально-симметричной модели ускорительного модуля (а), распределение индукции магнитного поля в продольном сечении модуля (б), распределение электрического поля в этом же сечении (в), распределение компоненты E_z ускоряющего поля на оси ускорительного модуля ЛИУ (г). Положения максимумов ускоряющего поля (по модулю) на графике (г) соответствуют z координатам ускорительных зазоров. На рисунке (в) красными стрелками показаны силовые линии электрического поля

Fig. 3. Geometry of the axially symmetric model of the accelerator module (a), distribution of the magnetic field in the longitudinal section of the module (b), distribution of the electric field in the same section (c), distribution of the E_z component of the accelerating field on the axis of the LIA accelerator module (d). The positions of the maxima of the accelerating field (modulo) on plot (d) correspond to the z coordinates of the accelerating gaps. In figure (c), the red arrows show the lines of the electric field force

Необходимо отметить, что учет точной формы импульса тока в индукторах по времени практически не должен сказываться на решении задачи до тех пор, пока выполняется квази-

стационарное приближение, и только для высокочастотных составляющих этого импульса погрешность может заметно возрасти. Что касается относительной точности вычисления полей в данной модели, то она составляет $10^{-4} \div 10^{-5}$, что является достаточным для дальнейшего расчета изменения во времени положения центрoида пучка в условиях развития поперечной неустойчивости.

3.3. Расчеты фокусирующих магнитных полей в ЛИУ

Фокусировка пучка при его распространении в ЛИУ обеспечивается пятнадцатью одинаковыми по конструкции магнитными линзами с максимальным полем на оси до 0,2 Тл (рис. 4). Каждая такая линза представляет собой двухслойную обмотку с 82 витками медного провода, которая намотана на цилиндрический каркас длиной 210 мм и диаметром 240 мм, изготовленный из капролона. Обмотка помещена в полость магнитопровода, который представляет собой ярмо, изготовленное из стали-10 толщиной 4 мм. Для моделирования распределения магнитного поля был использован стандартный метод конечных элементов. Задавая внешний ток \vec{J}_{ext} в витках катушек, производили решение уравнений магнитостатики с учетом нелинейности магнитной проницаемости материала ярма:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_{\text{ext}}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu(H) \vec{H}.$$

Поле каждой линзы рассчитывалось в приосевой области радиусом 7,5 см и длиной 15 м. Поскольку соседние линзы в фокусирующей системе были расположены на расстояниях более 1 м, их взаимная индукция не учитывалась (взаимным влиянием пренебрегали).

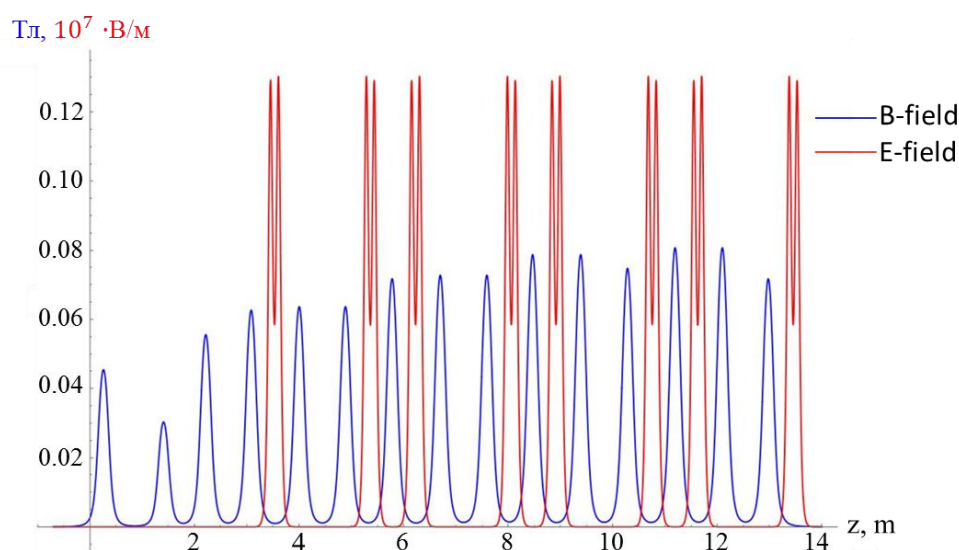


Рис. 4. Распределение фокусирующего магнитного и ускоряющего электрического полей на оси ускоряющей структуры ЛИУ, состоящей из 8 ускорительных модулей и 15 магнитных линз. Старт электронного пучка производился с координаты $Z_0 = 0$, которая соответствует пространственной области, где пучок входит в ускоряющую структуру ЛИУ. Синим цветом показано распределение магнитного поля на оси в [Тл], красным – распределение электрического поля в [В/м]

Fig. 4. Distribution of the focusing magnetic and accelerating electric fields on the axis of the LIA accelerating structure, consisting of 8 accelerator modules and 15 magnetic lenses. The electron beam was started from the coordinate $Z_0 = 0$, which corresponds to the spatial region where the beam enters the LIA accelerating structure. The blue color shows the magnetic field distribution on the axis in [T], the red color shows the electric field distribution in [V/m]

В итоге общее распределение магнитного поля на оси ускорительного тракта находилось в виде суперпозиции полей отдельных линз. Значения тока в катушках выбиралось в соответствии с требованием минимальной амплитуды колебаний огибающей пучка для достижения минимума нормализованного эмиттанта пучка на выходе его из ЛИУ. Характерное значение этого эмиттанта для рабочих режимов настройки ускорителя ЛИУ в соответствии с результатами измерений составило $\varepsilon_n = 1063 \pm 100 \text{ п·мм·мрад}$ [6].

3.4. Описание модели для расчета динамики развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ

Для моделирования развития поперечной неустойчивости пучка рассмотрим задачу о возбуждении поперечных колебаний пучка при взаимодействии его с дипольными модами электродинамической системы отдельного ускорительного модуля ускорителя. Как отмечалось выше, на первом этапе с помощью пакета программ, основанного на методе конечных элементов, решается задача Штурма – Лиувилля на собственные частоты и собственные функции в пространственной области внутри резонатора, составленного из ускорительного модуля и двух участков цилиндрических каналов (см. рис. 2):

$$\text{rot} \left[\frac{\text{rot} \vec{A}_l(\vec{r})}{\mu(\vec{r})} \right] = \frac{\omega_l^2 \varepsilon(\vec{r})}{c^2} \vec{A}_l(\vec{r}), \quad \vec{A}_{l|\Gamma} = 0. \quad (6)$$

Так как спектр возбуждаемых пучком дипольных мод, как правило, находится в относительно узком частотном интервале (в нашем случае 0,7–0,9 ГГц [7]), то на этом интервале можно пренебречь частотной дисперсией коэффициентов диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей. Следует также отметить, что в выражении (6) диэлектрические, магнитные и резистивные потери в материале тел, помещенных внутри резонатора, учитываются путем использования комплексных выражений для этих коэффициентов. В этих условиях функции $\vec{A}_l(\vec{r})$ образуют полный набор ортогональных функций:

$$\int \varepsilon(\vec{r}) (\vec{A}_l(\vec{r}), \vec{A}_m(\vec{r})) dV = \delta_{l,m} \int \varepsilon(\vec{r}) (\vec{A}_m(\vec{r}), \vec{A}_m(\vec{r})) dV,$$

по которым можно разложить любое электромагнитное поле, возбуждаемое пучком в области ускорительного модуля. Следуя методу Фурье, разложим векторный потенциал индуцируемых пучком вихревых полей в резонаторе по ортогональным функциям дипольных колебаний $\vec{A}_l(\vec{r}, t) = \sum \sigma_l(t) \vec{A}_l(\vec{r})$, тогда:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\sum \dot{\sigma}_l(t) \vec{A}_l(\vec{r}), \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \sum \sigma_l(t) \text{rot} \vec{A}_l(\vec{r}) = \sum \sigma_l(t) \vec{B}_l(\vec{r}). \quad (7)$$

Затем, подставляя (7) в уравнение Максвелла $\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ и проинтегрировав это уравнение по объему резонатора с весом $\varepsilon_0 \varepsilon(\vec{r})$ с учетом ортогональности функций $\vec{A}_l(\vec{r})$, получим:

$$\ddot{\sigma}_m + 2\gamma_m \dot{\sigma}_m + |\omega_m|^2 \sigma_m = \frac{-i\omega_m \int (\vec{J}(\vec{r}, t), \vec{E}_m(\vec{r})) dV}{\int \varepsilon_0 \varepsilon(\vec{r}) (\vec{E}_m(\vec{r}), \vec{E}_m(\vec{r})) dV} \equiv -i\omega_m \alpha_m(t), \quad (8)$$

где ω_m и γ_m – комплексное значение частоты и декремент затухания m -й моды, а $\vec{E}_m(\vec{r}) = -i\omega_m \vec{A}_m(\vec{r})$ и $\vec{B}_m(\vec{r}) = \text{rot} \vec{A}_m(\vec{r})$ – электрическое и магнитное поля моды с номером m .

Для всех исследуемых дипольных мод во всех ускорительных модулях с учетом у каждой из мод вырождения по поляризации необходимо дополнить набор уравнений вида (8) уравнениями движения частиц пучка:

$$\begin{cases} \ddot{\vec{r}}_i = c\ddot{\vec{\beta}}_i, \\ \dot{\vec{p}}_i = q_i \left(\vec{E} + c[\vec{\beta}_i \times \vec{B}] \right), \end{cases}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{acc}}(\vec{r}) + \sum \text{Im}(\dot{\sigma}_m \vec{E}_m(\vec{r})/\omega_m) + \vec{E}_b(\vec{r}, t),$$

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{lens}}(\vec{r}) + \sum \text{Re}(\sigma_m(t) \vec{B}_m(\vec{r})), \quad (9)$$

где $\vec{E}_{\text{acc}}(\vec{r})$ – ускоряющее поле в модуле; $\vec{B}_{\text{lens}}(\vec{r})$ – магнитное поле фокусирующих линз; $\vec{E}_b(\vec{r}, t)$ – собственное потенциальное электрическое поле пучка, создаваемое его объемным зарядом и наведенными пучком зарядами на стенках канала транспортировки. В отличие от собственного электрического, собственное магнитное поле пучка с учетом токов, наведенных им на стенках канала, уже присутствует в (9) в виде разложения по собственным функциям резонатора. На основе приведенных выше уравнений нами был создан собственный компьютерный код, в который импортировались поля дипольных мод $\vec{E}_l(\vec{r})$ и $\vec{B}_l(\vec{r})$ из модуля программы, рассчитывающего собственные колебания в резонаторах, а также ускоряющие электрические и магнитные поля линз из других модулей этой программы.

Далее в этом коде производилось решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с постоянным шагом по времени для движения 4 000 макрочастиц пучка, имеющих форму цилиндров малого радиуса длиной $\Delta l = 1,2$ см. Эти макрочастицы с энергией 1,5–2 МэВ поступали равномерно с шагом по времени $\Delta l/v_z$ на вход ускорительной структуры ЛИУ из инжектора и далее двигались внутри ускорителя под действием электрических и магнитных полей. Шаг интегрирования по времени ОДУ выбирался из условия малости по сравнению с периодом колебаний самой высокочастотной моды в резонаторе, при этом расчет проводился одновременно для нескольких мод с различными частотами и поляризациями в каждом ускорительном модуле. Тестирование кода проводилось для двух случаев. В первом из них в отсутствие пучка рассчитывалась динамика затухания свободных колебаний всех исследуемых мод и сопоставлялась с экспоненциальной зависимостью, определяемой декрементом каждой моды. Во втором случае в отсутствие возбуждения мод сравнивались траектории центроида пучка при его транспортировке и ускорении в ЛИУ, рассчитанные в нашем программном комплексе, с траекториями, полученными с помощью кода ASTRA [13].

4. Результаты расчетов динамики поперечной неустойчивости в ЛИУ

На первом этапе исследований с помощью разработанного кода нами были проведены расчеты процесса развития поперечной неустойчивости во время прохождения электронного пучка с током 1 кА в 8-ми ускорительных модулях ЛИУ без экранирующих электродов и каких-либо поглощающих элементов, кроме резисторов в ускорительной трубке. При этом рассматривался случай возбуждения только двух ортогональных дипольных мод в каждом ускорительном модуле с одинаковой частотой $f = 326,29$ МГц, добротностью 50 и различающихся поляризацией. На рис. 5 приведены зависимости от времени амплитуд магнитного поля этих мод с первой поляризацией в каждом из 8-ми модулей. Термином «первая поляризация моды» мы обозначаем колебания, у которых электрическое поле на оси модуля направлено вдоль оси Y , а вторая поляризация, когда это направление вдоль оси X . Начальное возмущение пучка задавалось на входе его в ускорительную структуру ЛИУ в виде постоянного во

времени смещения центра пучка на величину 1 мм вдоль оси X от центра ускорительной структуры в этом месте.

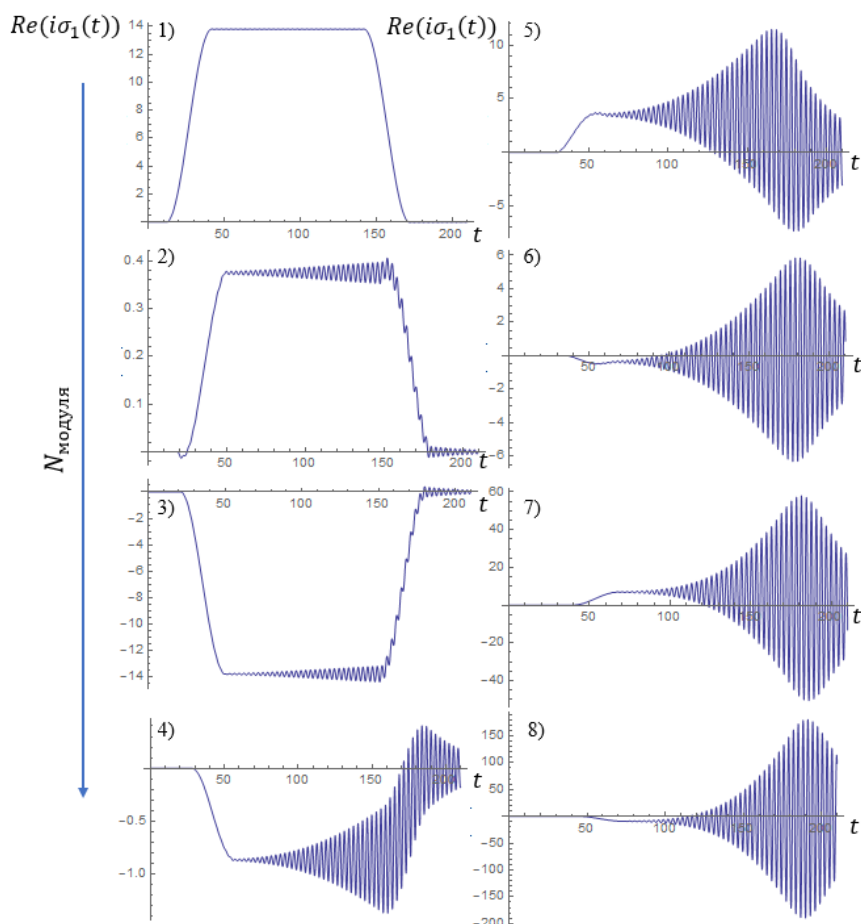


Рис. 5. Зависимость амплитуды магнитного поля $\text{Re}(i\sigma_1(t))$ дипольных мод с первой поляризацией на частоте $f = 0,32$ ГГц в восьми последовательно стоящих модулях при отсутствии в них дополнительных поглотителей колебаний

Fig. 5. Dependence of the magnetic field amplitude $\text{Re}(i\sigma_1(t))$ of dipole modes with the first polarization at a frequency $f = 0.32$ GHz in eight consecutive modules in the absence of additional wave absorbers

Как видно из картины поведения во времени амплитуды колебаний дипольных мод, эта амплитуда, во-первых, очень быстро нарастает по мере перехода от модуля к модулю, и, во-вторых, в каждом модуле она растет во времени до конца импульса пучка. Последний факт в соответствии с теоретической моделью Нила – Холла – Купера связан с высокой добротностью колебаний, которая обуславливает превышение времени достижения максимума амплитуды t_{max} над длительностью импульса пучка. По результатам расчета была построена траектория центра пучка во времени на выходе его из ускорителя. Эта траектория имеет форму раскручивающейся спирали с амплитудами эллипса $\Delta_x = \Delta_y = 1,5 \div 2$ мм, что качественно согласуется с данными, полученными в экспериментах по проводке пучка в ЛИУ при энергии его на выходе 5 МэВ.

Чтобы снизить амплитуды колебаний дипольных мод, проведена модернизация ускорительных модулей, в ходе которой были установлены экранирующие электроды в вакуумной области ускорительной трубки и заменены резисторы между соседними градиентными кольцами трубки с сопротивлением 500 Ом на аналогичные с сопротивлением 100 Ом. В после-

дующих экспериментах по прохождению электронного пучка в ЛИУ было установлено существенное подавление дипольных колебаний на частотах вблизи 0,32 ГГц. Вместе с этим были зарегистрированы высокочастотные колебания с частотами в диапазоне 0,70–0,95 ГГц (см. спектр сигналов на рис. 12 в работе [7]), но с амплитудами на порядок величины меньшими, чем они были ранее для случая ускорительной трубки без экранирующих электродов.

В согласии с экспериментом в проведенных компьютерных расчетах было подтверждено существенное подавление колебаний пучка с частотами в районе 0,3 ГГц. Кроме того, рассчитанные амплитуды колебаний пучка для наиболее неустойчивых дипольных мод с частотами в диапазоне 0,70–0,95 ГГц имели значения $\sim 0,1$ мм, что тоже хорошо согласуется с экспериментальными данными на качественном уровне рассмотрения. Необходимо отметить, что в этих расчетах начальное возмущение пучка задавалось аналогично предыдущему случаю (постоянное во времени смещение центра пучка на 1 мм), при этом характерная величина амплитуды колебаний пучка в первом модуле была масштаба 1 мкм. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчета возбуждения дипольных мод с первыми поляризациями, имеющих частоту $f = 0,79$ ГГц и добротность 80, для случая модернизированных ускорительных модулей ЛИУ.

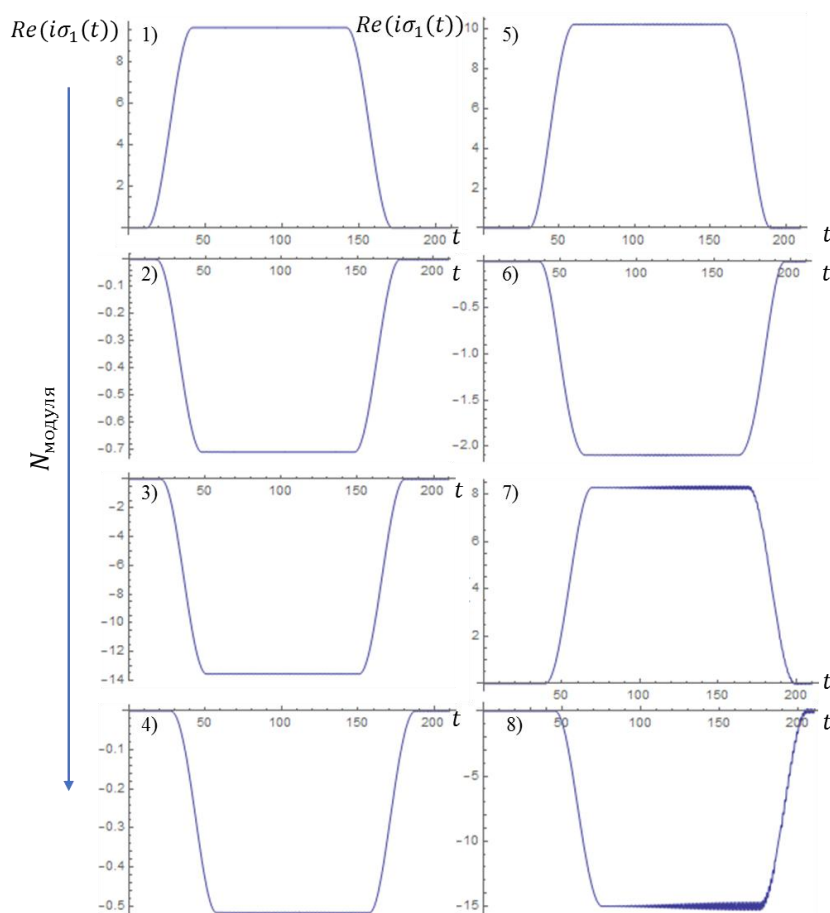


Рис. 6. Зависимости амплитуды магнитного поля $Re(i\sigma_1(t))$ дипольных мод с первыми поляризациями на частоте $f = 0,79$ ГГц в ускорительных модулях ЛИУ с экранирующими электродами

Fig. 6. Dependences of the magnetic field amplitude $Re(i\sigma_1(t))$ of dipole modes with the first polarizations at a frequency $f = 0.79$ GHz in LIA accelerator modules with shielding electrodes

В этих расчетах было показано, что в случае применения экранирующих электродов в ускорительном модуле существенно уменьшается коэффициент связи пучка с дипольными модами, имеющими высокую добротность $Q \sim 80$, и, в результате, раскачка этих мод реализуется значительно медленнее во времени. В итоге оказывается, что амплитуда колебаний пучка на выходе ускорителя при том же начальном смещении центра пучка не превышает значений $\Delta_x = \Delta_y \approx 0,1$ мм.

Для прогнозной оценки величины инкремента поперечной неустойчивости в полномасштабном ЛИУ, предназначенном для получения пучка электронов с энергией до 20 МэВ, были проведены расчеты, в которых добротность 20 дипольных мод с наибольшими коэффициентами связи с пучком была априори выбрана одинаковой в диапазоне 10–100. Полученная в этих расчетах зависимость натурального логарифма максимума спектральной плотности энергии мод с частотами, лежащими в пяти частотных промежутках, как функция от номера ускоряющего модуля была аппроксимирована линейной зависимостью методом наименьших квадратов. Из этой зависимости был найден инкремент роста энергии полей мод от модуля к модулю – Γ_0 . Исходя из этих значений Γ_0 , рассчитанных для различных величин добротности мод в пяти частотных интервалах, были получены инкременты амплитуды $\frac{\Gamma_0}{2}$, приведенные в таблице. Эти инкременты определяет рост амплитуды колебаний полей наиболее неустойчивых мод в усредненном описании, которое задается следующим выражением:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{\Gamma_0}{2} \cdot N\right).$$

Инкременты амплитуды колебаний полей $\frac{\Gamma_0}{2}$ наиболее неустойчивых мод

в пяти частотных интервалах

Increments of the field's oscillation amplitude $\frac{\Gamma_0}{2}$ for the most unstable modes

in five frequency intervals

f , МГц	300÷500	500÷600	600÷700	700÷800	900÷1000
$Q = 100$	0,71	0,4	0,1	0,75	1,01
$Q = 20$	0,35	0,21	0,075	0,5	0,58
$Q = 10$	0,22	0,14	0,025	0,2	0,22

Из приведенных в таблице данных следует, что при пятикратном уменьшении добротности колебаний в ускоряющих модулях со значения $Q = 100$ до $Q = 20$ происходит 1,5–2-кратное уменьшение инкремента во всех диапазонах частот, а дальнейшее уменьшение добротности колебаний всего лишь в два раза влияет на него таким же образом. Указанный характер зависимости инкремента амплитуды от добротности мод соответствует предсказаниям модели Нила – Холла – Купера, которая дает линейный спад инкремента от добротности в интервале $Q = 20$ –10 в условиях, когда длительность пучка превышает время достижения максимума амплитуды колебаний t_{\max} , что соответствует случаю для нашего ЛИУ (см. раздел 2). Необходимо также отметить, что, исходя из приведенных в таблице оценок инкремента и предположения о величине начальной амплитуды колебаний пучка в первом модуле ~ 1 мкм, амплитуды колебаний пучка на выходе из ЛИУ с энергией 20 МэВ, рассчитанные в соответствии с экспоненциальным ростом, заметно превышают радиус транспортного канала пучка. Из этого следует, что для достижения приемлемых значений амплитуды колебаний центроида пучка на выходе ускорителя, которое имеет величину $\sim 0,1$ мм, при добротностях основных неустойчивых мод в диапазоне 10–20 требуется подъем максимального

магнитного поля фокусирующих линз в 3–5 раз по отношению к индукции 0,08 Тл, которая достигалась в проведенных экспериментах на ЛИУ с энергией пучка на выходе 5 МэВ.

Заключение

Создан и протестирован программный комплекс, позволяющий рассчитывать характеристики дипольных мод ускорительного модуля, конфигурацию ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей, а также движение макрочастиц пучка в условиях возбуждения ими дипольных мод в ускорительной структуре ЛИУ. С помощью созданного программного комплекса проведены расчеты динамики полей мод и раскачки поперечных колебаний пучка при его инжекции с током до 2 кА и энергией до 2 МэВ в ускорительную структуру из восьми модулей с исходной и модифицированной геометриями ускорительных модулей.

Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показало их согласие на качественном уровне. При выборе в расчете величины амплитуды колебаний пучка на входе в ускоряющую структуру ~ 1 мкм рассчитанные значения амплитуды колебаний пучка на выходе из ЛИУ соответствуют результатам измерений, проведенных при получении пучка электронов с энергией 5 МэВ.

Кроме того, нами проведена проверка возможности использования теоретической модели Нила – Холла – Купера для качественного описания развития поперечной неустойчивости в линейных индукционных ускорителях с дискретной магнитной фокусировкой. Для случая восьмимодульного ЛИУ с описанной выше геометрией нами продемонстрировано качественное согласие между полученной в компьютерном моделировании динамикой колебаний полей дипольных мод, обладающих различной добротностью, с результатами аналитического описания электромагнитного поля в рамках теоретической модели Нила – Холла – Купера.

Список литературы / References

1. **Panofsky W. K. H., Bander M.** Asymptotic theory of beam breakup in linear accelerators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, pp. 206–212.
2. **Neil V. K., Hall L. S., Cooper R. K.** Further theoretical studies of the beam breakup instability. *Particle Accel.*, 1979, vol. 9, no. 4, pp. 213–222.
3. **Ekdahl C., Coleman J. E., McCuistian B. T.** Beam breakup in an advanced linear induction accelerator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, vol. 44, no. 7, pp. 1094–1102. DOI 10.1109/TPS.2016.2571123
4. **Logachev P., Kuznetsov G., Korepanov A. et al.** LIU-2 linear induction accelerator. *Instrum. Experim. Techn.*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 672–679. DOI 10.1134/S0020441213060195
5. **Starostenko D. A., Logachev P. V., Akimov A. V. et al.** Results of operating LIA-2 in radiograph mode. *Phys. Particles Nuclei Lett.*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 660–664. DOI 10.1134/S1547477114050264
6. **Nikiforov D. A., Blinov M. F., Fedorov V. V. et al.** High-current electron-beam transport in the LIA5 linear induction accelerator. *Phys. Particles Nuclei Lett.*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 197–203. DOI 10.1134/S1547477120020156
7. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Burdakov A. V. et al.** Electrodynamics System of the Linear Induction Accelerator Module. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2021, vol. 49, no. 2, pp. 718–728. DOI 10.1109/TPS.2020.3045345
8. **Ekdahl C.** Tuning the DARHT Long-Pulse Linear Induction Accelerator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2013, vol. 41, no. 10, pp. 2774–2780. DOI 10.1109/TPS.2013.2256933
9. **Ekdahl C.** Electron-beam dynamics for an advanced flash-radiography accelerator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2015, vol. 43, no. 12, pp. 4123–4129.

10. **Ekdahl C., McCrady R.** Suppression of Beam Breakup in Linear Induction Accelerators by Stagger Tuning. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2020, vol. 48, no. 10, pp. 3589–3599. DOI 10.1109/TPS.2020.3019999
11. Briggs R. J., Fawley W. Campaign to minimize the transverse impedance of the DARHT-2 induction linac cells. Lawrence Berkeley Nat. Lab. Berkeley, CA, USA, 2002. Tech. Rep. LBNL-56796(Rev-1),
12. **Walling L. et al.** Transmission-line impedance measurements for an advanced hadron facility. *Nucl. Instrum. Meth.*, 1989, vol. A281, pp. 433–447.
13. **Flöttman K.** ASTRA. Hamburg, DESY, 2000.

Информация об авторах

Евгений Сергеевич Сандалов, аспирант

Станислав Леонидович Синицкий, кандидат физико-математических наук

Дмитрий Иванович Сковородин, кандидат физико-математических наук

Данила Алексеевич Никифоров, научный сотрудник

Павел Владимирович Логачев, доктор физико-математических наук, академик РАН

Петр Алексеевич Бак, старший научный сотрудник

Кирилл Игоревич Живанков, научный сотрудник

Ермек Какимович Кенжебулатов, научный сотрудник

Алексей Васильевич Петренко, кандидат физико-математических наук

Олег Альфредович Никитин, кандидат технических наук

Александр Рамзисович Ахметов, старший научный сотрудник

Роман Викторович Протас, кандидат физико-математических наук

Сергей Дмитриевич Хренков, научный сотрудник

Игорь Алексеевич Журавлев, научный сотрудник

Илья Владимирович Пензин, научный сотрудник

Антон Робертович Дон, научный сотрудник

Information about the Authors

Evgeniy S. Sandalov, Post-Graduate Student

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Dmitry I. Skovorodin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Danila A. Nikiforov, Researcher

Pavel V. Logachev, Doctor Sciences (Physics and Mathematics), Academician of the Russian Academy of Sciences

Petr A. Bak, Senior Researcher

Kirill I. Zhivankov, Researcher

Ermek K. Kenzhebulatov, Researcher

Alexey V. Petrenko, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Oleg A. Nikitin, Candidate of Sciences (Engineering)

Alexander R. Akhmetov, Senior Researcher

Roman V. Protas, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Sergey D. Khrenkov, Researcher

Igor A. Zhuravlev, Researcher

Iliya V. Penzin, Researcher

Anton R. Don, Researcher

Статья поступила в редакцию 20.12.2021;

одобрена после рецензирования 01.02.2022; принята к публикации 01.02.2022

The article was submitted 20.12.2021;

approved after reviewing 01.02.2022; accepted for publication 01.02.2022

Научная статья

УДК 621.384.658

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15

Николай Константинович Куksанов¹

Денис Сергеевич Воробьев²

Рустам Абельевич Салимов³

Сергей Николаевич Фадеев⁴

¹⁻⁴ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ N.K.Kuksanov@inp.nsk.su

² djdenon@mail.ru

³ rsalimov41@mail.ru

⁴ S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Аннотация

Статья описывает моделирование высоковольтного источника питания для ускорителя ЭЛВ-15. Рассматриваются электромагнитные параметры выпрямителя, оцениваются пульсации и стабильность ускоряющего напряжения. Рассчитана напряженность электрического поля в источнике.

Ключевые слова

высоковольтный выпрямитель, ускоритель электронов, ЭЛВ

Для цитирования

Куksанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н. Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15 // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator

Nikolay K. Kuksanov¹, **Denis S. Vorobev**²

Rustam A. Salimov³, **Sergey N. Fadeev**⁴

¹⁻⁴ Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ N.K.Kuksanov@inp.nsk.su

² djdenon@mail.ru

³ rsalimov41@mail.ru

⁴ S.N.Fadeev@inp.nsk.su

Abstract

The article describes modelling of the high voltage source of the ELV-15 accelerator. The electromagnetic parameters of the rectifier, the magnet filed distribution, the parameters of primary and secondary winding are considered. Ripples and stability of the accelerating voltage are evaluated. The strength of the electric field in the source is considered.

Keywords

high voltage rectifier, particle accelerator, ELV

© Куksанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 23–33
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33

For citation

Kuksanov N. K., Vorobev D. S., Salimov R. A., Fadeev S. N. The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33

Введение

Основой создаваемого источника высокого напряжения является класс ускорителей ЭЛВ (источники высокого напряжения ускорителей), таким образом, наследуется концепция, лежащая в основе конструкции этих ускорителей и все ее преимущества. Ускорители ЭЛВ достаточно подробно описаны [1–3].

Наиболее важными являются электромагнитные параметры и напряженность электрического поля в колонне высоковольтного выпрямителя. Для определения параметров высоковольтного генератора решено использовать метод подобия электромагнитных процессов в высоковольтных генераторах, иными словами, метод параметрической экстраполяции. Суть метода заключается в расчете одним и тем же способом параметров нового генератора и существующего аналогичного устройства с последующим сравнением результатов расчетов. Полагаем, что корреляция реальных параметров с расчетными будет одинаковой для обоих случаев. При использовании упрощенной модели, погрешности расчетов программы не окажут влияния на соотношение реальных параметров. Такой подход являет собой дальнейшее развитие метода расчета высоковольтных генераторов на основе реальных физических полей.

Другой подход, основанный на эквивалентной индуктивной схеме, не является в полной мере адекватным, поэтому мы и вернулись к физическим методам. Действительно, высоковольтный генератор состоит из 80 выпрямительных секций, имеющих различные коэффициенты связи с первичной обмоткой и друг с другом. Помимо этого, сама катушка вторичной обмотки состоит из 50 слоев с различными внутренними емкостными коэффициентами. Расчет становится неоправданно сложным, и, следовательно, можно воспользоваться пусть и менее точными, но достаточно адекватными оценочными методами.

Электромагнитные параметры высоковольтного выпрямителя

За основу берется высоковольтный выпрямитель ускорителя ЭЛВ-8, с максимальной энергией 2,5 МэВ и мощностью 100 кВт. Чертежи выпрямителя ЭЛВ-8 и нового высоковольтного выпрямителя, который в дальнейшем будет именоваться ЭЛВ-15, приведены на рис. 1. Ускорители ЭЛВ представляют собой сосуд высокого давления, заполненный элегазом. Внутри сосуда расположены: первичная обмотка, состоящая из двух частей, высоковольтный выпрямитель со встроенной внутрь ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. К днищу котла прикреплены элементы вакуумной и электронно-оптической системы. Электроны, эмитированные катодом, расположенным на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорительной трубки имеют полную энергию eU_0 . Величина тока пучка определяется температурой катода. Его нагрев обеспечивается блоком управления инжектором.

В табл. 1 приведены данные ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15.

Как следует из рис. 1 и табл. 1, отличие рассматриваемых высоковольтных выпрямителей состоит в следующем:

- увеличены диаметр и высота первичной обмотки;
- увеличено количество витков первичной обмотки;
- увеличен диаметр катушек вторичной обмотки (секций);
- увеличено число выпрямительных секций (т. е. высота колонны).

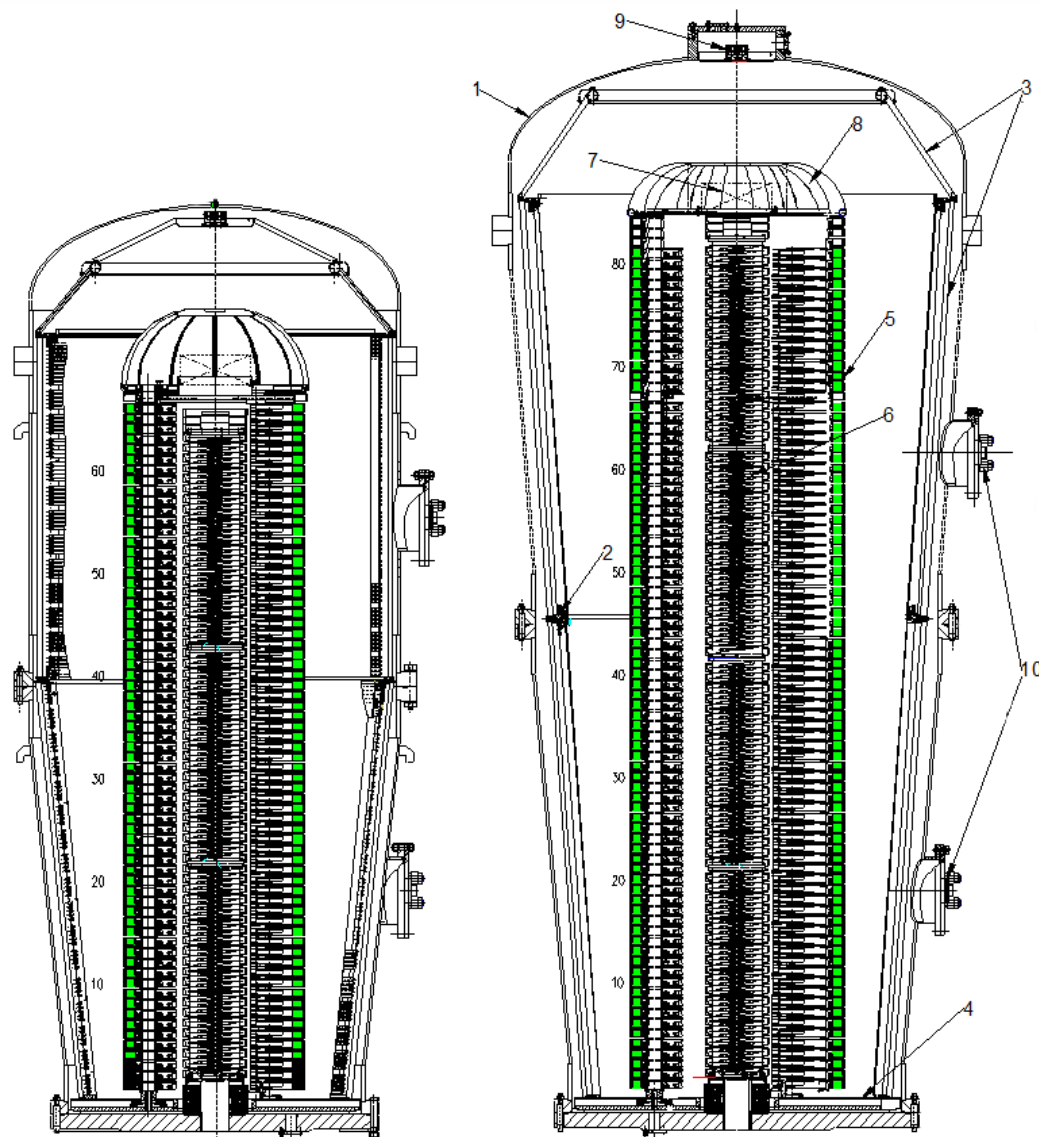


Рис. 1. Выпрямители ЭЛВ-8 (слева) и ЭЛВ-15 (справа):

1 – сосуд; 2 – первичная обмотка; 3, 4 – магнитопроводы; 5 – выпрямительные секции;
6 – ускорительная трубка; 7 – блок управления инжектором; 8 – высоковольтный электрод;
9 – оптические каналы управления инжектором; 10 – выводы первичной обмотки

Fig. 1. Rectifiers of ELV-8 (left) and ELV-15 (right):

1 – vessel; 2 – primary winding; 3, 4 – magnetic guides; 5 – rectifying sections; 6 – accelerating tube;
7 – injector control unit; 8 – high voltage electrode; 9 – optical channels for injector control;
10 – feedthrough connectors of the primary winding

Частота остается прежней – 400 Гц ($\omega = 2,5 \cdot 10^3$), хотя вопрос ее выбора может быть рассмотрен отдельно.

Численное моделирование производится в комплексе программ SAM [4], предназначенном для расчета аксиально-симметричных электромагнитных и электронно-оптических систем. В каждом горизонтальном сечении трансформатора магнитный поток внутри витка первичной обмотки состоит из потока внутри вторичной обмотки и потока в зазоре между обмотками.

Таблица 1

Данные ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15

Table 1

ELV-8 and ELV-15 parameters

	W_{11}/W_{12}	W_2	R_{2cp}	N	U_{2cp}	R_{1min}	R_{1max}	$L_{низ}/L_{верх}$	K
ЭЛВ-8	17/15	3000	337	65	38,5	525	680	1670/1382	0,28
ЭЛВ-15	17/16	3000	410	80	37,5	588	845	1900/1700	0,29

На рис. 2 показано расчетное распределение магнитного поля по высоте колонны. Витковое напряжение вторичной обмотки в режиме холостого хода или при малой нагрузке в каждом сечении будет

$$U_{2вит} = U_{1вит} \frac{R_2^2 - R_{тр}^2}{R_1^2 - R_{тр}^2},$$

где

$U_{1вит}$, $U_{2вит}$ – витковое напряжение первичной и вторичной обмоток, В;

R_1 , R_2 – текущий радиус первичной и вторичной обмоток, мм;

$R_{тр}$ – радиус экранирующих колец ускорительной трубки, мм.

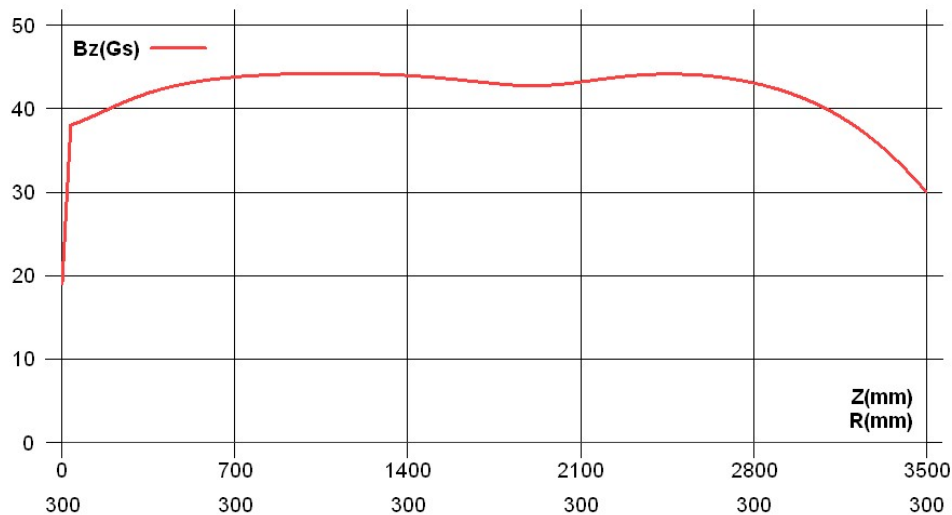
Рис. 2. Распределение по Z магнитного поля B_z

Fig. 2. SAM's model

Чтобы перейти от виткового напряжения к выпрямленному, число витков вторичной обмотки умножим на число секций, на 2 (поскольку выпрямитель построен по схеме удвоения напряжения) умножим на $\sqrt{2}$ (среднеквадратичное значение) и разделим на число витков первичной обмотки. Тем самым получаем выходное напряжение для высоковольтного выпрямителя с трансформатором без магнитного сердечника со схемой удвоения:

$$U_0 = KU_1 \frac{3000 * 65 * \sqrt{2} * 2}{32},$$

или, иначе:

$$U_1 = U_0 \frac{32}{K * 3000 * 65 * \sqrt{2} * 2},$$

где

U_0 – полное напряжение выпрямителя, В;

U_1 – напряжение первичной обмотки, В;

K – геометрический коэффициент, определяемый зависимостью R_1 от Z .

В случае однородного распределения потока внутри витка первичной обмотки (работа в режиме холостого хода или малого тока)

$$U_{2\text{вит}} = U_{1\text{вит}} \frac{R_2^2 - R_{\text{тр}}^2}{R_1^2 - R_{\text{тр}}^2} = U_{1\text{вит}} K.$$

Отсюда получаем

$$K = \frac{R_{2\text{ср}}^2 - R_{\text{тр}}^2}{R_{1\text{ср}}^2 - R_{\text{тр}}^2}.$$

Обозначения те же, что и в табл. 1, $R_{1\text{ср}}^2$ – среднее значение квадрата радиуса первичной обмотки по высоте (пропорционально средней площади витка этой обмотки). Значение K приведено в табл. 1, оно составляет 0,29 для ЭЛВ-15 и 0,28 для ЭЛВ-8.

Напряжение первичной обмотки для ускоряющего напряжения 3 МВ в режиме холостого хода, рассчитанное вышеуказанным способом, составляет 517 В. Рабочее напряжение секции при напряжении 3 МВ – 37,5 кВ, что соответствует среднему полю по колонне 38 Гс. В режиме холостого хода ток первичной обмотки для этого поля равен 380 А. Вклад тока вторичной обмотки, рассчитанный в виде соотношения витков первичной и вторичной обмоток

с учетом схемы удвоения, составляет $\frac{1 * 2 * 80 * 3000}{33} = 14,5$ А / мА тока пучка.

При расчете тока первичной обмотки необходимо учитывать фазовый сдвиг между током намагничивания первичной обмотки и током нагрузки. Принимаем его близким к 90° . Это вносит некоторую погрешность, но не оказывает значительного влияния на результат. Значения тока первичной обмотки для холостого хода и при нагрузках 50, 75, 100 и 125 кВт электронного пучка приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения тока первичной обмотки ЭЛВ-15

Table 2

ELV-15 Accelerator

Параметр	Холостой ход	Нагрузка, кВт			
		50	75	100	125
Ток пучка, мА	0	16,6	25	33,3	41,6
Максимальная мощность, кВт	0	50	75	100	125
Ток первичной обмотки, А	380	450	525	614	705
Напряжение первичной обмотки, В	508	574	645	730	816

Для расчета напряжения первичной обмотки в рабочем режиме (под нагрузкой) рассмотрим структуру магнитного потока в сечении ее витка. Магнитный поток внутри первичной обмотки состоит из магнитного потока внутри вторичной обмотки и потока в зазоре между обмотками. При этом напряжение первичной обмотки U_1 будет

$$U_1 = U_{\text{лхх}} \frac{I_1}{I_{\text{лхх}}} (1 - K) + U_{\text{лхх}} K,$$

где $U_{\text{лхх}}$ – ее напряжение в режиме холостого хода, В.

Используя данные табл. 1 и значения тока первичной обмотки, рассчитаем U_1 и дополним табл. 2, тем самым получив параметры ЭЛВ-15 (напряжение и ток первичной обмотки).

Для проверки метода рассчитаем ускоритель ЭЛВ-8, параметры которого известны. Для этой машины K оказывается равным 0,28, т. е. выпрямители достаточно близки.

В случае ЭЛВ-8 для холостого хода находим

$$U_1 = U_0 \frac{32}{K * 3000 * 65 * 1,4 * 2} = 517 \text{ В.}$$

Реальное напряжение для 2,5 МэВ составляет 480 В. Небольшая разница в 7,5 % объясняется краевыми эффектами, разностью длин первичной и вторичной обмоток, и, кроме того, резонансная частота собранного выпрямителя составляет 400 Гц, т. е. отношение $\omega_{\text{раб}}/\omega_{\text{рез}} = 0,28$.

Наличие резонансной частоты эквивалентно увеличению площади вторичных обмоток. Для ЭЛВ-8 эта величина равна 1,09. Таким образом, мы имеем достаточно хорошее совпадение. Отметим также, что даже небольшая нагрузка устраняет эффект резонанса и расчетные параметры под нагрузкой близки к реальным. В табл. 3 приведено сравнение расчетных и реальных параметров для ускорителя ЭЛВ-8.

Таблица 3

Значения тока первичной обмотки ЭЛВ-8

Table 3

ELV-8 Accelerator

Параметр	Холостой ход	Нагрузка, кВт			
		50	75	100	125
Ток пучка, мА	0	20	30	40	50
Максимальная мощность, кВт	0	50	75	100	125
Ток первичной обмотки, А					
Расчетный	500	556	620	700	790
Реальный	419	540	600	722	820
Напряжение первичной обмотки, В					
Расчетное	517	557	605	665	732
Реальное	480	588	631	702	760

Пульсации ускоряющего напряжения

Обычно в ускорителях ЭЛВ, за исключением некоторых специфических применений, как, например, машин с выводом в атмосферу концентрированного пучка, величина пульсаций и стабильность энергии на уровне $\pm 5\%$ являются приемлемыми. В данном ускорителе электронный пучок выводится в атмосферу через окно из титановой фольги, и дополнительных требований к вышеуказанному параметру не предъявляется.

Токи 30 и 40 мА являются достаточно большой нагрузкой для высоковольтного выпрямителя, поэтому угол отсечки зарядного тока конденсаторов высоковольтного выпрямителя является большим. Для оценки примем: разрядное время $1/3$ полупериода, рабочая частота 400 Гц, напряжение выпрямителя 3 МВ. Тогда

$$\Delta U = \frac{I_0 T}{2C_{\text{экв}}^3} = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 80 \cdot 10^3 = 40 \text{ кВ},$$

$$\frac{\Delta U}{U} = 2,6\% = \pm 1,3\%,$$

где

I_0 – ток высоковольтного выпрямителя, мА;

T – период питающего напряжения;

$C_{\text{экв}}$ – эквивалентная емкость высоковольтного выпрямителя.

Конструктивная емкость верхних секций составляет 3,6 пФ/секцию, фильтрующая емкость составляет 5100 пФ. Емкость высоковольтного электрода составляет 60 пФ. Поэтому $C_{\text{экв}} = (3,6 \cdot 5100)^{1/2} + 66 = 200$ пФ.

Как видно из результата – величина пульсаций составляет 1,3 %, что является приемлемым. Заметим, что в случае нулевого угла отсечки пульсации не превысят 4 %, что подтверждает правильность оценки.

Стабильность ускоряющего напряжения

Очевидно, такого же рода требования предъявляются и к стабильности энергии, т. е. среднему значению ускоряющего напряжения. Измерение энергии производится с помощью роторного вольтметра, расположенного над высоковольтным электродом. Роторный вольтметр, его устройство и принцип работы хорошо описаны в [3]. Существует две причины для неверного измерения энергии: изменение расстояния между высоковольтным электродом и вольтметром, и нестабильность вращения крыльчатки вольтметра.

Исходя из того, что температура в помещении ускорителя будет около 20 °С, а рабочая температура ускорителя 45 °С, разница температур составит $\Delta T = 45 - 20 = 25$ °С. Увеличение зазора за счет линейного расширения сосуда будет компенсироваться линейным расширением опор секций: $\Delta d = \Delta d_{\text{колонны}} - \Delta d_{\text{бака}}$. Численная оценка дает величину 0,14 мм, следовательно, $\Delta E/E = 1,9 \cdot 0,139 = 0,26$ %, что нас вполне устраивает.

Оценка точности роторного вольтметра в зависимости от нестабильности скорости вращения крыльчатки приведена в [2]. Здесь будет достаточно сказать следующее: для достижения точности измерений в 1 % необходимо поддерживать скорость вращения с точностью не хуже чем 20 % [2]. Асинхронный двигатель привода роторного вольтметра обеспечивает стабильность вращения в 5 %, следовательно, точность измерения составит 0,25 %.

Необходимо отметить, что дополнительно контроль напряжения высоковольтного выпрямителя можно проводить по напряжению первичной обмотки, поскольку оно, как и полное напряжение, не зависит от температуры бака и скорости вольтметра.

Напряженность электрического поля в высоковольтном генераторе

Геометрия высоковольтного выпрямителя является аксиальной, поэтому SAM позволяет легко и корректно проводить расчеты электрического поля. Проблема здесь заключается в том, что реальная поверхность может содержать отклонения и неровности, обусловленные процессом изготовления. Исходя из одинаковой технологии изготовления элементов выпрямителя метод параметрической экстраполяции также оказывается полезным.

Счет секций в колонне начинается снизу. Их полное число – 83. Три верхние секции являются «пустышками», т. е. напряжение на них отсутствует, а напряжение на следующих секциях составляет примерно 0,8 от среднего. За счет этого устраняется поперечная разность потенциалов между выпрямительной колонной и ускорительной трубкой, а также уменьшается напряженность поля на экранах верхних секций.

Рассмотрим напряженность электрического поля на элементах выпрямителя посегментно. Рассматриваются 3 версии: ЭЛВ-15, ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15 с секциями ЭЛВ-8.

Напряженность на сегментах высоковольтного электрода

Схема расположения сегментов высоковольтного электрода приведена на рис. 3, напряженность на сегментах высоковольтного электрода – в табл. 4.

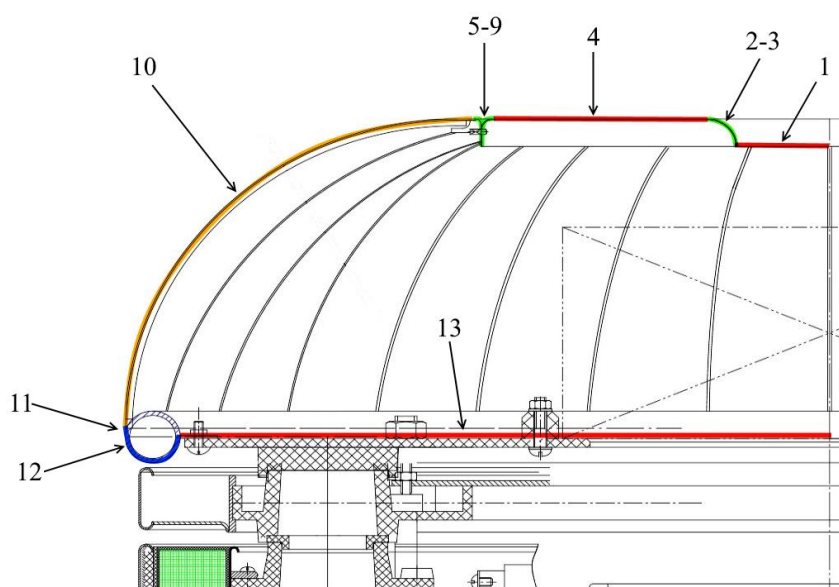


Рис. 3. Схема расположения сегментов высоковольтного электрода

Fig. 3. Segments of high voltage electrode

Таблица 4

Напряженность на сегментах высоковольтного электрода

Table 4

Voltage distribution over column sections

Параметры	Номер сегмента							
	3	4	5	8	9	10	11	12
E , кВ/см ЭЛВ-15, $U = 3$ МВ	120	111	117	129	118	171	180	192
E , кВ/см ЭЛВ-8, $U = 2,5$ МВ	117	112	119	134	125	171	185	196
E , кВ/см ЭЛВ-15, $U = 3$ МВ, секции от ЭЛВ-8	122	123	131	147	138	170	170	180

Как и следовало ожидать, максимальная напряженность находится на нижней кромке высоковольтного электрода. Это сделано во всех ЭЛВ, и этому есть следующее объяснение: газовые пробой на землю должны происходить с верхнего конца колонны, но никак не с нижележащих секций. Максимальная напряженность в ЭЛВ-15, т. е. в рассматриваемой машине – незначительно ниже, чем в ЭЛВ-8.

Напряженность на экранах выпрямительных секций

Рассматриваем 3 вышеуказанных варианта. Распределение напряжения по верхним секциям в случае ЭЛВ-15 с секциями ЭЛВ-8 такое же, как и у ЭЛВ-15, т. е. 3 верхние секции «пустышки». В случае ЭЛВ-8 верхним секциям присвоены номера такие же, как и у ЭЛВ-15, т. е. секции с одинаковыми номерами имеют одинаковую позицию относительно высоковольтного электрода. Поэтому, несмотря на то, что в колонне ЭЛВ-8 65 секций, верхние секции имеют номера 83 и т. д. Это было сделано для лучшего понимания.

Профиль внешнего экрана секции и расположение сегментов приведены на рис. 4. Наибольшая напряженность электрического поля находится на сегментах 3, 4, и 5. Результаты приведены в табл. 5.

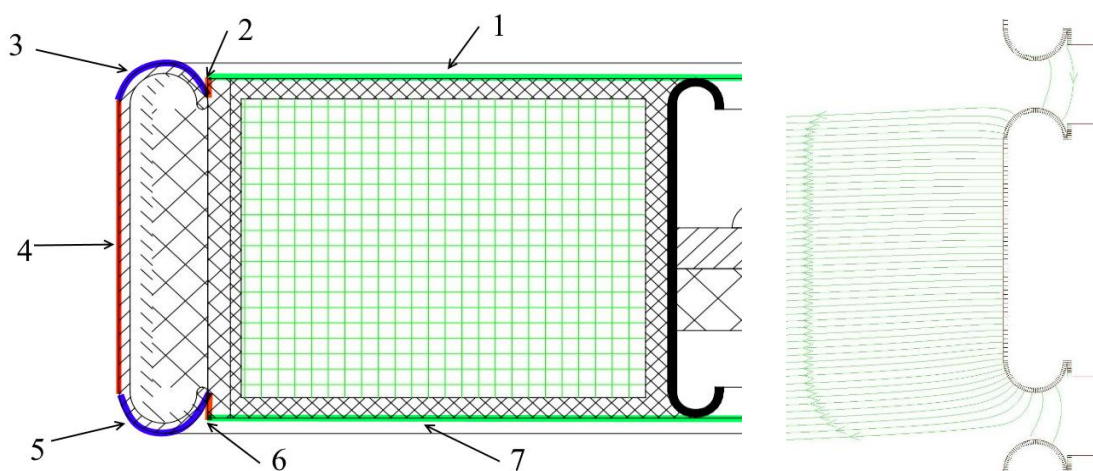


Рис. 4. Схема расположения сегментов секции выпрямителя и электрическое поле на поверхности сегментов секции

Fig. 4. Segments of rectifier section and the electric field on the surface of the section segments

Таблица 5

Напряженность сегментов секции, кВ/см

Table 5

Filed strength on the high voltage electrode segments

Сегмент	Номер секции								
	83	82	81	80	79	78	77	76	75
Сегмент 3 ЭЛВ-15	141	166	167	155	140	136	135	130	124
Сегмент 3 ЭЛВ-15/8	151	161	160	157	131	126	124	119	113
Сегмент 3 ЭЛВ-8	151	148	143	140	133	125			
Сегмент 4 ЭЛВ-15	151	153	162	169	166	164	165	165	162
Сегмент 4 ЭЛВ-15/8	148	148	155	161	157	154	155	155	152
Сегмент 4 ЭЛВ-8	180	174	170	170	169	165			
Сегмент 5 ЭЛВ-15	165	167	179	190	186	184	187	188	185
Сегмент 5 ЭЛВ-15/8	161	160	171	181	177	174	176	177	174
Сегмент 5 ЭЛВ-8	201	195	191	191	192	187			

Как видно из сравнения, максимальные напряженности на секциях примерно равны (у ЭЛВ-8 незначительно выше). На высоковольтном электроде в случае ЭЛВ-8 напряжен-

ность также немного выше. Поэтому для новой машины ЭЛВ-15 напряженность не превышает значения для реальных ЭЛВ-8.

Заключение

Анализируя данные таблиц, можно утверждать, что реальные и расчетные входные параметры ЭЛВ-8 достаточно хорошо совпадают. Поскольку геометрия рассматриваемых источников ЭЛВ-8 и ЭЛВ-15 близка, полагаем, что и для ЭЛВ-15 соотношение расчетных и реальных параметров останется таким же. Малые пульсации напряжения, его высокая стабильность и схожая с ускорителем ЭЛВ-8 напряженность электрического поля (см. табл. 4 и 5), а также то, что под нагрузкой различие реальных и расчетных параметров уменьшается, позволяют считать, что приведенные в табл. 2 параметры машины ЭЛВ-15 являются достоверными для проектирования системы силового питания и изготовления ускорителя.

Список принятых обозначений

W_{11}, W_{12}	—	число витков в нижней и верхней частях первичной обмотки
W_2	—	число витков катушки вторичной обмотки
$R_{2\text{ср}}$	—	средний радиус катушки вторичной обмотки, мм
N	—	число выпрямительных секций (катушек вторичных обмоток)
$U_{2\text{ср}}$	—	среднее выпрямленное напряжение секции, кВ
$R_{1\text{мин}}, R_{1\text{макс}}$	—	минимальный и максимальный радиусы первичной обмотки, мм
$L_{\text{низ}}, L_{\text{верх}}$	—	длина нижней и верхней частей первичной обмотки, мм
K	—	геометрический коэффициент, определяемый зависимостью R_1 от Z , безразмерный
ω	—	угловая частота
$U_{1\text{вит}}$	—	витковое напряжение первичной обмотки, В
$U_{2\text{вит}}$	—	витковое напряжение вторичной обмотки, В
R_1	—	текущий радиус первичной обмотки, мм
R_2	—	радиус катушек вторичной обмотки, мм
$R_{\text{тр}}$	—	радиус экранирующих колец ускорительной трубки, мм
U_0	—	полное напряжение выпрямителя, В
U_1	—	напряжение первичной обмотки, В
$U_{1\text{хх}}$	—	напряжение в режиме холостого хода, В
I_0	—	ток высоковольтного выпрямителя, мА
T	—	период питающего напряжения, с
$C_{\text{экв}}$	—	эквивалентная емкость высоковольтного выпрямителя, Ф

Список литературы

1. **Куксанов Н. К.** Электронные ускорители непрерывного действия мощностью сотни киловатт: Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1993.
2. **Немытов П. И.** Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт. Новосибирск, 2010.
3. **Куксанов Н. К., Немытов П. И., Голубенко Ю. И.** Малогабаритный роторный вольтметр, используемый в системах измерения и стабилизации ускоряющего напряжения промышленных ускорителей электронов // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, № 3. С. 84–91.
4. **Тарнецкий В. В., Тиунов М. А., Яковлев В. П.** Комплекс программ SAM. Руководство пользователя. Новосибирск, 2002.

References

1. **Kuksanov N. K.** Electron DC accelerators with power of hundreds kilowatts. Dr. of Tech. Sci. Diss. Novosibirsk, 1993. (in Russ.)
2. **Nemytov P. I.** Power supply and control systems for a series of high-voltage industrial electron accelerators with an extracted beam power of hundreds of kilowatts. Novosibirsk, 2010. (in Russ.)
3. **Kuksanov N. K., Nemytov P. I., Golubenko Yu. I.** Small-sized rotor voltmeter used in systems for measuring and stabilizing of the accelerating voltage of industrial electron beam accelerators. *Vestnik NSU, Series: Physics*, 2010, vol. 5, no. 3, pp. 84–91. (in Russ.)
4. **Tarnetskiy V. V., Tiunov M. A., Yakovlev V. P.** Complex of programs SAM. User's manual. Novosibirsk, 2002. (in Russ.)

Информация об авторах

Николай Константинович Куксанов, доктор технических наук
Денис Сергеевич Воробьев, ведущий инженер
Рустам Абельевич Салимов, доктор технических наук
Сергей Николаевич Фадеев, кандидат технических наук

Information about the Authors

Nikolay K. Kuksanov, Doctor of Technical Sciences
Denis S. Vorobev, Lead-Engineer
Rustam A. Salimov, Doctor of Technical Sciences
Sergey N. Fadeev, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 12.07.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 12.07.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*

Научная статья

УДК 533.6.013.4

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-34-46

О динамических коэффициентах демпфирования конически-сферического тела при числе Маха $M = 2,3$

Николай Петрович Адамов¹

Никита Андреевич Мищенко²

Евгений Александрович Часовников³

¹⁻³ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ adamov@itam.nsc.ru

² nikita.mishchenko@yahoo.com

³ chas@itam.nsc.ru

Аннотация

Для описания поведения амплитуды колебаний конически-сферической модели на поперечной державке при числе Маха $M = 2,3$ была использована полиномиальная зависимость функции вязкого демпфирования. В качестве функции вязкого демпфирования был взят полином 4-й степени, что дало возможность описать два предельных цикла, наблюдаемых в экспериментах. Коэффициенты полинома были определены и показали хорошее соответствие численному решению предложенного уравнения динамики.

Ключевые слова

уравнение Ван дер Поля, устойчивость спускаемых аппаратов, аэродинамическое демпфирование, установка свободных колебаний

Источник финансирования

Исследование проводилось в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект № АААА-А17-117030610125-7). Эксперименты проведены с использованием ЦКП «Механика»

Для цитирования

Адамов Н. П., Мищенко Н. А., Часовников Е. А. О динамических коэффициентах демпфирования конически-сферического тела при числе Маха $M = 2,3$ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 34–46. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-34-46

About the Dynamic Damping Coefficients of a Segmental-Cone Model at Mach $M = 2.3$

Nikolai P. Adamov¹, Nikita A. Mishchenko²
Evgenii A. Chasovnikov³

¹⁻³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk state University
Novosibirsk, Russian Federation

¹ adamov@itam.nsc.ru
² nikita.mishchenko@yahoo.com
³ chas@itam.nsc.ru

Abstract

In order to describe the nonlinear behavior of oscillation amplitude of the segmental-conical model on a transverse rod setup in a wind tunnel at Mach $M = 2$, a polynomial function of damping derivatives was used. Polynom of the 4th degree as a function of viscous damping allowed to describe two limit cycles observed in experiments. Coefficients of the polynom were determined and showed sufficient agreement with a direct numerical solution of the proposed dynamic equation.

Keywords

Van der Pole equation, dynamic stability of reentry vehicles, aerodynamic damping, free oscillation setup

Funding

The research was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the state academies of sciences in 2013–2020 (project no. AAAA-A17-117030610125-7). Experiments were carried out using the equipment of the Joint Access Center “Mechanics”

For citation

Adamov N. P., Mishchenko N. A., Chasovnikov E. A. About the Dynamic Damping Coefficients of a Segmental-Cone Model at Mach $M = 2.3$. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 34–46. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-34-46

Введение

Одним из вопросов при разработке спускаемых аппаратов является вопрос устойчивости к возможным возмущениям при движении в атмосфере. Несмотря на то, что изучение динамики спускаемых аппаратов продолжается уже более полувека, причины и механизмы развития возмущений, приводящие к возникновению автоколебаний, не определены. Экспериментальное изучение устойчивости аппаратов сопряжено со значительными трудностями как в постановке эксперимента, так и в анализе получаемых данных. Отмечается, что различные экспериментальные методики иной раз дают противоречивые результаты [1]. Физическая сложность, сопряженность явления и нераскрытые механизмы, руководящие феноменом неустойчивости, даже несмотря на бурное развитие численных методов и роста производительности ЭВМ в последние годы, пока не дают возможность адекватного численного моделирования обтекания тел, приводящего к наблюдаемому феномену автоколебаний. Характерная черта явления – большое количество существенно влияющих параметров: как параметров потока (число Маха, Рейнольдса и др.), так и параметров самой модели (распределение масс, геометрия донной, носовой частей, радиус притупления и проч.), а также относительно большая продолжительность явления по времени. Также значительной проблемой экспериментальных методик является влияние поддерживающих устройств [1].

Несмотря на значительный объем накопленных данных, большое количество параметров делает их систематизацию сложной задачей. Важным вопросом остается совершенствование методик проведения экспериментов, обработки и систематизации получаемых данных.

В данной работе рассматриваются вопросы устойчивости модели по углу атаки на примере нескольких экспериментов. Цель работы: описать нелинейное поведение амплитуды колебаний модели в эксперименте, определить закон изменения и получить определяющие его коэффициенты.

Экспериментальное определение коэффициентов демпфирования на установке свободных колебаний

Установки свободных колебаний в своем принципе обеспечивают свободное одномерное движение модели в потоке, организованном в аэродинамической трубе. Для изучения устойчивости модели по углу тангажа применяется закрепление модели в донной части и на поперечной державке (рис. 1). Можно отметить, что установки на поперечной державке более предпочтительны, так как в литературе [1], упоминается, что ключевые процессы неустойчивого поведения модели связаны со сложным обтеканием ее донной части. Принцип проведения эксперимента следующий. Модель закрепляется в аэродинамической трубе под некоторым начальным углом, после достижения рабочего режима трубы модель освобождается, зависимость угла атаки модели от времени регистрируется аппаратурой. После этого по полученным данным требуется решить задачу поиска закона движения и определяющих его коэффициентов, из чего определяются аэродинамические коэффициенты демпфирования модели.

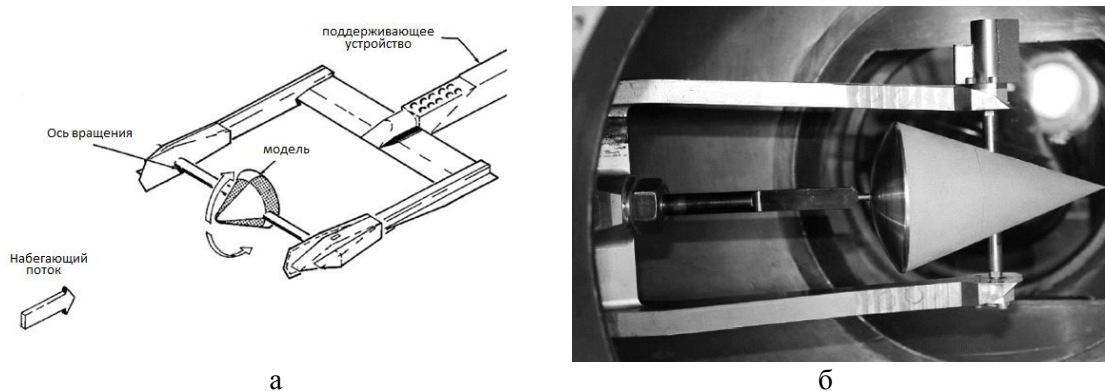


Рис. 1. Вид установки свободных колебаний на поперечной державке:
а – принципиальный вид; б – установка на поперечной державке в Т-313 ИТПМ СО РАН

Fig. 1. Appearance of a transverse rod setup:
а – principal view; б – the transverse rod setup in T-313 ITAM SB RAS

Стандартная методика

Так называемая стандартная методика рассматривает одномерные колебания модели по углу тангажа на основе уравнения моментов аэродинамических сил, действующих на рассматриваемую модель. Стандартная методика базируется на гипотезе гармоничности [3], что приводит к колебательному уравнению вида

$$I\ddot{\alpha} - \frac{sql^2}{v} \left[m_z^{\bar{0}} + m_z^{\bar{\alpha}} \right] \dot{\alpha} - qslm_z^{\alpha} \alpha = 0,$$

где I – момент инерции относительно оси колебаний; l , s – характерная длина и площадь модели; q , v – скоростной напор и скорость набегающего потока. Аэродинамические коэффициенты характеризуют моменты сил, действующие на модель: m_z – коэффициент момента тан-

гажа, берется в линейном приближении $m_z(\alpha) = m_z^\alpha \alpha$, $[m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}}]$ – сумма коэффициентов аэродинамического демпфирования берется в виде константы. В уравнение могут быть добавлены другие члены, например, сухого трения [2; 3]¹, для учета вклада подшипников, на которых закрепляется ось.

Решение этого уравнения приводит к экспоненциальной зависимости амплитуды колебаний от времени. Частота колебаний определяется производной момента тангажа по углу атаки m_z^α . Эти соображения приводят к выражениям

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \theta_0 e^{-nt}, \\ n &= -\left[m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}}\right] \frac{qsl^2}{2I_V}, \\ \omega_0^2 &= -m_z^\alpha \frac{qsl}{I},\end{aligned}$$

где θ – огибающая амплитуды колебаний, n – показатель затухания огибающей, ω_0 – частота колебаний.

Такой подход описывает динамику амплитуды колебаний в первом приближении.

Проблемы применения стандартной методики

Экспериментальные данные, получаемые, в частности, из экспериментов с конически-сферическими моделями, при определенных режимах обтекания, даже в случаях чистого демпфирования, не вполне адекватно описываются стандартной методикой. Как видно, зависимость амплитуды колебаний отличается от экспоненциальной зависимости (рис. 2).

Более того, случаи антидемпфирования, как правило, заканчиваются предельной амплитудой (также можно говорить о предельном цикле, рис. 2 в, з). В этих случаях нелинейности еще более значительны, и применение стандартной методики вовсе неоправданно. Отмечается наблюдение и двух предельных циклов, что также выходит за рамки описательной силы стандартного подхода.

Эти обстоятельства побуждают к поиску другого подхода к анализу колебаний модели и усложнению модели закона движения.

Описание нелинейного изменения амплитуды колебаний

В серии работ, которые сделаны в рамках подготовки миссии HAYABUSA (MUSES-C), были проведены исследования, посвященные вопросам устойчивости спускаемого аппарата формы тупого тела вращения. Исследования базировались на результатах экспериментов на установке свободных колебаний, специальных экспериментах по визуализации течения в донной части модели, численных расчетах.

Авторами была замечена задержка пульсаций давления между донной и фронтальной частями модели [4]. На основе этого наблюдения аэродинамические коэффициенты момента тангажа модели рассматриваются, как совокупность ее передней и донной частей. Учет обнаруженной задержки и представление производной момента тангажа в виде полинома нечетных степеней угла атаки до 3-й степени привел авторов к уравнению вида Ван дер Поля [5]:

¹ См. также: Адамов Н. П., Пузырёв Л. Н., Харитонов А. М., Часовников Е. А., Дядькин А. А., Крылов А. Н. Демпфирующие характеристики модели возвращаемого аппарата при гиперзвуковых скоростях // ПМТФ, принята в печать в 2013 г.

$$\ddot{\alpha} - \frac{qsl^2}{I\nu} \varepsilon \left(1 - \frac{\alpha^2}{\delta^2} \right) \dot{\alpha} + \frac{qsl}{I} (a + b\alpha^2) \alpha = 0.$$

Эту модель авторы называют *простой моделью постоянной задержки*.

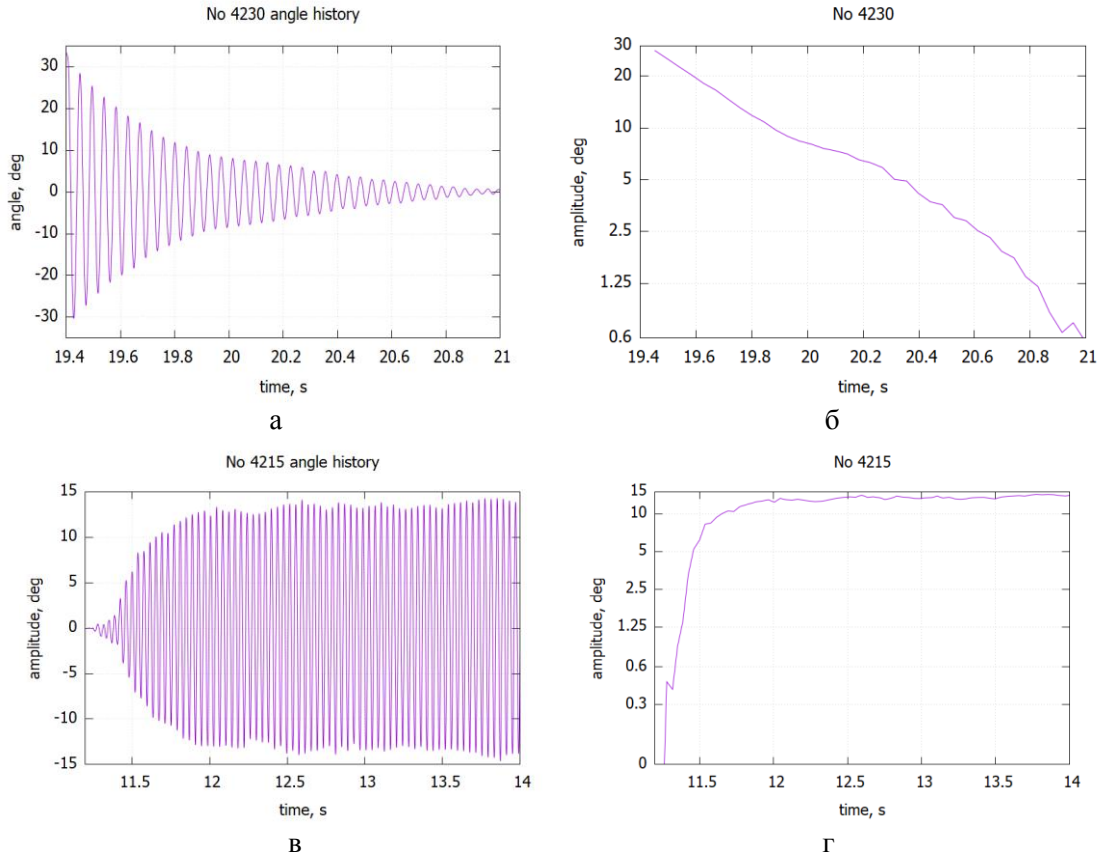


Рис. 2. Примеры экспериментальных данных конически-сферической модели:
 а – история угла колебаний от времени, № 4230; б – логарифм амплитуды колебаний, № 4230;
 в – история угла колебаний от времени, № 4215; г – логарифм амплитуды колебаний, № 4215

Fig. 2. Examples of an experimental data of segmental-conical model:
 а – history of angle of attack, № 4230; б – logarithm of oscillation amplitude;
 в – history of angle of attack, № 4230; г – logarithm of oscillation amplitude

Фактически, данное уравнение колебаний в основе своей представляет собой уравнение Ван дер Поля:

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2) \dot{x} + x = 0.$$

Возможные варианты решений уравнения на фазовой плоскости представляют собой два принципиальных случая: устойчивое во всей фазовой плоскости (рис. 3, а) и случай с устойчивым предельным циклом (рис. 3, б) [6].

Однако результаты проведенных экспериментов в ИТПМ оказались за пределом описательной возможности данной модели движения, что побудило к поиску другой модели.

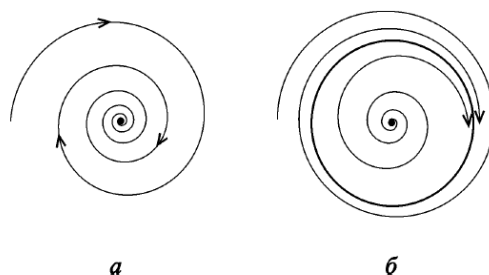


Рис. 3. Фазовые портреты возможных решения уравнения Ван дер Поля
Fig. 3. Phase space of Van der Pole equation

Эксперимент и интерпретация

Проведены эксперименты в аэродинамической трубе Т-313 ИТПМ СО РАН на установке свободных колебаний на поперечной державке. Параметры потока были получены по принятой на трубе методике.

Изучалось поведение модели острого конуса с углом полураствора 20° с полусферической донной частью. Использовалась поперечная державка цилиндрической формы диаметром 12 мм, ось располагалась на относительном расстоянии $\bar{x}_c = \frac{x_c}{l} = 0,55$ от носика конуса.

За характерные размеры взяты: площадь миделевого сечения и длина образующей конуса. Значения этих параметров приведены в табл. 1.

В экспериментах с моделью конуса с полусферой в донной части при $M = 2,3$, $Re = 4,5 \cdot 10^6$ было обнаружено возникновение двух предельных циклов. Параметры потока приведены в табл. 2. На рис. 4 черной линией обозначена история углов атаки (α), амплитуды (ϕ). Малый неустойчивый предельный цикл располагается на амплитуде порядка 7° (синяя пунктирная линия), большой устойчивый на амплитуде около 13° (красная пунктирная линия).

Таблица 1

Параметры модели

Table 1

Parameters of the model

Параметр	Значение
l , м	0,177
S , м ²	0,0115
I_z , кг·м ²	0,002193

Таблица 2

Параметры потока в экспериментах

Table 2

Test's flow parameters

Эксперимент	M	$Re \cdot 10^6$	q , кПа	v , м/с
4216	2,3	4,5	66	582
4217	2,3	4,5	66	582

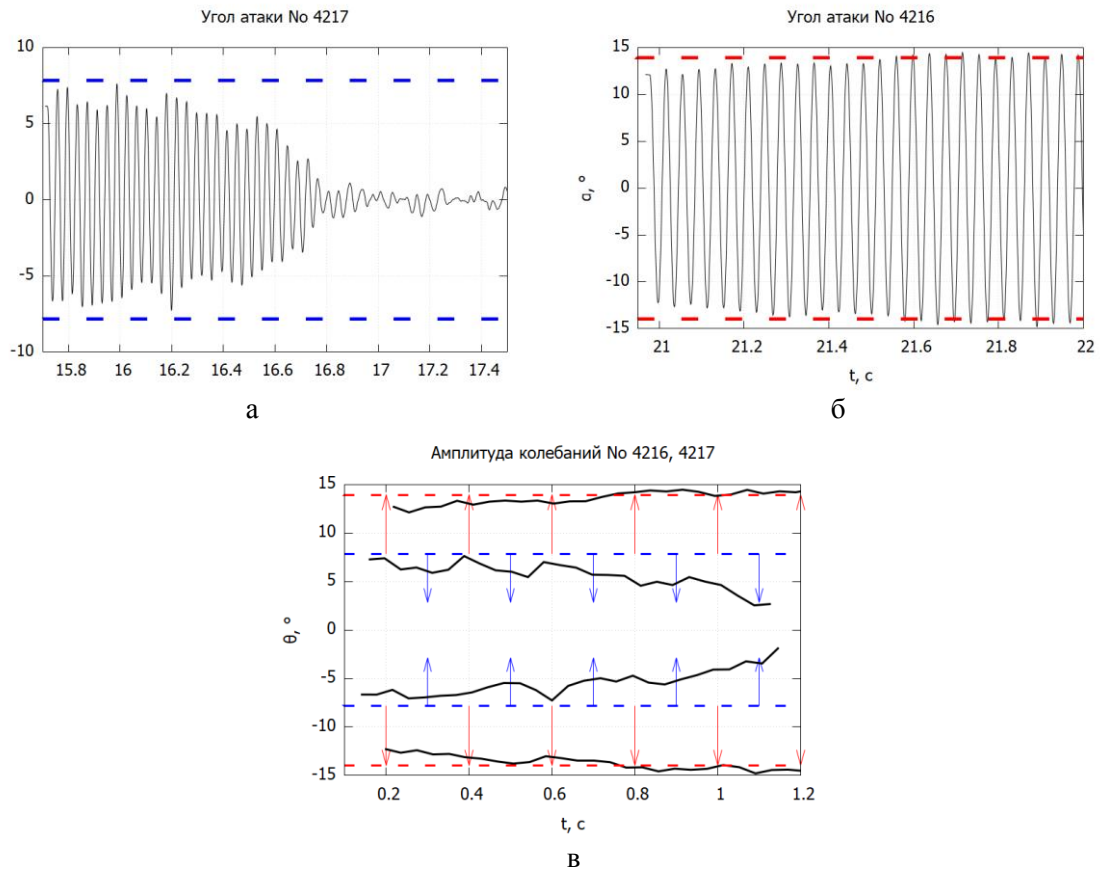


Рис. 4. Истории углов колебаний: а – № 4217; б – № 4216; в – № 4216 и № 4217
 Fig. 4. Angle history of oscillation: а – № 4217; б – № 4216; в – № 4216 and № 4217

Уравнение Ван дер Поля, как упоминалось ранее, не может описать поведение модели в ходе экспериментов. В рассматриваемом случае двум предельным циклам должны соответствовать четыре особые точки в члене вязкого демпфирования. Наиболее простая функция, отвечающая этим требованиям, полиномиальная. Так как изучается модель формы тела вращения и ось ее колебаний находится в оси симметрии, можно положить, что полином включает в себя только четные степени. В таком случае уравнение движения модели представляется в следующем виде:

$$I\ddot{\alpha} - \frac{sql^2}{\nu} \left[m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}} \right] (\alpha) \dot{\alpha} - qslm_{st} = 0,$$

$$\left[m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}} \right] = (e_0 + e_2\alpha^2 + e_4\alpha^4),$$

$$m_{st} = m_z^{\alpha}\alpha.$$

Статический член берется в линейном приближении за неимением достаточного количества данных для нахождения более точного приближения. В работах [3; 4] показана слабая зависимость производной момента тангажа от угла атаки модели. Такое представление уравнения отвечает трем вариантам фазового портрета (рис. 5). Наблюдаемый случай двух предельных циклов соответствует случаю (б) на рис. 5.

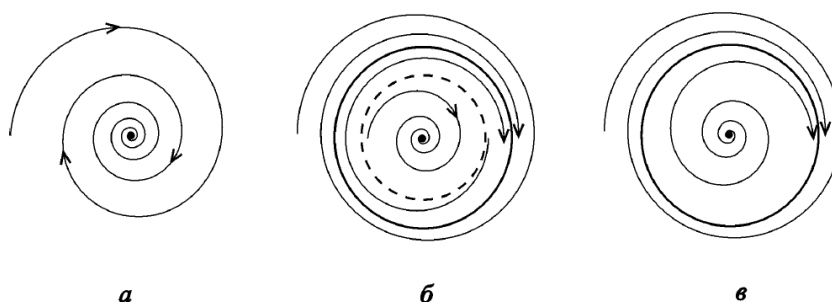


Рис. 5. Иллюстрация фазового пространства
для уравнения с вязким демпфированием в виде полинома 4-й степени
Fig. 5. Illustration of phase space for equation with viscous damping as 4th degree polynomial

Также данная модель позволяет описать динамику амплитуд, наблюдаемых в некоторых экспериментах, которую можно условно назвать «ступенчатой», что соответствует случаю (а) на рис. 5. В этом случае два корня полинома комплексные.

Стоит заметить, что уравнение данного вида также используется для описания тока в электрических цепях с генератором. Система основана на генераторе на активном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью [5].

Определение коэффициентов полинома аэродинамического демпфирования по экспериментальным данным

Редд и др. [7] рассматривали колебательное уравнение с динамической частью вида полинома. Была сформулирована методика и показана ее высокая точность на примере численного решения заданного уравнения и обратного поиска его коэффициентов.

В соответствии с методикой, приведенной в работе, результаты эксперимента для одномерного колебания модели по углу атаки рассматриваются следующим образом:

$$I\ddot{\alpha} - f(\alpha)\dot{\alpha} + k\alpha = 0.$$

Предполагается, что коэффициенты вязкого демпфирования в уравнении динамики модели представляются в виде полинома четных степеней:

$$f(\alpha) = A_0 + A_2\alpha^2 + A_4\alpha^4.$$

Можно связать их с коэффициентами эквивалентного вязкого демпфирования, где θ_0 – амплитуда колебаний:

$$f_e(\theta_0) = C_0 + C_2\theta_0^2 + C_4\theta_0^4.$$

При этом связь коэффициентов при полиномах будет следующей:

$$A_0 = C_0, \quad A_2 = 4C_2, \quad A_4 = 8C_4.$$

По истории углов атаки колебаний можно определить полином $f_e(\theta_0)$ из следующего соотношения (рис. 6):

$$f_e(\theta_0) = \frac{2I}{T} \ln \left(\frac{\theta_{0,i+1}}{\theta_{0,i}} \right).$$

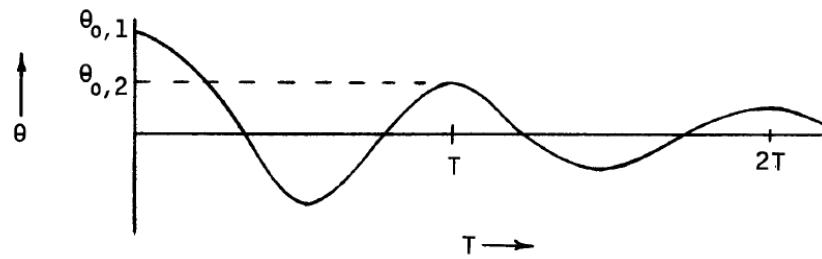


Рис. 6. Иллюстрация метода определения коэффициентов эквивалентного демпфирования из истории угла атаки

Fig. 6. Illustration of the method of determination of the effective damping polynomial from the history of angle of attack

По полученным значениям полинома эквивалентного демпфирования можно определить коэффициенты полинома эквивалентного демпфирования. После чего, имея в виду соотношение между коэффициентами разложения эквивалентного демпфирования и реального демпфирования, можно получить искомые аэродинамические коэффициенты демпфирования:

$$\left[m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}} \right] = 2 \frac{v}{qsl^2} f(\alpha).$$

Из экспериментальных данных были выделены отрезки времени, на которых наблюдался переход амплитуды между предельными циклами. С использованием приведенной методики были определены коэффициенты демпфирования. Полученный набор коэффициентов для одного режима и модели далее рассматривался как совокупность. После этого аппроксимацией были найдены коэффициенты полинома эквивалентного вязкого демпфирования (рис. 7).

Приближение полиномиальной зависимостью коэффициентов демпфирования в виде, указанном выше, приняв в качестве характерной длины длину образующей конуса, в качестве характерной площади площадь миделевого сечения модели получены коэффициенты полиномов (табл. 3, аппроксимация полинома производилась в размерности радиан).

Отмечается, что аппроксимация выполнялась для заведомо четного полинома. Экспериментальные данные не подвергались фильтрованию.

Численное решение прямой задачи

Выполнено прямое решение дифференциального уравнения с использованием библиотеки boost/ODEINT. Решалось уравнение, соответствующее рассматриваемому ранее:

$$\ddot{\alpha} - (A_0 + A_2 \alpha^2 + A_4 \alpha^4) \dot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0.$$

Коэффициент $\omega_0^2 = -\frac{qsl m_z^{\alpha}}{I}$ соответствовал полученному в эксперименте $\omega_0^2 = 27400 \frac{1}{c^2}$.

Коэффициенты при полиноме члена вязкого демпфирования A_i взяты из табл. 3.

На рис. 8 приведены сравнения численного решения и амплитуды колебаний, наблюдаемых в эксперименте. Синяя линия – численное решение, ломаные линии – амплитуды колебаний, наблюдаемые в экспериментах (см. рис. 8, а, б). На рис. 8, в приведены их фазовые портреты, черная линия – результаты численного расчета.

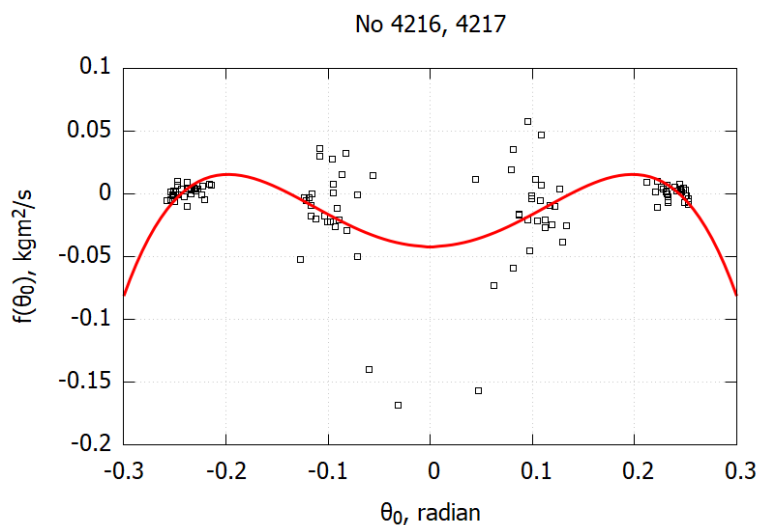


Рис. 7. График аппроксимации полинома эквивалентного демпфирования
Fig. 7. Graph of approximation of the effective damping polynomial

Таблица 3

Коэффициенты полиномов
эквивалентного демпфирования, демпфирования
и коэффициентов аэродинамического демпфирования

Table 3

Coefficients of effective damping function, damping function
and aerodynamic damping coefficients

Коэффициент	Полином / степень		
	0	2, рад ⁻²	4, рад ⁻⁴
$C_i, \frac{1}{H \cdot c}$	-0,04143	2,919	-37,43
$A_i, \frac{1}{H \cdot c}$	-0,04143	11,677	-299,45
m_{dyn_i}	-0,507	142,9	-3664,7

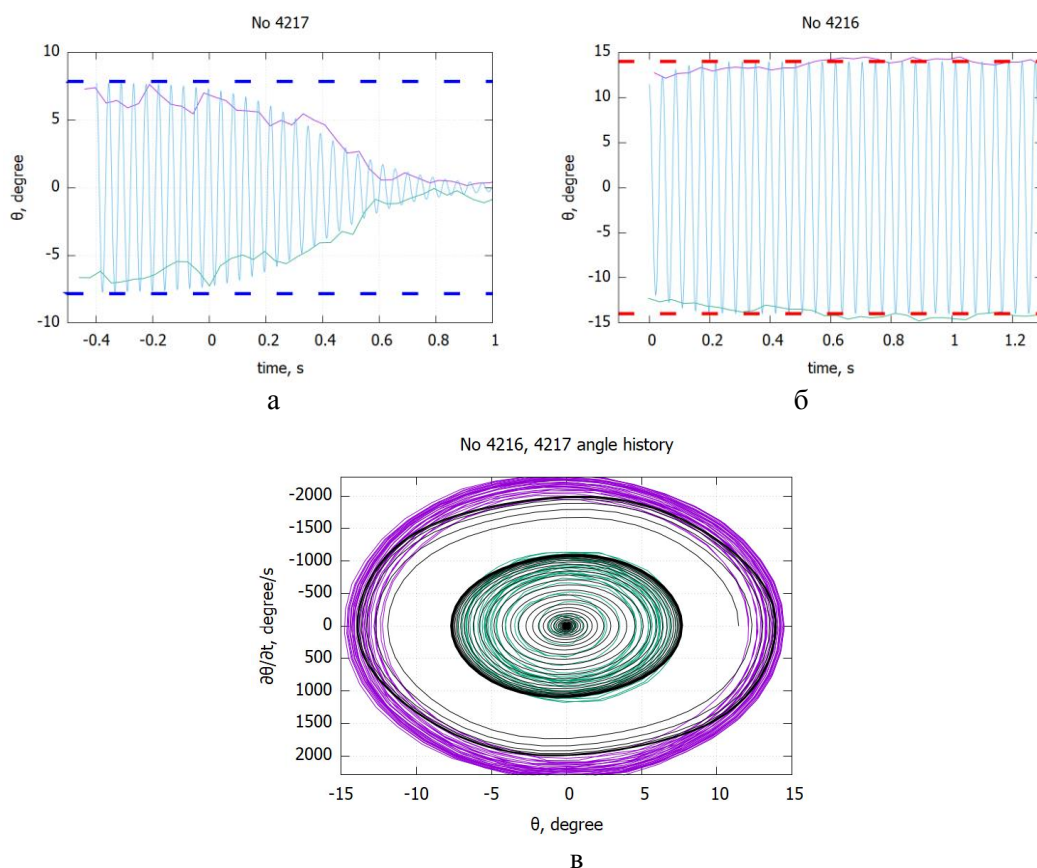


Рис. 8. Экспериментальные наблюдения и результаты численного расчета
 Fig. 8. Experiment's results and numerical results

Динамика амплитуды на масштабе времени перехода между предельными циклами описывается удовлетворительно. Однако фазовая кривая решений на большей амплитуде заметно отклоняется от экспериментальной, что говорит об иной зависимости скорости угла атаки.

Заключение

Был установлен закон движения конически-сферического тела при числе Маха $M = 2,3$. Полученные коэффициенты закона движения показали удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. Такое описание динамики модели позволяет обобщать на первый взгляд разнородные эксперименты и описывать их в рамках одного закона. Подход позволяет выделить области возможной бифуркации (слияния противоположных предельных циклов), что для аэродинамики может указать на особенное сочетание параметров, которое требует более пристального внимания.

Можно сделать следующие замечания по проведению экспериментов. Для более точного описания необходимо получить экспериментальные данные истории углов атаки, начальная амплитуда которых находится наиболее близко к углу неустойчивого предельного цикла и наиболее далеко от устойчивого. Для этого на экспериментальной установке необходимо обеспечить возможность тонкого установления различных начальных углов. Важным проектом является постановка экспериментов по измерению давлений на поверхности модели как

в статике, так и в случае свободных колебаний модели, что позволит рассмотреть простую модель постоянной задержки на данной системе.

Список литературы

1. **Kazemba C. D., Braun R. D., Clark L. G., Schoenenberger M.** Survey of Blunt Body Dynamic Stability in Supersonic Flow. *AIAA*, 2012, no. 4509, pp. 1–27.
2. **Адамов Н. П., Харитонов А. М., Часовников Е. А.** Аэродинамические производные конуса с углом полураствора 20° при сверхзвуковых скоростях // *Теплофизика и аэромеханика*. 2014. Т. 21, № 6. С. 711–723.
3. **Адамов Н. П., Пузырёв Л. Н., Харитонов А. М., Часовников Е. А., Дядькин А. А., Крылов А. Н.** Аэродинамические производные модели головного блока системы аварийного спасения при гиперзвуковых скоростях // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 6. С. 749–758.
4. **Teramoto S., Fujii K., Hiraki K.** Numerical Analysis of Dynamic Instability at Transonic Speeds. In: The Institute of Space and Astronautical Science Report SP no. 17. March 2003.
5. **Takashi Abe, Syuichi Sato, Yutaka Matsukava, Kzushi Yamomoto, Kazumi Hiraoka** Study for Dynamically Unstable Motion of Reentry Capsule. In: The Institute of Space and Astronautical Science Report SP no. 17. February 2003.
6. **Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М.** Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2002.
7. **Redd B., Olsen D. M., and Barton R. L.** Relationship between the Aerodynamic Damping Derivatives Measured as a Function of Instantaneous Angular Displacement and the Aerodynamic Damping Derivatives Measured as a Function of Oscillation Amplitude. Manned Spacecraft Center, Houston, Texas. NASA TN D-2855, June 1965.

References

1. **Kazemba C. D., Braun R. D., Clark L. G., Schoenenberger M.** Survey of Blunt Body Dynamic Stability in Supersonic Flow. *AIAA*, 2012, no. 4509, pp. 1–27.
2. **Adamov N. P., Kharitonov A. M., Chasovnikov E. A.** Aerodynamic derivatives of 20 degree angled cone at supersonic speeds. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 6, pp. 711–723. (in Russ.)
3. **Adamov N. P., Puzyrev L. N., Kharitonov A. M., Chasovnikov E. A., Dyadkin A. A., Krylov A. N.** Aerodynamic derivatives of head block of emergency rescue system at hypersonic speeds. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 749–758. (in Russ.)
4. **Teramoto S., Fujii K., Hiraki K.** Numerical Analysis of Dynamic Instability at Transonic Speeds. In: The Institute of Space and Astronautical Science Report SP no. 17. March 2003.
5. **Takashi Abe, Syuichi Sato, Yutaka Matsukava, Kzushi Yamomoto, Kazumi Hiraoka** Study for Dynamically Unstable Motion of Reentry Capsule. In: The Institute of Space and Astronautical Science Report SP no. 17. February 2003.
6. **Kuznetsov A. P., Kuznetsov S. P., Riskin N. M.** Nonlinear oscillation. Moscow, Fizmatlit, 2002.
7. **Redd B., Olsen D. M., and Barton R. L.** Relationship between the Aerodynamic Damping Derivatives Measured as a Function of Instantaneous Angular Displacement and the Aerodynamic Damping Derivatives Measured as a Function of Oscillation Amplitude. Manned Spacecraft Center, Houston, Texas. NASA TN D-2855, June 1965.

Информация об авторах

Николай Петрович Адамов, кандидат технических наук

Никита Андреевич Мищенко, лаборант

Евгений Александрович Часовников, кандидат технических наук

Information about the Authors

Nikolai P. Adamov, Candidate of Engineering Sciences

Nikita A. Mishchenko, Laboratory Assistant

Evgenii A. Chasovnikov, Candidate of Engineering Sciences

*Статья поступила в редакцию 14.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 14.05.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*

Научная статья

УДК 532.525; 536.423.1

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

Истечение этанола в среду с варьируемой степенью разрежения

Александр Сергеевич Яскин¹ ✉
Александр Евгеньевич Зарвин² ✉
Валерий Владимирович Каляда³
Кирилл Алексеевич Дубровин⁴
Виталий Эдуардович Художитков⁵

¹⁻⁵ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

² zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

³ v.kalyada@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2739-5017>

⁴ akdubr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9655-1242>

⁵ v.khudozhnikov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5045-8587>

Аннотация

Представлены экспериментальные результаты наблюдения микроструй этанола, истекающих в сильно разреженную среду (вакуум) через сопло. Изучение процесса производилось как при горизонтальном, так и при вертикальном по направлению силы тяжести истечении жидкости из источника. Соблюдалось условие поддержания в вакуумной камере неизменным давления остаточного газового фона на уровне намного ниже давления насыщенных паров рабочей жидкости при заданной температуре истечения. Показана возможность моделирования сложных процессов истечения микроструй жидкостей в пространство с заданной разреженной атмосферой на компактном вакуумном газодинамическом стенде. Установлено, что длительное истечение из тонкого капилляра или отверстия малого диаметра в вакуум или сильно разреженную газовую среду существенно отличается от хорошо изученных режимов истечения в плотную газовую среду, а также от импульсных режимов истечения в вакуум. В работе описаны основные особенности течения и условия возникновения неустойчивости. Показано, что длительное течение микроструи жидкости в вакууме обладает высокой степенью поверхностной неустойчивости с большим количеством внезапных изменений направления, структуры и наблюдаемой плотности. Предложено объяснение причин разрушения микроструи, обусловленных преимущественно совокупностью капиллярной неустойчивости и интенсивного испарения перегретой жидкости с поверхности струи с образованием поверхностных газовых каверн, вызывающих взрывное разрушение микроструи и выброс парожидкостных капель.

Ключевые слова

микроструя жидкости, поверхностная неустойчивость, моделирование условий вакуума, этанол, насыщенный пар

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUS-2020-0039) и РФФИ (грант № 20-01-00332/20). В экспериментах использовано оборудование ЦКП «Прикладная физика» НГУ

Для цитирования

Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А., Художитков В. Э. Истечение этанола в среду с варьируемой степенью разрежения // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 47–64. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

© Яскин А. С., Зарвин А. Е., Каляда В. В., Дубровин К. А., Художитков В. Э., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 47–64
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 47–64

Flow of Ethanol into a Medium with Varying Degrees of Rarefaction

Alexander S. Yaskin¹ ✉, Alexandr E. Zarvin² ✉
Valery V. Kalyada³, Kirill A. Dubrovin⁴
Vitaly E. Khudozhitkov⁵

¹⁻⁵ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹ yas@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5366>

² zarvin@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5088>

³ v.kalyada@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2739-5017>

⁴ akdubr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9655-1242>

⁵ v.khudozhitkov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5045-8587>

Abstract

Experimental results of observation of ethanol microjets flowing into a highly rarefied medium (vacuum) through a nozzle are presented. The investigation of the outflow process was carried out both horizontally and vertically in the direction of gravity, when the liquid was expelled from the source. The condition of keeping constant the residual background pressure in the vacuum chamber is much lower than the saturated vapour pressure of the working liquid at a given temperature of the blast. The possibility of simulation of complex processes of the flow of micro-liquids in a space with a given rarefied atmosphere on a compact vacuum gas-dynamic test bench is shown. It is found that the continuous efflux from a thin capillary or a hole of small diameter into a vacuum or a strongly rarefied gaseous medium differs significantly from the well-studied modes of efflux into a dense gaseous medium, as well as from the pulse modes of efflux into a vacuum. The paper describes the main features of the flow and the conditions of the instability emergence. It is shown that the long-term flow of a liquid microjet in a vacuum has a high degree of surface instability, with a large number of sudden changes in direction, structure and observed density. An explanation for the causes of microjet failure, caused mainly by a combination of capillary instability and intense evaporation of superheated liquid from the surface of the jet, is proposed. The formation of surface gas caverns causing explosive collapse of the microjet with ejection of vapor-liquid droplets is established.

Keywords

liquid microjet, surface instability, modelling of vacuum conditions, ethanol, saturated steam

Funding

The work was performed using the shared equipment center “Applied physics” of the NSU Physics Department with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project number FSUS-2020-0039) and RFBR (grant number 20-01-00332/20)

For citation

Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovin K. A., Khudozhitkov V. E. Flow of Ethanol into a Medium with Varying Degrees of Rarefaction. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 47–64. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-47-64

Введение

Один из аспектов внимания исследователей к струйным течениям в вакууме и разреженных средах обусловлен быстрым развитием программ освоения ближнего и дальнего космоса, движением летательных аппаратов различного назначения в разреженных атмосферах планет. Мини- и микроразмерные спутники нового поколения формата CubeSat, активно используемые в таких программах, позволяют решать большое число научных и прикладных задач [1; 2]. Интерес к этим системам вызван низкой стоимостью подготовки к запуску и самого запуска. Недостатком таких спутников, ограничивающим их применение, является небольшая продолжительность жизни, обусловленная практическим отсутствием двигателей коррекции и поддержания орбиты¹. Перспективным и быстро развиваемым направлением исследований является оснащение миниатюрных аппаратов микросопловыми двигателями

¹ www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2014.pdf

ми [3–6]. Одним из возможных решений при разработке двигателей ориентации и коррекции малых спутников является использование жидкости, распыляемой из сопла в космическое пространство для получения тяги². С другой стороны, космическое пространство как естественная среда низкого давления приводит к техническим решениям, недоступным в плотной газовой среде. Решения, основанные на явлении мгновенного испарения, обеспечивают системам позиционирования [7], подачи топлива [8], охлаждения – терморегуляции [9] уникальные характеристики и преимущества на большой высоте и в открытом космосе.

Исследования струйных течений перегретых жидкостей в основном выполнены в импульсных или квазистационарных (с малым временем истечения) режимах. Процессы длительного течения микроструй жидкости в метастабильном состоянии в среду с контролируемой степенью разрежения или в глубокий вакуум, соответствующие открытому космосу и разреженным атмосферам планет, а также процессы, происходящие при формировании микроструи маловязкой жидкости, в этих условиях исследованы недостаточно.

Истечение жидкости в разреженную среду (вакуум) сопровождается рядом особенностей, не встречающихся в плотных средах. Рассмотрим некоторые из них. Отсутствие аэродинамического сопротивления газа, окружающего струю в плотной среде, исключает силовое взаимодействие струи с окружающим газом, возмущающее течение и разрушающее струю [10]. В этих условиях важную роль при течении тонких (микронных и субмиллиметровых) струй могут играть особенности поверхностного натяжения, вязкости и процесса испарения. Истечение жидкости из отверстия или сопла в среду с давлением P_b ниже давления P_s насыщенных паров жидкости при температуре T истечения переводит ее в метастабильное состояние (перегретая жидкость). Струйное течение перегретой жидкости за счет интенсивного образования газовой фазы может сопровождаться вскипанием, разрывами струи и другими эффектами, сопровождающими формирование парожидкостного потока.

Экспериментальные и теоретические исследования истечения струй воды в вакуум были выполнены в ряде исследований. Так, в [11] было установлено, что струя истекает из сопла в виде пучка и резко распадается на капли и частицы льда. «Разрывной» механизм объяснен внезапным кипением, вызывающим рост пузырьков пара, разрушающих струю вследствие падения давления в струе перегретой воды. Эксперименты по распаду струй перегретой воды и жидкого азота, истекающих из коротких сопел в атмосферу с давлением ниже давления насыщения, соответствующего температуре жидкости, проанализированы в [12]. Авторы отметили три характерных типа струй: с капиллярным распадом холодной и со вспышечным распадом перегретой воды при отсутствии аэродинамического разрушения струи, а также перегретые струи азота со вспышечным распадом в условиях аэродинамического разрушения. Зарегистрирована значительно большая изменчивость перегретых струй в сравнении с холодными из-за эффекта вспышечного распада струи, вызванного пузырями пара. Показано также существование неразрушающихся перегретых струй при малых степенях перегрева.

Взрывное вскипание в области гомогенного флуктуационного зародышеобразования сильно перегретых струй различных жидкостей в условиях истечения в атмосферу детально описано в [13]. Показано, что взрывное вскипание наблюдается, как правило, при сильном нарушении термодинамического равновесия, в области метастабильных состояний в окрестности критической температуры T_* , когда давление насыщенного пара сильно перегретой жидкости при температуре истечения значительно превышает давление среды. Было показано, что для протекания взрывного вскипания необходим нагрев жидкости до температур $T > 0,9T_*$. При этом вскипание сопровождается бурным фазовым превращением жидкости в пар одновременно во всем объеме струи на гомогенных центрах парообразования. При температурах ниже $0,9T_*$ распад перегретых струй протекает на гетерогенных центрах зародышеобразования. В [14–17] для оценки степени перегрева жидкости по давлению N_s при

² www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2014.pdf

истечении в разреженную среду с температурой T_0 использовано отношение давления насыщения $P_s(T)$ на кривой фазового равновесия при температуре T к давлению среды $P_b(T_0)$ ($N_s = P_s(T)/P_b(T_0)$). Можно предполагать, что степень перегрева в предложенном виде не в полной мере отражает формирование и распад микроструй жидкости, истекающих в вакуум. Так, в [18; 19] отмечено, что струйное течение воды может существовать в вакууме без разрывов при сравнительно низких начальных температурах и малых диаметрах потока.

Наряду со степенью перегрева по давлению, глубину захода состояния жидкости в метастабильную область принято характеризовать степенью перегрева ΔT по температуре, которая равна разности температуры истекающей жидкости T_0 и температуры кипения $T_s(P_b)$ ($\Delta T = T_0 - T_s(P_b)$) при давлении разреженной среды, в которой наблюдается течение [14; 18]. В отличие от степени перегрева по давлению степень перегрева по температуре имеет абсолютный характер и не позволяет оценить относительную глубину захода в область перегретых состояний и долю запасенной энергии метастабильной жидкостью.

Сложность и высокая стоимость экспериментального изучения физических процессов в струйных течениях в космическом пространстве обуславливает разработку наземных установок для моделирования течений в вакууме [20; 21]. Наземное моделирование в вакуумных установках истечения потоков жидкости из сопел и каналов и изучение формирования газожидкостных струйных течений модельных жидкостей в разреженных атмосферах различного состава упрощает разработку двигателей и струйных систем различного назначения (см., например, [22–26]) для объектов космической техники. Исследования струйных течений в этих работах были выполнены в импульсных или квазистационарных (с малым временем истечения) режимах в условиях истечения в слаборежеженную среду.

Целью настоящей работы является разработка техники и средств диагностики при моделировании процессов длительного течения микроструй жидкости в среду с контролируемой степенью разрежения, соответствующую открытому космосу (глубокий вакуум), а также разреженным атмосферам планет, и исследование процессов, происходящих при формировании микроструи маловязкой жидкости в этих условиях. Для исследования использована азеотропная смесь этанола 95,57 % (мас) с водой 4,43 % (мас), имеющая высокое давление насыщенных паров при температурах исследования.

Экспериментальная установка

Исследования проведены на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета. Подробное описание экспериментального стенда дано в [27]. Принципиальная схема измерений приведена на рис. 1 [28]. Безмасляная система вакуумирования стенда (1) обеспечила в камере расширения (2) (объемом 0,46 м³) высокое разрежение (до 0,1 мПа) остаточного газа в отсутствие струи жидкости и до 10 мПа при истечении жидкости. Давление в камере расширения P_b варьировалось контролируемой газоподачей и измерялось емкостным вакуумметром, показания которого не зависели от рода газа, с погрешностью 0,2 %.

Наблюдение, фотографирование и видеозапись микроструи исследуемой жидкости в режиме непрерывного истечения осуществлялись фото- и видеоаппаратурой (3) через оптическое окно (4). Время видеорегистрации установившегося течения жидкости составляло 2÷5 минут и ограничивалось только программой эксперимента. Область течения засвечивалась через смотровое окно равномерным источником света. Протяженность участка наблюдения в вертикальном и горизонтальном направлениях превышала 0,3 м.

Сопло (5) термостатировалось на теплопроводе, нагреваемом печью сопротивления, в диапазоне температур $T_0 = 290\div 360$ К. Температура теплопровода и сопла измерялась цифровым термометром сопротивления (6), измерительный датчик которого устанавливался в сверлении теплопровода вблизи сопла. Минимизация поперечного градиента температуры соплового блока достигалась высокой теплопроводностью стенок сопла и слабым теплоотво-

дом с деталей конструкции. Сопло соединялось трубкой из полиамида с сосудом с исследуемой жидкостью (7), размещенным вне вакуумной установки. Температура T жидкости в сосуде контролировалась цифровым термометром сопротивления (8) с погрешностью 0,1 К. Перепад давления ΔP_0 определялся разницей между давлением в сосуде над жидкостью, P_0 , измеряемым мановакуумметром (9), и остаточным давлением в вакуумной камере, P_b , измеряемым вакуумметром (10). Погрешность измерения давления не превышала 1,5 %. Для исследования истечения струй в среду с атмосферным давлением вакуумная камера наполнялась воздухом, а в сосуде с жидкостью создавалось избыточное над атмосферой давление компрессором (11). Для реализации режимов течения жидкости в вакуум при перепадах давления менее 100 кПа сосуд (7) подсоединялся к независимой системе вакуумной откачки (12).

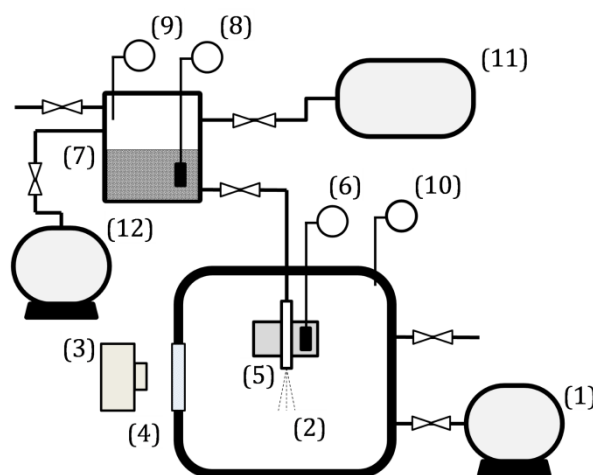


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Измерения непрерывного установившегося течения жидкости производились при горизонтальном и вертикальном (сверху вниз относительно вектора силы тяжести) направлении течения микроструй этанола. Предусмотрена возможность изменения P_b в пределах от 0,01 до 600 Па, но в выбранном режиме при проведении экспериментов остаточное (фоновое) давление в вакуумной камере поддерживалось постоянным. Вертикальные микроструи истекали из капилляра (цилиндрическое сопло) из нержавеющей стали длиной $L = 25,1$ мм, внешним диаметром $d = 650$ мкм и внутренним диаметром канала $d_a = 400$ мкм. Горизонтальные микроструи формировались при истечении из отверстия («сопла») в тонкой стенке. В работе использованы сопла трех диаметров, $d_a = 120, 170, 290$ мкм. Скорость истечения этанола из сопла контролировалась по расходу жидкости из мерного объема.

Результаты и обсуждение

Вертикальные микроструи. Истечение из тонкого капилляра

Физические величины, характеризующие режимы исследованных вертикальных микроструй этанола, приведены в табл. 1. Значения коэффициента поверхностного натяжения σ , коэффициента динамической вязкости μ , давления насыщенных паров P_s этанола взяты

из [29] и ГОСТ Р 8.991 – 2020³. Для оценки степени перегрева жидкости (глубины захода в метастабильную область) использовались как относительные, так и абсолютные параметры.

Для оценки степени перегрева этанола по давлению в работе использован параметр $N_s = P_s/P_b$ [15], для оценки степени перегрева по температуре – параметр $\Delta T_s = T_0 - T_s$ [14]. В скобках в таблице показан коэффициент метастабильности по температуре $\varepsilon_L = \bar{c}(T - T_s)/L$ [13] в процентах.

Таблица 1

Экспериментальные режимы истечения вертикальных микроструй этанола

Table 1

Experimental modes of outflow of the vertical ethanol micro-jets

Номер режима	T_0 , К	σ , мПа·м	μ , мПа·с	P_s , кПа	$\Delta P_0 = 100$ кПа				$\Delta P_0 = 20$ кПа			
					P_b , Па	N_s	T_s , К	ΔT_s , К	P_b , Па	N_s	T_s , К	ΔT_s , К
1	295	22	1,16	5,81	100000	0	295	0	100000	0	295	0
2	295	22	1,16	5,81	600	10	262	33 (11)	600	10	262	33 (11)
3	295	22	1,16	5,81	2	3000	201	94 (32)	1	6000	196	99 (34)

Оценим максимальную степень перегрева жидкости по температуре ΔT_s , ведущую к полному разрушению микроструи. Запишем уравнение теплового баланса для процесса испарения жидкости в квазиадиабатических условиях (без учета потерь на конденсацию на поверхности сопла и теплоотвод по конструкции рабочего участка)

$$\bar{c} \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot S \cdot (T_0 - T_s) = L \cdot \rho \cdot \bar{v} \cdot S,$$

где $(T_0 - T_s)$ – температура перегрева жидкой фазы этанола, ρ – ее плотность, \bar{c} – средняя в диапазоне $(T_0 - T_s)$ удельная теплоемкость, \bar{v} – средняя по сечению потока скорость, S – площадь поперечного сечения микроструи. Тогда для максимальной степени перегрева жидкости можно записать

$$\Delta T_{s\max} = (T_0 - T_s) = L / \bar{c}. \quad (1)$$

Как видно из (1), если степень перегрева $\Delta T_s < L / \bar{c}$, то струйное течение представляет преимущественно либо однофазный поток жидкости, либо двухфазный парожидкостный поток. При достижении степени перегрева значения $\Delta T_{s\max}$ возможно образование однофазного потока пара. Выражение (1) согласуется с коэффициентом метастабильности по температуре, предложенном в [13], если его представить в виде отношения

$$\bar{c} \cdot \Delta T_s / L = \varepsilon_L.$$

Приведенные в табл. 1 степени перегрева по температуре при истечении этанола в вакуум в условиях проведения эксперимента далеки от максимального значения $\Delta T_{s\max} = 295$ К. Следует ожидать, что стационарное течение этанола в метастабильном состоянии в условиях отсутствия кавитационных явлений из-за интенсивного поверхностного испарения перегретой жидкости будет представлять собой микрострую с поверхностной неустойчивостью [14].

Фотографии струй этанола для режимов 1–3 (см. табл. 1) показаны на рис. 2. В верхней части фотографий по центру видно светлое изображение конца капилляра (длиной от 3 до 5 мм). В левом углу верхней части фотографий, здесь и ниже, приведен масштабный отрезок

³ ГОСТ Р 8.991 – 2020. Стандартные справочные данные. Этанол жидкий и газообразный. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

белого цвета длиной 20 мм. Фотографии приведены в разном масштабе из соображений иллюстративной наглядности. При перепаде давления на сопле $\Delta P_0 = 100$ кПа (фотографии на рис. 2, а–е) струя этанола истекала из сопла со скоростью около 7 м/с, при перепаде $\Delta P_0 = 20$ кПа (см. рис. 2, е–к) скорость истечения составила примерно 1,5 м/с. Фотографии выбраны из видеозаписи микроструи при скорости съемки 30 кадров/с. Время записи микроструй позволяло регистрировать квазистационарные периоды течения и их внезапную смену при поддержании неизменными исходных давления и температуры.

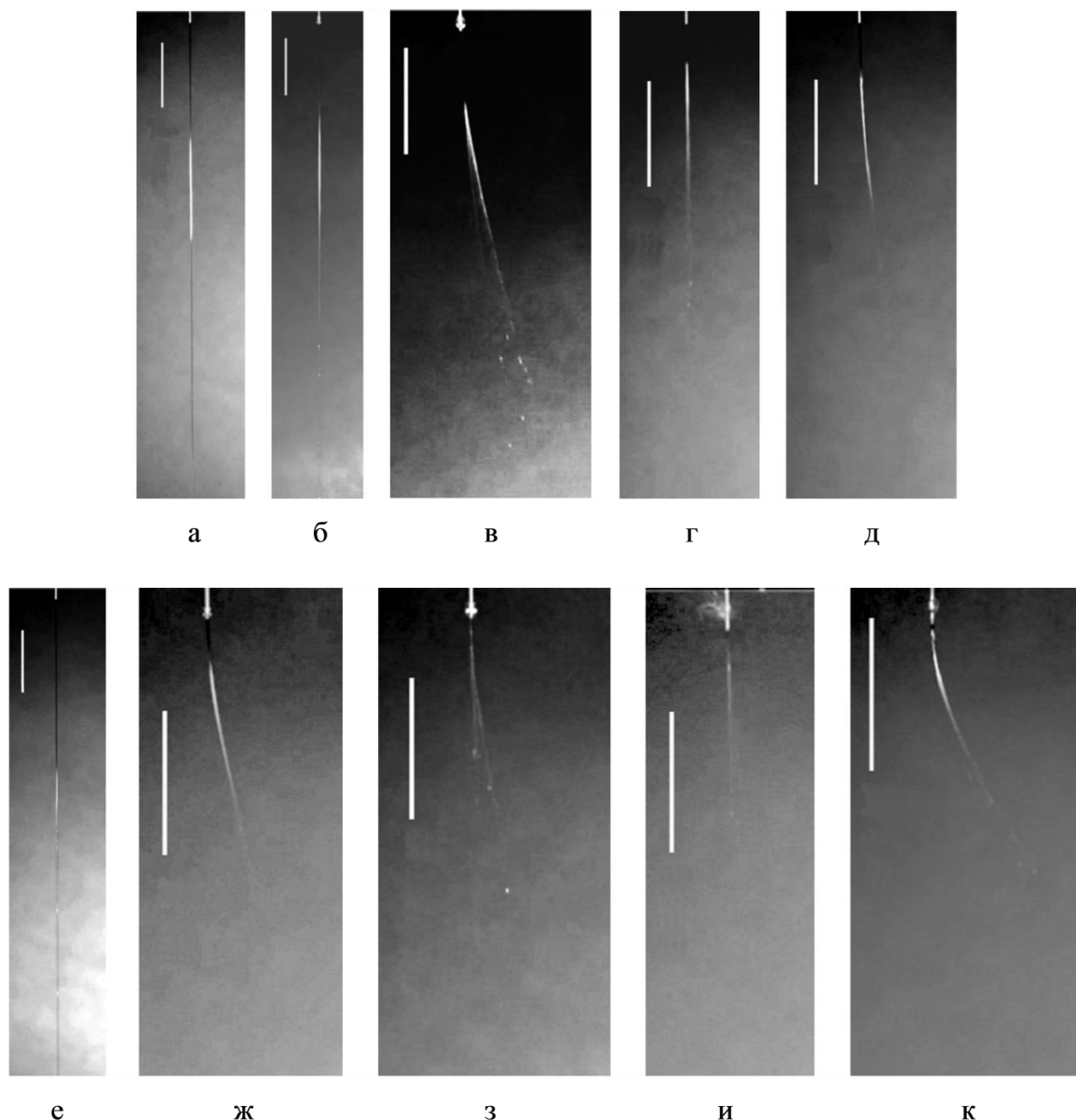


Рис. 2. Микроструи этанола при температуре 295 К
Истечение в атмосферу: режим 1 – фотографии а, е
Истечение в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 100$ кПа: режим 2 – б, в; режим 3 – г, д
Истечение в вакуум при перепаде $\Delta P_0 = 20$ кПа: режим 2 – ж, з, и; режим 3 – к

Fig. 2. Ethanol micro-jetting at 295 K
Outflow into atmosphere: mode 1 – pictures а, f
Outflow into vacuum at difference $\Delta P_0 = 100$ kPa: mode 2 – b, c; mode 3 – d, e
Outflow into vacuum at difference $\Delta P_0 = 20$ kPa: mode 2 – g, h, i; mode 3 – j

Как показали проведенные в настоящей работе исследования, течение микроструй жидкости в вакуум существенно отличается как от течения струй из сопел большого диаметра в атмосфере [30], так и от квазистационарного течения в область с разрежением [23]. Наблюдаются также различия изученных в работе микроструй при длительном истечении в вакуум с результатами [14–18]. Микроструя этанола на снимках наблюдается от выходного отверстия сопла в виде узкого длинного цилиндра темного (почти черного) цвета, на некотором расстоянии достаточно резко меняющего цвет на светлый. Для рис. 2 выбраны характерные мгновенные фотографии микроструи из видеоряда со случайным отклонением вправо от наблюдателя. Следует отметить, что во время истечения наблюдалось образование микроструй других форм и ориентаций, вплоть до полного распыления этанола с образованием паровой (парогазожидкостной) фазы, не регистрируемой либо недостаточно отчетливо регистрируемой на фотографиях. Отдельные примеры фотографий струй подобной формы, без обсуждения возможных причин изменений, приведены на рис. 3, *в–е*.

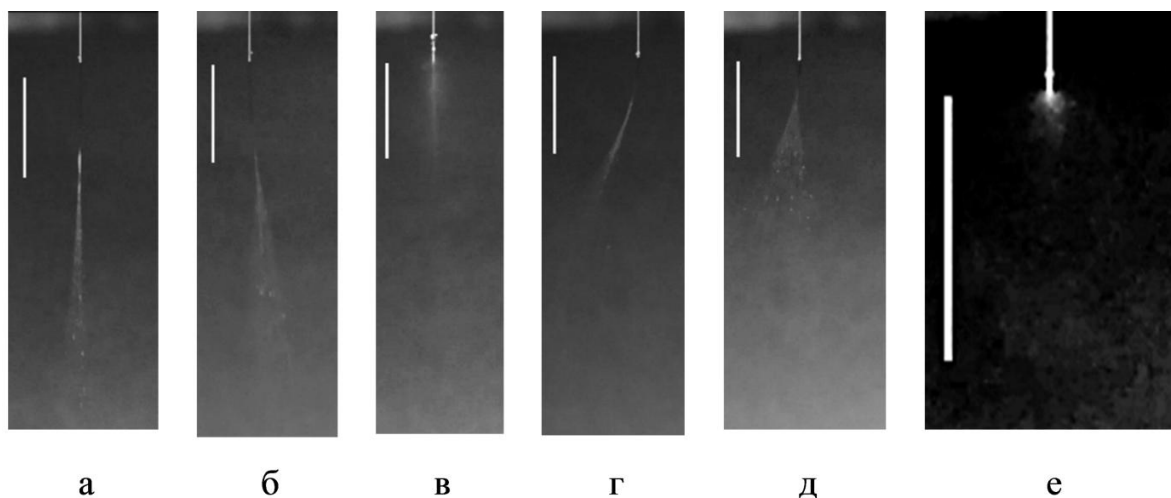


Рис. 3. Истечение этанола из капилляра в разреженную среду в режиме 3 (см. табл. 1).

Перепад давления на капилляре: *а–в* – $\Delta P_0 = 100$ кПа; *г–е* – $\Delta P_0 = 20$ кПа

Fig. 3. Outflow of ethanol from the capillary into the dilute medium in mode 3 (Table 1).

Pressure drop across the capillary: *а–с* – $\Delta P_0 = 100$ kPa; *д–е* – $\Delta P_0 = 20$ kPa

Микроструи этанола рис. 2, *а, е*, наблюдаемые при истечении в атмосферу при комнатной температуре (режим 1 табл. 1), не изменяли направление течения в процессе наблюдения, оставаясь прямолинейными. Эти струи формировались в условиях аэродинамического сопротивления и имели типичный вид, характерный для истечения жидкости в атмосфере. Как известно, в таких условиях струя состоит из двух участков: компактного и раздробленного [31]. Раздробленный участок следует за компактным и определяется воздушной аэрацией поверхности струи. Компактная часть на фотографиях наблюдается в виде темной полосы ниже сопла. Раздробленный участок струи начинается яркой светлой областью вследствие отражения света от мелких капель газожидкостной среды.

Далее, по мере испарения жидкости ниже по течению в условиях фронтального освещения следовало бы ожидать постепенную фрагментацию и диссипацию потока. Однако на фотографиях рис. 2, *а, е* после светлой слабо расширенной струи наблюдается новый темный участок. Объяснение возникшего распределения освещенности областей струи неоднородностью светового потока от источника света опровергается как предварительными калибровками, так и результатами спонтанного изменения распределения полей яркости по длине микроструи при изменении характера течения в ходе одной и той же видеорегистрации.

На представленных выборочных фотографиях с предположением неравномерного распределения светового потока не согласуется также распределение яркости изображения по длине микроструи. Темная часть струи за светлой областью на рис. 2, *а* на расстоянии 150 мм от сопла переходит в светлую с размытыми границами. На рис. 2, *е* темная область микроструи, расположенная за светлой, прерывается яркими световыми вспышками, отражающими неоднородности в толщине струи из-за ее распада.

Неустойчивость микроструй возрастает с понижением перепада давления на сопле и в камере расширения (режимы 1–3 табл. 1). В режиме 2 при перепаде давления 100 кПа наблюдается некоторый период прямолинейной микроструи (рис. 2, *б*), похожей по структуре на струи, наблюдаемые в режиме 1, но раздробленный участок начинается ближе к соплу и более выражен.

Общей тенденцией микротечений в вакууме является образование криволинейных струй. Появление такой формы отмечается в режиме 2 при перепаде давления 100 кПа (рис. 2, *в*) в виде короткой полностью распавшейся на участке наблюдения изогнутой струи. Длина микроструи и ее характерные участки значительно короче (примерно в 2 раза) размеров прямой микроструи из той же видеозаписи на рис. 2, *б*.

На рис. 2, *з, д* при перепаде давления 100 кПа зафиксированы изогнутые микроструи. С понижением перепада давления до 20 кПа (рис. 2, *ж–и*) при неизменной степени перегрева по давлению, $N_s = 10$, прямолинейные течения, как на рис. 2, *к*, наблюдаются крайне редко, изгиб микротечений возрастает, а длина полностью распавшихся струй уменьшается по сравнению с рис. 2, *б, в*. Значительный рост степени перегрева по давлению N_s с 10 до 6000 не приводит к существенному изменению длины струи (при сравнении рис. 2, *ж, з*).

Наряду с отмеченными выше формами микроструй (см. рис. 2) со слабо выраженным распадом по длине струи в процессе истечения можно также наблюдать процессы, приведенные на рис. 3. Параметры течения рис. 3 соответствуют режиму 3 табл. 1. С понижением давления в сосуде с исследуемой жидкостью (режим 3) возрастает влияние степени перегрева по давлению на форму и длину микроструи. Длина струй и их характерных отрезков уменьшается, формируются короткие полностью распавшиеся струи, снижается устойчивость течения, которое чаще меняет форму и ориентацию в пространстве. Микроструи на рис. 3, *а, б* при перепаде 100 кПа после компактного (темного) участка «взрывообразно» распадаются в конусную парожидкостную струю произвольной ориентации с углом $2\alpha = 8\text{--}13^\circ$. Так, на рис. 3, *а* распад начинается после короткого, длиной около 10 мм, участка переменной яркости, переходящего в парожидкостную фазу с яркими вкраплениями крупных капель. На рис. 3, *б* распад происходит сразу после темного участка с образованием широкой конусной парожидкостной струи. Струи этанола при перепаде 20 кПа (рис. 3, *з, д*) – более короткие с характерными участками меньшей протяженности. Конус парожидкостной струи с «взрывным» (вспышечным) распадом достигает углов $2\alpha = 30\text{--}60^\circ$.

На рис. 3, *е, е* приведены наблюдавшиеся «взрывные» (вспышечные) парожидкостные течения с плохо выраженной структурой без начального участка устойчивой жидкой фазы. На рис. 3, *е* для наглядности структура приведена в укрупненном масштабе и с большей контрастностью. Хорошо видно каплю жидкости, поднявшуюся вверх по капилляру, а также отсутствие струи жидкости. В этом случае, как предполагается, испаряющаяся жидкость образовала газовую пробку внутри капилляра, после выдавливания которой процесс истечения жидкой фазы возобновился. Таким образом, подтверждается возможность газоотделения или испарения жидкости внутри капилляра.

Внезапные изменения направления течения (см. рис. 2, 3), «взрывное» разбрызгивание микроструи в конус, взрывное испарение (см. рис. 3) наблюдались многократно в произвольные промежутки времени, чередующиеся с периодами «традиционного» течения. Течение пара этанола от капилляра, как показывает анализ видеозаписей, может быть направлено не только по оси истечения (рис. 3, *е*), но и перпендикулярно к ней, а также против направления истечения. О наличии давления, действующего вдоль капилляра против силы тяжести, и па-

ров жидкости над выходным сечением сопла можно судить по поведению капель этанола на капилляре.

Капли образуются на поверхности капилляра практически во всех вакуумных экспериментах. Впервые это явление было обнаружено в работах [22; 23] при исследовании течения пристенной пленки этанола со спутным газовым потоком из сопла в разреженное пространство. Позднее эффект наблюдали в [18] при истечении перегретой воды из капилляра. В наших экспериментах капли на капилляре видны на рис. 2, б, в, з, к, а также на всех фотографиях рис. 3. Размер капли в состоянии максимального формирования в 3–4 раза больше внешнего диаметра капилляра. Капли большего размера перестают удерживаться на поверхности и под действием гравитационных сил сползают вниз к концу капилляра. Достигнув выходного отверстия капилляра, капля сталкивается с истекающей струей, вызывая ее взрывное разрушение с образованием парожидкостного потока. Капля в этом процессе разбрызгивается в направлении, поперечном оси потока, а также под углами вверх и вниз от направления потока. Возможен и другой вариант эволюции капли: быстрый рост с подъемом вверх по капилляру. При этом наблюдается деформация формы капли. Характер деформации свидетельствует о силовом воздействии на каплю восходящего газового потока с давлением, согласно оценке, порядка 20–30 Па. В конечной стадии формирования капля сбрасывается с капилляра и разбрызгивается преимущественно вверх и в стороны.

Пример проявления отмеченного эффекта проявился в сбросе и последующем разбрызгивании капли перпендикулярно поверхности капилляра на рис. 2, и. Как показал анализ видеозаписей, подъем капли вверх по капилляру может достигать 20 мм. Согласно оценке, максимальный диаметр капли, удерживаемой силами поверхностного натяжения на капилляре, может иметь размер около 3 мм при 295 К и возрастать на 15–20 % при снижении температуры до 200 К. Экспериментально наблюдаемый размер капли близок к приведенной оценке.

Таким образом, температура истекающей жидкости, давление среды в области расширения и перепад давления на выходе из капилляра являются наиболее важными параметрами, определяющими устойчивость и форму потока. При истечении в вакуум наблюдается ряд форм неустойчивых течений в зависимости от степени перегрева. При малых степенях образуются прямые струи с одним или множественными разрывами, которые вызваны пузырьками пара при мгновенном испарении. С ростом степени перегрева неустойчивость течения, связанная с процессами мгновенного испарения, возрастает, образуются диспергированные двухфазные потоки.

Горизонтальные микроструи. Истечение из отверстия

Горизонтальные микроструи, исследованные в работе, моделировали истечение жидкости в вакуум через отверстие в тонкой стенке. Рассмотрено истечение этанола из отверстий трех размеров: 120, 170, 290 мкм. В исследованных режимах, аналогично истечению из капилляра, велась видеозапись течения на протяжении нескольких минут. Ниже, на рис. 4 и 5 приведены мгновенные фотографии наиболее характерных изменений формы и геометрии потоков. В нижней части рисунков указаны масштабные отрезки белого цвета длиной 20 мм.

Как показали эксперименты, горизонтальные микроструи из отверстия характеризуются более значительной неустойчивостью и разнообразием криволинейных форм в сравнении с вертикальными микроструями, рассмотренными выше. Молекулярные силы в струе столь значительны, что результат их действия превышает гравитационную силу, вызывая изменения течения микроструи, не согласующиеся с направлением течения в гравитационном поле. Например, при малом перепаде давления (рис. 4, а) горизонтальная микроструя при истечении внезапно изгибается вверх практически до вертикальной. При этом на конечном участке формируется «булавообразный» венчик, после чего струя переходит в состояние «взрывного» разбрызгивания. Угол конуса разлета частиц, движущихся почти прямолинейно (что свидетельствует о высокой начальной скорости частиц), превышает 90°.

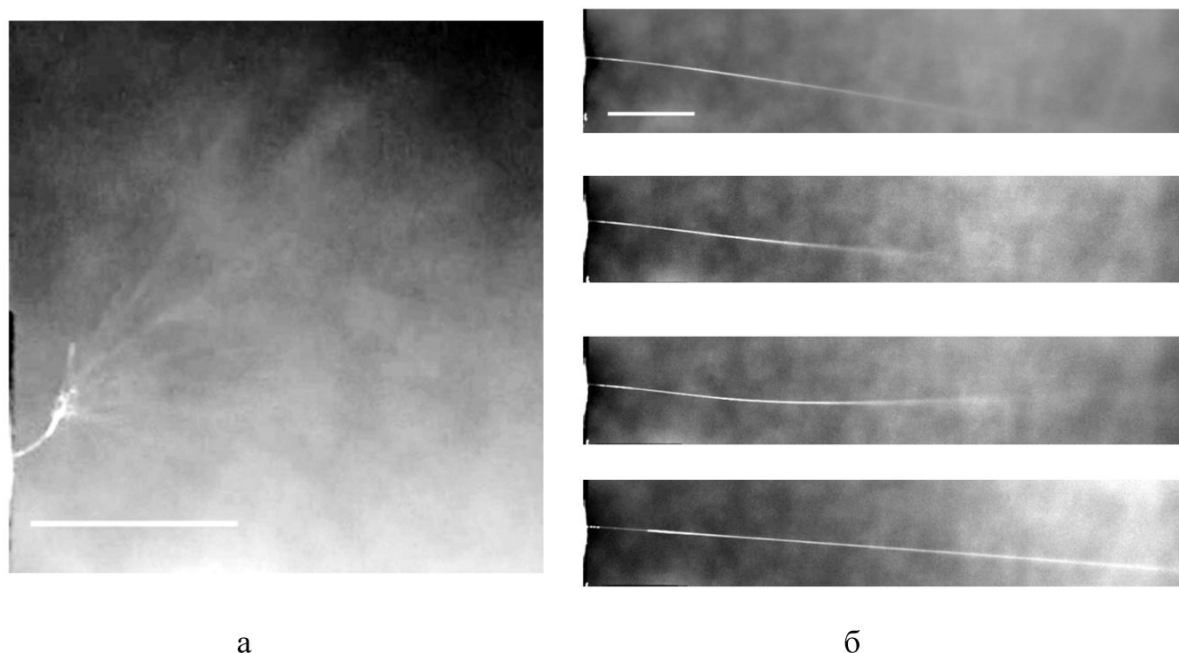


Рис. 4. Горизонтальное истечение этанола из отверстия диаметром $d_a = 120$ мкм при температуре $T = 295$ К:
 $a - \Delta P_0 = 16$ кПа, $P_b = 0,4$ Па; $б - \Delta P_0 = 100$ кПа, $P_b = 1$ Па
 (микроструя в последовательно выбранные случайные моменты времени)

Fig. 4. Horizontal outflow of ethanol from orifice with diameter $d_a = 120$ μm at temperature $T = 295$ K:
 $a - \Delta P_0 = 16$ kPa, $P_b = 0.4$ Pa; $b - \Delta P_0 = 100$ kPa, $P_b = 1$ Pa
 (microjet at successively chosen random moments of time)

На рис. 4, б показано спонтанное изменение направления и формы микроструи из отверстия диаметром 120 мкм в процессе ее истечения при перепаде давления на отверстии 100 кПа в последовательные (сверху вниз) отрезки времени. После очень короткого горизонтального участка, струя жидкости внезапно меняет направление потока и искривляется, отклоняясь вниз вплоть до участка «распыления». Кривизна струи здесь согласуется с направлением силы тяжести. В следующих временных промежутках после некоторого участка течения в направлении силы тяжести, движение струи меняется на направленное против силы тяжести. Затем течение преобразуется в нисходящее, близкое к линейному. Изменение направления течения нельзя объяснить особенностями записи изображения. Форма течения, приведенная на каждой из фотографий, стабильна некоторый, но не одинаковый промежуток времени, причем процесс изменения происходит практически мгновенно. Необходимо отметить, что, согласно наблюдениям, резкие изменения направленности и формы струи происходили преимущественно после внезапного возникновения короткого участка более яркого свечения.

На рис. 5 показаны изображения микроструй этанола, истекающих из сопел разного диаметра. Параметры течений указаны в табл. 2. На рис. 5, а в левом нижнем углу указан масштабирующий отрезок длиной 20 мм. При этом на данном рисунке все фотографии приведены в одинаковом масштабе.

Степень перегрева по давлению «холодного» этанола (табл. 2) для рассматриваемых течений значительна и изменяется от 840 до 13000, но в процессе распада струй это обстоятельство практически не проявляется. Микроструи, истекающие из отверстий разного диаметра, при одинаковом перепаде давления, несмотря на различие в диаметрах, не имеют существенных различий в форме. Микроструи из отверстий с $d_a = 170$ мкм и $d_a = 290$ мкм имеют разрывы в течении струи, показанные в увеличенном размере на вставках слева на рис. 5, з, д соот-

ветственно. Расстояние от плоскости отверстия до первого разрыва для меньшего отверстия составляет $25d_a$, для большего – $8d_a$. Также следует отметить резкий поворот горизонтальной микроструи, истекающей из сопла с $d_a = 170$ мкм, в области первого разрыва к прямолинейному течению под углом $4\text{--}5^\circ$ вверх против силы тяжести. Разрывы можно интерпретировать как всплывающее кипение [12].

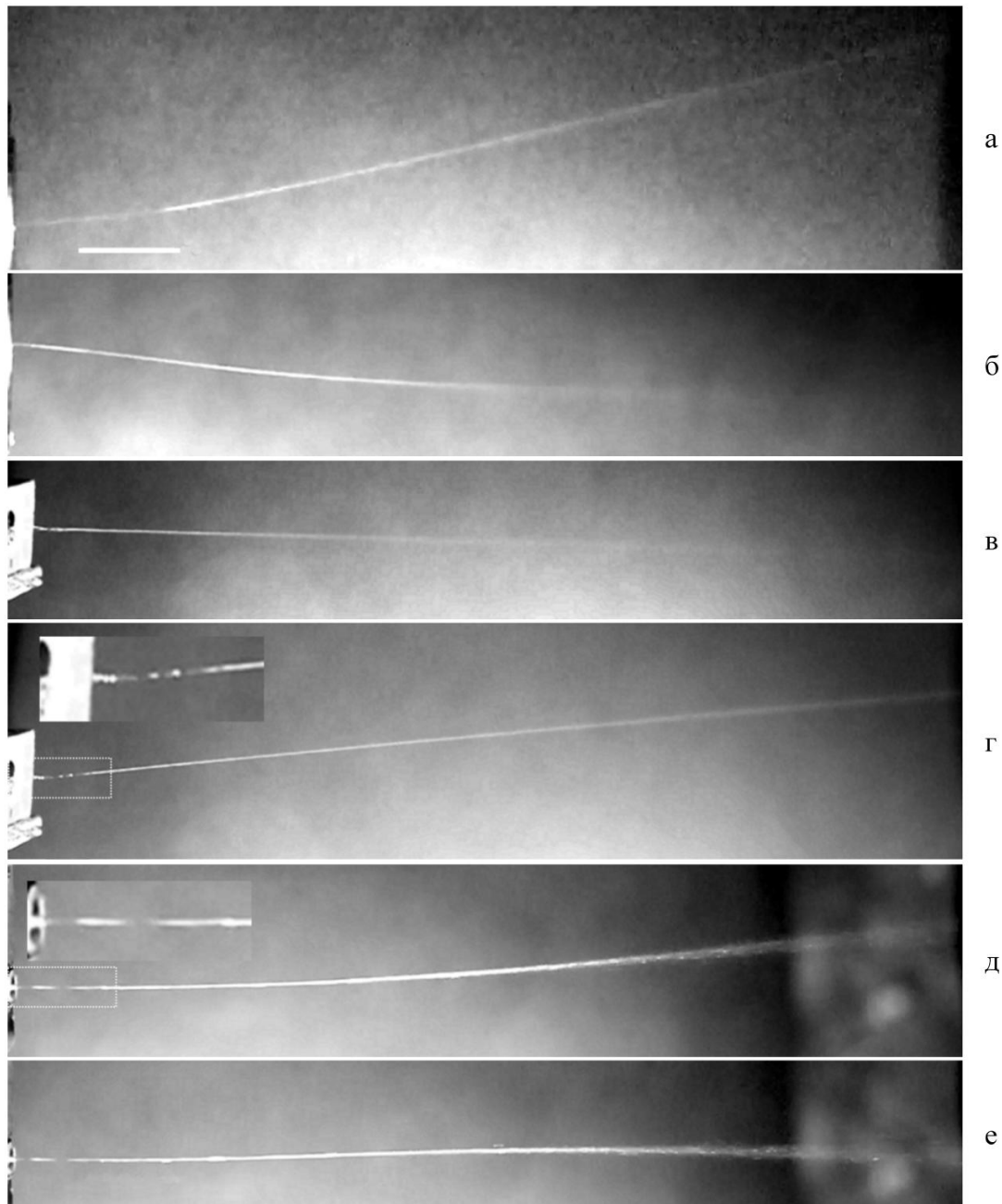


Рис. 5. Влияние сечения сопла на формирование горизонтальных микроструй
а, б – $d_a = 120$ мкм; в, г – 170 мкм; д, е – 290 мкм. Перепад давления $\Delta P_0 = 100$ кПа

Fig. 5. Influence of nozzle cross-section on the formation of horizontal micro-jets
а, б – $d_a = 120$ μm; в, г – 170 μm; д, е – 290 μm. Pressure drop $\Delta P_0 = 100$ kPa

Параметры истечения микроструй на рисунке 5

Таблица 2

Table 2

Parameters outflow of the micro-jet in Figure 5

Рис. 5	$T_{\text{сопла}},$ К	$P_b,$ Па	$P_s,$ кПа	$T_s,$ К	N_s	$T_0 - T_s (\varepsilon_L),$ К
а	294	1,2	6,1	197	5100	97 (33 %)
б	294	1,2	6,1	197	5100	97 (33 %)
в	300	0,67	8,7	193	13000	107 (36 %)
г	300	0,67	8,7	193	13000	107 (36 %)
д	299	7,7	8,2	213	1100	86 (29 %)
е	295	7,7	6,5	213	840	82 (28 %)

Можно предположить, что наблюдаемые изменения формы микроструй обусловлены интенсивным испарением с поверхности струи перегретого этанола и реактивным действием образующегося пара. Для объяснения наблюдаемых форм можно привлечь модель барокапиллярной неустойчивости течений, описанную в [13; 32]. В рамках этой модели следует предположить, что разрушение течения вызвано испарением перегретой жидкости преимущественно из углублений на поверхности, возникающих вследствие капиллярной неустойчивости. Появление углублений увеличивает тепловой поток к углублению, вызывает рост испарения с его поверхности и увеличивает реактивное воздействие пара на поверхность, ускоряя развитие углубления. Струя пара из образовавшегося углубления или цепочки углублений реактивным воздействием на поверхность тонкой струи изменяет направление ее течения (рис. 4, б; 5). Возможно схлопывание поверхностных каверн перегретого потока реактивным действием на их поверхность испарившейся жидкости. Интенсивное накопление насыщенного пара в образовавшихся паровых пузырьках может привести к увеличению диаметра струи (рис. 4, а) и последующему взрывному разбрызгиванию образовавшегося вздутия. С понижением перепада давления струя этанола укорачивается, растет ее неустойчивость, микроструя переходит в стадию распыления на меньшем удалении от сопла. Возможна ориентация струи вверх, в сторону и вниз. Кривизна струйного течения не согласуется с гравитационным законом. На течение существенное влияние оказывает понижение температуры истекающей жидкости из-за испарения.

Заключение

Разработка и использование вакуумных установок для моделирования истечения потоков жидкости из сопел и каналов с целью изучения формирования газожидкостных струйных течений модельных жидкостей в разреженных атмосферах различного состава актуальны при создании двигателей и струйных систем различного назначения объектов космической техники. Результаты настоящей работы демонстрируют возможность изучения сложных процессов истечения микроструй жидкостей в вакуум или затопленное пространство с заданной разреженной атмосферой на компактной вакуумной установке НГУ.

В измерениях при длительном истечении микроструй жидкости в вакуум (сильно разреженную среду) обнаружены отличия в процессах истечения как из отверстия, так и из длинного капилляра по сравнению с имеющимися в литературе результатами. Прежде всего, это крайняя неустойчивость форм течения, относительно стабильных при измерениях за очень короткие промежутки времени (импульсные режимы течения). Сопоставление течений этанола в атмосфере и вакууме показывает, что микроструи жидкости в вакууме из-за перехода

жидкости в метастабильное состояние обладают высокой интенсивностью поверхностной неустойчивости. Микроструи этанола в вакууме в исследованных стационарных режимах, как правило, характеризуются высокой изменчивостью размеров и форм, наблюдаемых при истечении. Микроструи при неизменных режимных параметрах: температуре жидкости, перепаде давления на сопле, давлении в камере расширения – подвергаются изгибным деформациям, отклонению от прямолинейного течения, изменению линейных размеров и самопроизвольному распаду.

При истечении этанола из длинного капилляра в вакуум вдоль силы тяжести образуются разрушенные с поверхности, слабо расходящиеся, короткие, криволинейные микроструи. Микроструи этого типа нестабильны во времени и изменяются случайным образом по размеру и направлению. Наличие в струе гетерогенных центров зародышеобразования способствует «взрывному» вскипанию микроструи вниз по потоку с образованием конусообразного парожидкостного потока с углами раскрытия до 60° , зависящими от перепада давления на сопле. Появление кавитационных пузырьков на срезе капилляра порождает парожидкостную струю, распространяющуюся по всем направлениям от центра выходного отверстия.

Вблизи выходного отверстия капилляра, из которого вытекает парожидкостная струя, генерируются капли, быстро увеличивающиеся в объеме. Капли в процессе роста поднимаются по капилляру обратным парожидкостным потоком до момента разрушения и сброса с капилляра разбрызгиванием.

Горизонтальные микроструи этанола, истекающие из отверстия в тонкой стенке, обладают более значительными потенциями к изменению формы. Вскипание или разбрызгивание струи, а также внезапное изменение направления течения происходят, как правило, после возникновения особенностей, характеризующихся более ярким отраженным светом и изменением локальной геометрии струи в точке бифуркации. Парообразование, а также расширение парожидкостной фазы носит спонтанный характер.

Наблюдаемые в экспериментах перегревы этанола существенно меньше оценки максимального перегрева 290–300 К для перехода этанола в область состояний гомогенного зародышеобразования. При малых степенях перегрева разрушение струи, по-видимому, определяется преимущественно поверхностной неустойчивостью в условиях интенсивного испарения с поверхности микроструи. В этих условиях микроструи этанола относительно стабильны и имеют достаточно протяженный устойчивый участок даже при малых перепадах давления. Реактивное действие пара на поверхность микроструи формирует ее криволинейную форму. Предполагается, что разрушение микроструи обусловлено, в основном, наложением двух явлений: капиллярной неустойчивости и интенсивного испарения перегретого этанола с поверхности микроструи.

Исходя из полученных фотографий, можно предположить, что при малом перепаде давления на выходе из источника локальные нарушения поверхности микроструи, вызванные капиллярной неустойчивостью и интенсивным испарением, образуют поверхностные газовые каверны. Каверны играют роль объемных центров зародышеобразования. Интенсивное парообразование в образовавшихся центрах завершается взрывным разрушением микроструи с выбросом в точке образования парожидкостных пузырьков и капель жидкости, что приводит к разнообразным изменениям структуры струи.

Список литературы

1. **Nieto-Peroy C., Emami M. R.** CubeSat mission: from design to operation. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 3110. DOI 10.3390/app9153110
2. **Heidt H., Puig-Suari J., Moore A., Nakasuka S., Twiggs R.** CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Aug. 21–24, 2000, SSC00-V-5.

3. **Fonda-Marsland E., Roberts G., Gibbon D., Ryan C.** Development of a low-cost 0.1N high test peroxide thruster using additive manufacturing. In: AIAA 2019-4227, AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, August 2019. DOI 10.2514/6.2019-4227
4. **Ryan C. N., Fonda-Marsland E., Roberts G. T., Lear A., Fletcher E., Giles L., Palmer M. J., Gibbon D.** Experimental validation of a 1-Newton Hydrogen Peroxide Thruster. *J. Propulsion and Power*, 2020, vol. 36, pp. 158–166.
5. **Ma W., Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zhang L., Shi R., Sheng J., Liu B., Wu Z.** Research Progresses of flash evaporation in aerospace applications. *Internat. J. Aerospace Eng.*, 2018, vol. 2018, 3686802, pp. 1–15. DOI 10.1155/2018/3686802
6. **Papale W. G., Roy R. J.** A water-based propulsion system for advanced spacecraft. In: Collection of Technical Papers – Space 2006 Conference, 2006, vol. 1, pp. 426–438.
7. **Joslyn T., Ketsdever A.** Constant Momentum Exchange Between Microspacecraft Using Liquid Droplet Thrusters, AIAA 2010-6966. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2010 (Nashville, TN), 2012. DOI 10.2514/6.2010-6966
8. **Корольков А. В., Сапожников В. Б.** Некоторые задачи прикладной промышленной математики в инженерном обеспечении космических полетов // Обзорные прикладной и промышленной математики. 2016. Т. 23. С. 363–366.
9. **Раубе С. С., Красночуб Е. К., Бронштейн В. М.** Струйная модель теплообмена рабочих тел (теплоносителей) и расчет основных параметров капельных холодильников перспективных космических аппаратов // Вестник Самар. гос. аэрокосмического ун-та. 2010. № 2. С. 50–61.
10. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.
11. **Fuchs H., Legge H.** Flow of a water jet into vacuum. *Acta Astronautica*, 1979, vol. 6, pp. 1213–1226. DOI 10.1016/0094-5765(79)90066-3
12. **Lienhard J. H., Day J. B.** The breakup of superheated liquid jets. *ASME. J. Basic Eng.*, September 1970, vol. 92, pp. 515–521. DOI 10.1115/1.3425051
13. **Скрипов В. П.** Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
14. **Kurschat T. H., Chaves H., Meier G. E. A.** Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets, *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 236, p. 43. DOI 10.1017/S0022112092001332
15. **Simões-Moreira J. R., Angelo E., Vieira M. M.** Highly expanded flashing liquid jets. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2002, vol. 16, pp. 415–424. DOI 10.2514/2.6695
16. **Vieira M. M., Simões-Moreira J. R.** Low-pressure flashing mechanisms in iso-octane liquid jets. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 572, pp. 121–144. DOI 10.1017/S0022112006003430
17. **Lu X. X., Li L., Luo K. H., Ren X. B., Liu Y., Yan X. F.** Investigation on the dispersal characteristics of liquid breakup in vacuum. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2015, vol. 30, pp. 1–8. DOI 10.2514/1.T4665
18. **Du W.-F., Li K., Wang Sh.-F., Zhao J.-F.** Flashing liquid jets in low-pressure environment. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, vol. 1, pp. 173–180. DOI 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2013007173
19. **Orme M., Muntz E. P., Legge H., Koppenwallner G.** Cavitation of liquid streams in a vacuum. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 1988, vol. 2, pp. 274–276. DOI 10.2514/3.97
20. **Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н.** Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 1. Истечение струй в вакуум // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13, вып. 1. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/295>
21. **Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н.** Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 2. Истечение в затопленное пространство // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13, вып. 2. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-2/articles/315>
22. **Приходько В. Г., Чекмарёв С. Ф., Ярыгин В. Н., Ярыгин И. В.** Сверхзвуковое истечение газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости: эффект подъема пленки

- по наружной поверхности сопла против сил тяжести // Доклады РАН. 2004. Т. 39, № 5. С. 618–620.
23. **Yarygin V. N., Prikhodko V. G., Yarygin I. V., Vyazov Yu. N.** Effect of physical properties of liquid on the outflow of the wall liquid film with the co-current gas flow from the nozzle into vacuum. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 651–653. DOI 10.1134/S0869864315050145
 24. **Yarygin V. N., Prikhodko V. G., Yarygin I. V., Gerasimov Yu. I., Krylov A. N., Skorovarov A. Yu.** Near-wall liquid film flows for space applications. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, 012079. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012079
 25. **Prikhodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Experimental study of droplet detachment from liquid film surface by a co-current flow inside the nozzle stagnation chamber. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012148. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012148
 26. **Prikhodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Control of droplet phase angular distribution under near-wall liquid film ejection with co-current gas flow from the supersonic nozzle into a vacuum. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012149. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012149
 27. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhnikov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-Temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, vol. 45, no. 5, pp. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
 28. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovnikov K. A., Khudozhnikov V. E.** Features of formation of a fluid flow flowing into a highly rarefied medium through a capillary. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012158. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012158
 29. **Стабников В. Н., Ройтер И. М., Процюк Т. Б.** Этанол. М., 1976. 272 с.
 30. **Дымент О. Н., Казанский К. С., Мирошников А. М.** Гликоли и другие производные окиси этилена и пропилена / Общ. ред. О. Н. Дымент. М.: Химия, 1976. 373 с.
 31. **Альтшуль А. Д.** Гидравлическое сопротивление. 2-е изд. М., 1982. 224 с.
 32. **Павлов П. А., Исаев О. А.** Барокапиллярная неустойчивость поверхности свободной струи перегретой жидкости // ТБТ. 1984. Т. 22, вып. 4. С. 745–752.

References

1. **Nieto-Peroy C., Emami M. R.** CubeSat mission: from design to operation. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 3110. DOI 10.3390/app9153110
2. **Heidt H., Puig-Suari J., Moore A., Nakasuka S., Twiggs R.** CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: AIAA/USU Conference on Small Satellites, Aug. 21–24, 2000, SSC00-V-5.
3. **Fonda-Marsland E., Roberts G., Gibbon D., Ryan C.** Development of a low-cost 0.1N high test peroxide thruster using additive manufacturing. In: AIAA 2019-4227, AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, August 2019. DOI 10.2514/6.2019-4227
4. **Ryan C. N., Fonda-Marsland E., Roberts G. T., Lear A., Fletcher E., Giles L., Palmer M. J., Gibbon D.** Experimental validation of a 1-Newton Hydrogen Peroxide Thruster. *J. Propulsion and Power*, 2020, vol. 36, pp. 158–166.
5. **Ma W., Zhai S., Zhang P., Xian Y., Zhang L., Shi R., Sheng J., Liu B., Wu Z.** Research Progresses of flash evaporation in aerospace applications. *Internat. J. Aerospace Eng.*, 2018, vol. 2018, 3686802, pp. 1–15. DOI 10.1155/2018/3686802
6. **Papale W. G., Roy R. J.** A water-based propulsion system for advanced spacecraft. In: Collection of Technical Papers – Space 2006 Conference, 2006, vol. 1, pp. 426–438.
7. **Joslyn T., Ketsdever A.** Constant Momentum Exchange Between Microspacecraft Using Liquid Droplet Thrusters, AIAA 2010-6966. In: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 2010 (Nashville, TN), 2012. DOI 10.2514/6.2010-6966

8. **Korolkov A. V., Sapozhnikov V. B.** Some problems of applied industrial mathematics in spaceflight engineering. *Rev. Applied Industr. Math.*, 2016, vol. 23, pp. 363–366. (in Russ.)
9. **Raube S. S., Krasnochub E. K., Bronstein V. M.** Jet model of working body (coolant) heat exchange and calculation of basic parameters of drop refrigerators for advanced spacecraft. *Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2010, no. 2, pp. 50–61. (in Russ.)
10. **Levich V. G.** Physico-chemical hydrodynamics. Moscow, Fizmatgiz, 1959, 700 p. (in Russ.)
11. **Fuchs H., Legge H.** Flow of a water jet into vacuum. *Acta Astronautica*, 1979, vol. 6, pp. 1213–1226. DOI 10.1016/0094-5765(79)90066-3
12. **Lienhard J. H., Day J. B.** The breakup of superheated liquid jets. *ASME. J. Basic Eng.*, September 1970, vol. 92, pp. 515–521. DOI 10.1115/1.3425051
13. **Skripov V. P.** Metastable Liquid. Moscow, Nauka, 1972, 312 p. (in Russ.)
14. **Kurschat T. H., Chaves H., Meier G. E. A.** Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets, *J. Fluid Mech.*, 1992, vol. 236, p. 43. DOI 10.1017/S0022112092001332
15. **Simões-Moreira J. R., Angelo E., Vieira M. M.** Highly expanded flashing liquid jets. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2002, vol. 16, pp. 415–424. DOI 10.2514/2.6695
16. **Vieira M. M., Simões-Moreira J. R.** Low-pressure flashing mechanisms in iso-octane liquid jets. *J. Fluid Mech.*, 2007, vol. 572, pp. 121–144. DOI 10.1017/S0022112006003430
17. **Lu X. X., Li L., Luo K. H., Ren X. B., Liu Y., Yan X. F.** Investigation on the dispersal characteristics of liquid breakup in vacuum. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2015, vol. 30, pp. 1–8. DOI 10.2514/1.T4665
18. **Du W.-F., Li K., Wang Sh.-F., Zhao J.-F.** Flashing liquid jets in low-pressure environment. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, vol. 1, pp. 173–180. DOI 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2013007173
19. **Orme M., Muntz E. P., Legge H., Koppenwallner G.** Cavitation of liquid streams in a vacuum. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 1988, vol. 2, pp. 274–276. DOI 10.2514/3.97
20. **Gerasimov Yu. I., Yarygin V. N.** Flow of ideal and real gas jets from axisymmetric nozzles. Issues of Similarity 1. Flow of Jets in Vacuum. *Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2012, vol. 13, iss. 1. (in Russ.) URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-1/articles/295>
21. **Gerasimov Yu. I., Yarygin V. N.** Flow of ideal and real gas jets from axisymmetric nozzles. Issues of Similarity 2. Outflow into a Flooded Space. *Physical and Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2012, vol. 13, iss. 2. (in Russ.) URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-2/articles/315>
22. **Prihodko V. G., Chekmaryov S. F., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Supersonic gas outflow from a nozzle into vacuum with a liquid wall film: effect of film lifting on the outer surface of the nozzle against gravity. *Doklady RAN*, 2004, vol. 39, no. 5, pp. 618–620. (in Russ.)
23. **Yarygin V. N., Prihodko V. G., Yarygin I. V., Vyazov Yu. N.** Effect of physical properties of liquid on the outflow of the wall liquid film with the co-current gas flow from the nozzle into vacuum. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 651–653. DOI 10.1134/S0869864315050145
24. **Yarygin V. N., Prihodko V. G., Yarygin I. V., Gerasimov Yu. I., Krylov A. N., Skorovarov A. Yu.** Near-wall liquid film flows for space applications. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, 012079. DOI 10.1088/1742-6596/1105/1/012079
25. **Prihodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Experimental study of droplet detachment from liquid film surface by a co-current flow inside the nozzle stagnation chamber. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012148. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012148
26. **Prihodko V. G., Yarygin V. N., Yarygin I. V.** Control of droplet phase angular distribution under near-wall liquid film ejection with co-current gas flow from the supersonic nozzle into a vacuum. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012149. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012149
27. **Zarvin A. E., Kalyada V. V., Madirbaev V. Zh., Korobeishchikov N. G., Khodakov M. D., Yaskin A. S., Khudozhnikov V. E., Gimelshein S. F.** Condensable supersonic jet facility for

- analyses of transient low-Temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, vol. 45, no. 5, pp. 819–827. DOI 10.1109/TPS.2017.2682901
28. **Yaskin A. S., Zarvin A. E., Kalyada V. V., Dubrovin K. A., Khudozhnikov V. E.** Features of formation of a fluid flow flowing into a highly rarefied medium through a capillary. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 1677, 012158. DOI 10.1088/1742-6596/1677/1/012158
29. **Stabnikov V. N., Reuter I. M., Protsyuk T. B.** Ethanol. Moscow, 1976, 272 p. (in Russ.)
30. **Dyment O. N., Kazanskii K. S., Miroshnikov A. M.** Glycols and other derivatives of ethylene and propylene oxides. Ed. by O. N. Dyment. Moscow, Chemistry, 1976, 373 p. (in Russ.)
31. **Altschul A. D.** Hydraulic resistance. 2nd ed. Moscow, 1982, 224 p. (in Russ.)
32. **Pavlov P. A., Isaev O. A.** Barocapillary instability of free stream surface of superheated liquid. *TVT*, 1984, vol. 22, iss. 4, pp. 745–752. (in Russ.)

Информация об авторах

Александр Сергеевич Яскин, кандидат технических наук
Александр Евгеньевич Зарвин, кандидат физико-математических наук
Валерий Владимирович Каляда, ведущий электроник
Кирилл Алексеевич Дубровин, аспирант
Виталий Эдуардович Художитков, аспирант

Information about the Authors

Alexander S. Yaskin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)
Alexandr E. Zarvin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)
Valery V. Kalyada, Senior Electronics Engineer
Kirill A. Dubrovin, PhD Student
Vitaly E. Khudozhnikov, PhD Student

*Статья поступила в редакцию 17.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 01.12.2021
The article was submitted 17.05.2021;
approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 01.12.2021*

Научная статья

УДК 621.373.826

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Оптимизация параметров лазерной наплавки порошка на основе системы никель-алюминий

Михаил Александрович Гулов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

gulovy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2648-6451>

Аннотация

Произведена оптимизация параметров лазерной наплавки для получения качественного единичного трека. В качестве материала наплавки был использован порошок алюминид никеля (Ni_3Al) – ПН85Ю15. В ходе работы было получено 60 образцов, наплавленных при различных параметрах мощности, скорости сканирования, положения фокуса лазерного луча относительно поверхности порошкового слоя. Были измерены геометрические характеристики полученных единичных треков. Обнаружено, что размеры единичных треков уменьшаются с ростом скорости. Повышение мощности лазерного излучения приводит к увеличению ширины и высоты единичного трека, а также к увеличению глубины проплавления подложки. Исследована зависимость геометрических характеристик единичных треков от температуры ванны расплава. Также в работе была измерена микротвердость полученных образцов, найдена зависимость микротвердости образцов от скорости сканирования. Обнаружено, что микротвердость полученных образцов коррелирует с количеством энергии, сообщенной порошковому слою и температурой ванны расплава. Установлено, что совокупность экспериментальных данных описывается в обобщенных пространственных и энергетических координатах линейной зависимостью.

Ключевые слова

лазерная наплавка, селективное лазерное сплавление, ванна расплава, единичный трек, никелид алюминия, ПН85Ю15

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121030900259-0

Для цитирования

Гулов М. А. Оптимизация параметров лазерной наплавки порошка на основе системы никель-алюминий // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 65–77. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Optimization of Parameters of Laser Cladding of the Powder Based on Nickel-Aluminium System

Mikhail A. Gulov

Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

gulovy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2648-6451>

Abstract

In this work, the parameters of laser cladding were optimized to obtain a high-quality single track. Nickel aluminide powder (Ni_3Al) – PN85Yu15 was used as the surfacing material. 60 samples were obtained, deposited at various pa-

© Гулов М. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 65–77
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 65–77

rameters of power, scanning speed, position of the focus of the laser beam relative to the surface of the powder layer. The geometric characteristics of the obtained single tracks were measured, graphs of their dependence on the scanning speed were plotted. It was found that the sizes of single tracks decrease with increasing speed. An increase in the power of laser radiation leads to an increase in width and height of the track, as well as the depth of penetration of the substrate. The dependence of the geometric characteristics of the tracks on the temperature of the melting pool has been investigated. The microhardness of the obtained samples was also measured, and a weakly expressed dependence of the microhardness on the laser scanning speed was found. It was found that the microhardness of the obtained samples correlates with the amount of energy imparted to the powder layer and the temperature of the melting pool. It was also found that the set of experimental data is described in generalized spatial and energy coordinates by a linear dependence.

Keywords

laser cladding, selective laser melting, single track, aluminum nickeline, PN85Yu15

Funding

The work was carried out within the state task № 121030900259-0

For citation

Gulov M. A. Optimization of Parameters of Laser Cladding of the Powder Based on Nickel-Aluminium System. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 65–77. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-65-77

Введение

В настоящее время аддитивные технологии интенсивно развиваются из-за их уникальных возможностей по послойному изготовлению функциональных изделий и покрытий из различных металлов и сплавов. Аддитивные технологии получили широкое распространение во многих областях производства, таких как автомобилестроение, медицина, аэрокосмическая промышленность [1–3].

Формирование ванны расплава – это базовый, первичный этап аддитивного производства. Трек, остающийся после остывания ванны расплава, является элементарным строительным элементом детали, изготавливаемой с помощью послойной лазерной наплавки. Именно поэтому подбор оптимальных параметров наплавки единичного трека, изучение процессов его формирования и его структуры имеет решающее значение в наплавке многослойных объектов и позволяет прогнозировать качество деталей, выращенных из множества слоев.

Традиционный подход к изучению влияния различных параметров процесса аддитивного производства заключается в изучении готовой детали, состоящей из множества слоев. Помимо значительного времени производства таких деталей и его стоимости, наиболее важным ограничением этого метода является то, что исходная форма ванны расплава и начальное состояние затвердевшей структуры в реальном процессе аддитивного производства скрываются последующими проходами, которые частично переплавляют нижележащий слой. Таким образом, эксперименты по наплавке единичных треков, основанные на исследованиях других подобных процессов, таких как лазерная сварка, в работах [4; 5] используются в качестве замены в некоторых исследованиях, направленных на более глубокое понимание процесса формирования ванны расплава и единичного трека. Аналогичные тенденции в характеристиках ванны расплава единичного трека, наплавленного слоя и многослойной наплавки жаропрочного сплава на никелевой основе с использованием технологии SLM исследованы в работе [6]. Это показывает, что эксперименты с единичным треком являются полезным экспериментальным инструментом для понимания влияния параметров процесса на формирование ванны расплава и для создания технологических карт обработки. Также изучалась изменчивость геометрии ванны расплава для никелевого сплава с одним слоем порошка. Морфология ванны расплава в поперечном сечении была связана с дефектами поверхностной пористости и внутренней пористостью, но информация о корреляции между параметрами процесса и характеристиками ванны расплава не была представлена [7]. В работе [8] были проведены эксперименты по наплавке одиночных треков для изучения влияния параметров лазера на геометрию ванны расплава и морфологию поверхности технически чистого титана и Ti-6Al-4V. Результаты показывают, что форма и свойства ванны расплава существенно от-

личаются в зависимости от параметров лазера. Подводя итог, можно сказать, что более подробные и систематические исследования образования ванны расплава в процессе SLM, а именно влияние параметров процесса на формирования единичных треков, продолжаются.

Перспективным материалом для использования в авиастроении является сплав на основе интерметаллида Ni_3Al . Высокая прочность, стойкость к окислению, термическая стабильность позволяют использовать сплавы на основе алюминидов никеля при изготовлении тяжело нагруженных ответственных деталей газотурбинных двигателей авиационного и транспортного назначения, газотурбинных установок энергетического назначения [9–12]. Сплав Ni_3Al выпускается в виде порошка ПН85Ю15, состоящего из сферических гранул. Работы по лазерной наплавке этого порошка имеют единичный характер, в [13] порошок ПН85Ю15 наплавляли на кулачки распределительного вала автомобильного двигателя. Однако удовлетворительной структуры наплавленного слоя достичь не удалось из-за внутренних дефектов. Насколько известно авторам, систематического исследования зависимости характеристик наплавленного слоя от условий лазерной наплавки порошка ПН85Ю15 не проводилось.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния параметров обработки на характеристики единичных треков при лазерной наплавке порошка ПН85Ю15 и поиск условий обработки, позволяющих получить качественные треки.

Экспериментальное оборудование и методики

Наплавка единичных треков производилась в защитной атмосфере аргона на автоматизированном лазерном технологическом комплексе серии «Сибирь», включающем в себя CO_2 -лазер мощностью до 8 кВт [14; 15]. Фокусировка лазерного излучения проводилась с помощью ZnSe линзы с фокусным расстоянием 254 мм.

Фракционный состав порошка ПН85Ю15 составляет 20–63 мкм. Твердость гранул – от 270 до 320 НВ. Порошок наплавлялся на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с размерами $50 \times 50 \times 5$ мм. Толщина наносимого слоя порошка составляла 400 мкм. Химический состав порошка ПН85Ю15 (значения даны в мас.%): Ni – 85–87; Al – 12–15; Fe – 0,2; C – 0,07.

Геометрические характеристики единичных треков измерялись на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 3000.

Микротвердость единичных треков была измерена по методу Виккерса при нагрузке 300 г и экспозиции 5 с на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon1102.

В экспериментах варьировались мощность P лазерного излучения, скорость V сканирования, положение Δf фокуса лазерного луча относительно поверхности порошкового насыпного слоя.

Наплавка единичных треков давно используется для нахождения оптимальных параметров лазерной наплавки, из-за чего понимание того, какие требования нужно предъявлять к валикам, уже сформировано. Было выбрано 4 наиболее важных критерия качества единичного трека [16–18]:

- 1) отсутствие пор, трещин;
- 2) уменьшение перемешивания металла основы и металла наплавки [17];
- 3) минимальная глубина проплава основы [17];
- 4) коэффициент формы валика (отношение высоты трека H к его ширине W) должен быть не более 0,3–0,5, что позволит обеспечить высокую адгезионную прочность межслойного сцепления при наплавке многослойных объектов [17].

Результаты и обсуждение

Было опробовано 60 режимов наплавки, в которых изменялись мощность лазерного излучения от 500 до 1500 Вт, скорость сканирования от 4 до 33 мм/с, положение фокуса лазерного луча относительно поверхности насыпного слоя от –15 до +15 мм.

Для подготовки образцов к исследованию на микроскопе были сделаны шлифы поперечных срезов подложек с наплавленными единичными треками (рис. 1, 2). С использованием программного обеспечения микроскопа Olympus LEXT 3000 измерены геометрические характеристики единичных треков (ширина, высота, глубина).

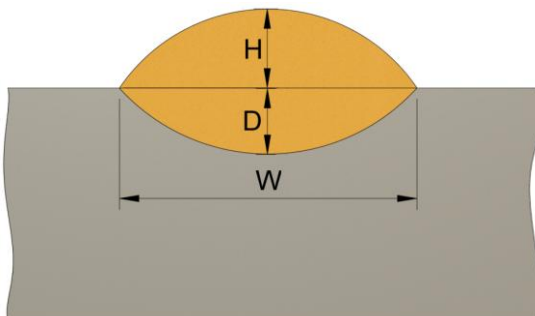


Рис. 1. Схематичное изображение поперечного сечения единичного трека:

H – высота трека; D – глубина трека; W – ширина трека

Fig. 1. Schematic cross-sectional representation of a single track:

H – track height, D – track depth, W – track width



Рис. 2. Фотография шлифа поперечного сечения единичного трека

Fig. 2. Photo of the cross-section cut of the single track

На рис. 3 представлены зависимости геометрических характеристик единичных треков от скорости сканирования. Каждая линия на графике соответствует собственному параметру положения фокуса относительно порошкового слоя.

При повышении скорости сканирования геометрические размеры единичных треков уменьшаются, что связано с уменьшением количества сообщаемой порошковой смеси энергии, что приводит к снижению размеров ванны расплава. Также геометрические размеры увеличиваются при повышении мощности лазерного излучения (см. таблицу). Наглядно изменение размера единичного трека с ростом мощности показано на рис. 4, где приведены

фотографии единичных треков, полученных при мощности излучения 500, 1000, 1500 Вт и значением положения фокуса относительно поверхности порошкового слоя +10 мм.

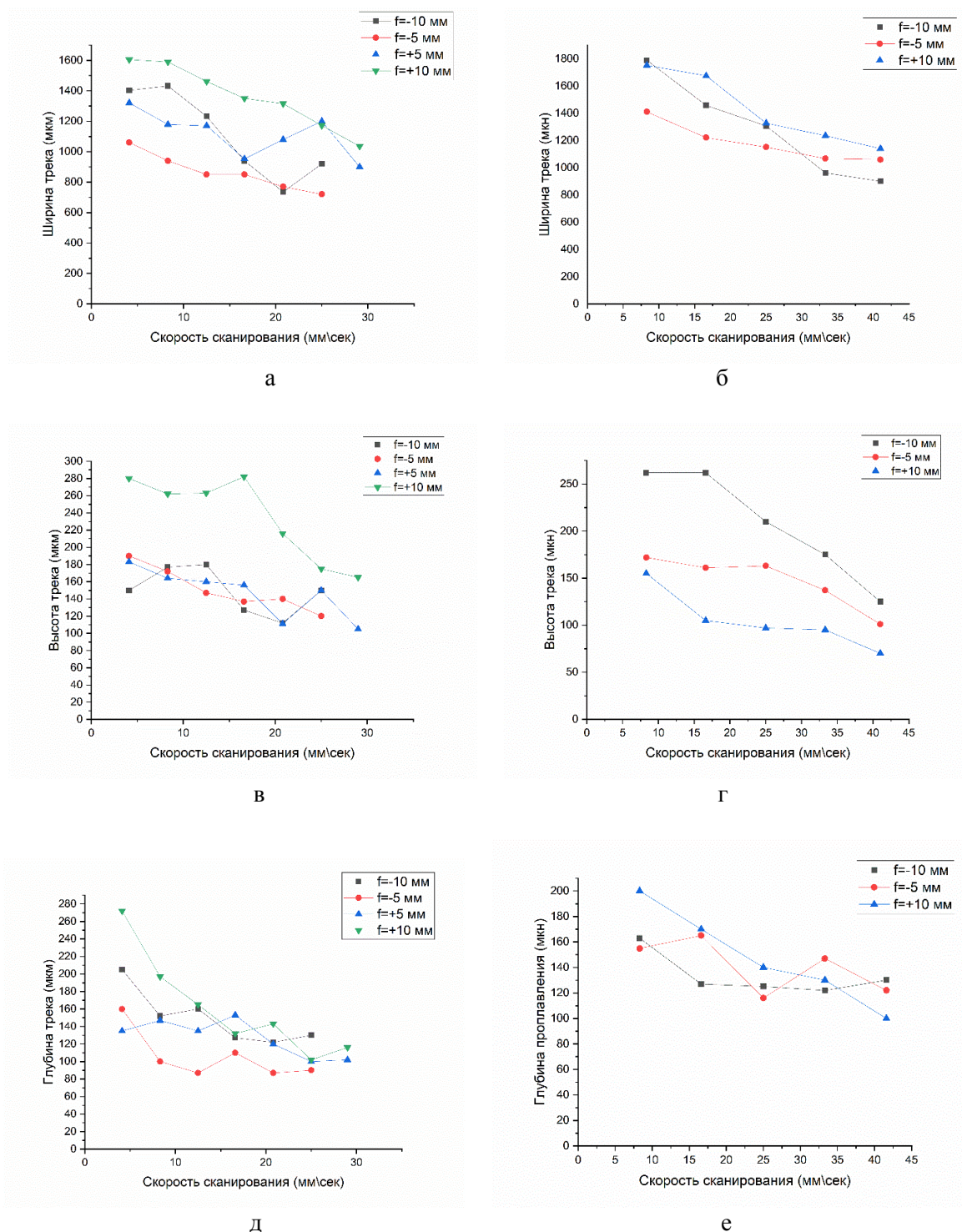


Рис. 3. Зависимость ширины (а, б), высоты (в, г) и глубины (д, е) единичных треков от скорости сканирования. Мощность излучения: а, в, д – 500 Вт; б, г, е – 1000 Вт

Fig. 3. Dependence of the width (a, b), height (c, d) and depth (e, f) of single tracks on the scanning speed. Laser power: a, c, e – 500 W; b, d, f – 1000 W

Геометрические размеры треков,
наплавленных при различных значениях мощности лазерного излучения
Geometrical dimensions of tracks
deposited at different values of laser radiation power

P , Вт	W , мкм	H , мкм	D , мкм
500	697	75	70
1000	1653	183	205
1500	1962	202	247

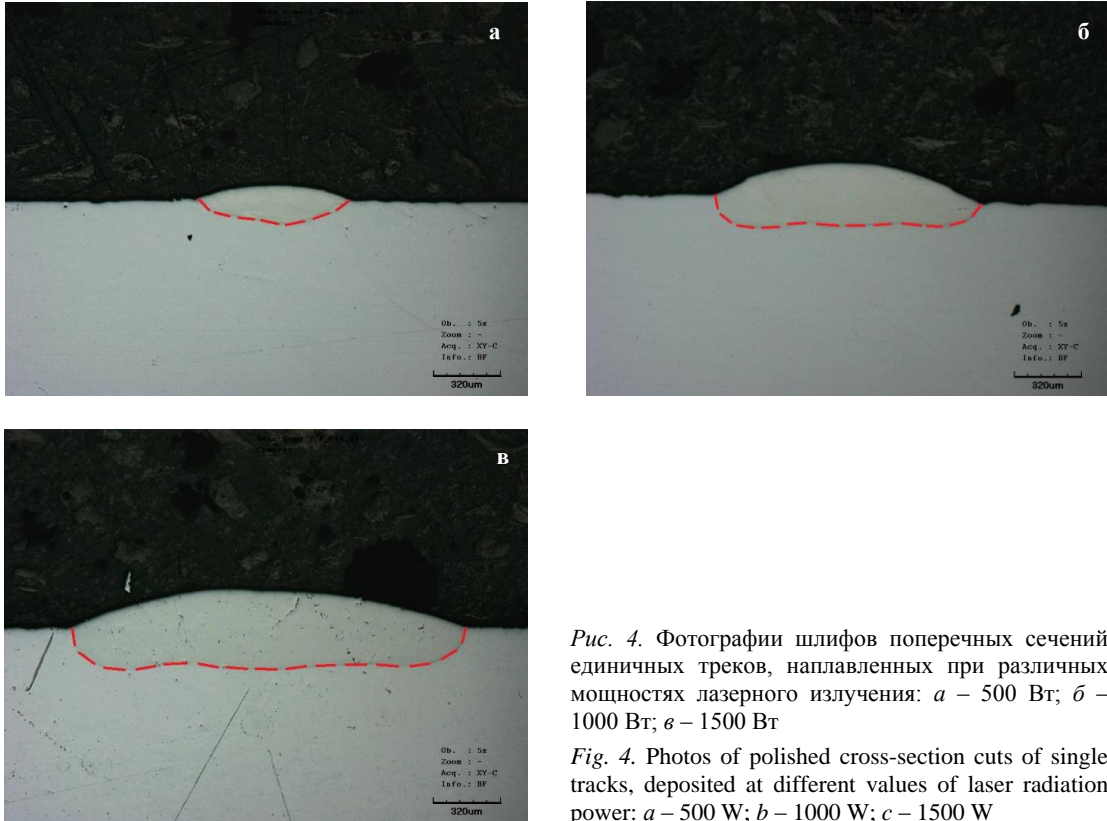


Рис. 4. Фотографии шлифов поперечных сечений единичных треков, наплавленных при различных мощностях лазерного излучения: а – 500 Вт; б – 1000 Вт; в – 1500 Вт

Fig. 4. Photos of polished cross-section cuts of single tracks, deposited at different values of laser radiation power: а – 500 W; б – 1000 W; в – 1500 W

Для более глубокого понимания процесса формирования единичного трека необходимо изучить процессы, происходящие в ванне расплава при лазерной наплавке. Для этого было решено исследовать зависимость геометрических параметров треков от температуры в зоне воздействия лазерного излучения. Удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела на его поверхности при нагреве его лазерным излучением (в центре облучаемой области в виде круга радиусом r_0 в момент окончания воздействия) [19; 20]:

$$T = \frac{2AP\sqrt{a\tau}}{\pi r_0^2 k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_0,$$

где A – коэффициент поглощения поверхности; P [Вт] – мощность излучения; r_0 – радиус пятна лазерного излучения на поверхности; τ – длительность воздействия: $\tau = \frac{2r_0}{V}$; a [м/с²] –

температуропроводность материала; k [Вт/(м·°C)] – теплопроводность материала; T_0 – начальная температура.

При слабом влиянии теплопроводности $\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} > 1$ функцией $ierfc \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}}$ можно пренебречь, а так как в разных сериях экспериментов большинство параметров не изменялось (кроме мощности лазерного излучения и скорости сканирования), то уравнение можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{P}{\sqrt{V}} \text{const} + \text{const}.$$

Таким образом, вместо параметра температуры можно использовать комбинационный параметр P/\sqrt{V} . Графики на рис. 5, а, б подтверждают предположение о росте геометрических размеров ванны расплава при повышении температуры в зоне наплавки. На рис. 5, в представлены зависимости коэффициентов формы полученных единичных треков от параметра P/\sqrt{V} . При определенных значениях параметра происходит рост коэффициента формы с его последующим убыванием. Стоит отметить то, как зависит коэффициент формы от параметра при значениях положения фокуса $f = +5, +10$ мм при мощности лазерного излучения 500 Вт.

Известно, что для таких процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, как резка, сварка и наплавка одним из определяющих безразмерных параметров является безразмерная энергия [18; 19; 21]. В литературе описано, что данный параметр может определять геометрические характеристики трека при наплавке металлического порошка. Был построен график зависимости безразмерной ширины трека W/D от обобщенного параметра энергии

$\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$, где d (мм) – диаметр лазерного луча на поверхности порошкового слоя [22] (рис. 6).

Также была проведена линейная аппроксимация полученных данных. Полученная линейная зависимость имеет вид $W/D = 1,08904 + 0,00605 \frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$.

Кроме того была исследована зависимость коэффициента формы единичного трека от энергетического параметра $\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$. Данные представлены на рис. 7. Можно заметить, что паттерны поведения линий на этих графиках и на графиках зависимости коэффициента формы от комбинационного параметра P/\sqrt{V} одинаковы, что экспериментально подтверждает зависимость температуры ванны расплава от сообщенной ей энергии.

Микротвердость

Была измерена микротвердость полученных образцов, построены графики зависимости микротвердости единичных треков от скорости сканирования при мощностях 500 и 1000 Вт (см. рис. 6, 7). Измеренная твердость подложки из стали 12Х18Н10Т составила 180 МПа. В зависимости от скорости микротвердость единичных треков колеблется от 220 до 300 МПа по Виккерсу. Такой диапазон значений может объясняться образованием менее твердых вторичных фаз, возникающих при расплаве порошковой смеси в процессе лазерной обработки.

Были исследованы зависимости микротвердости от количества энергии, сообщенной порошковому слою. На рис. 8, а, б построены графики зависимости микротвердости от скорости сканирования. Из них видно, что для разных мощностей лазерного излучения существу-

ют оптимальные значения скорости сканирования, при которых микротвердость полученных образцов максимальна вне зависимости от параметров фокусировки пучка.

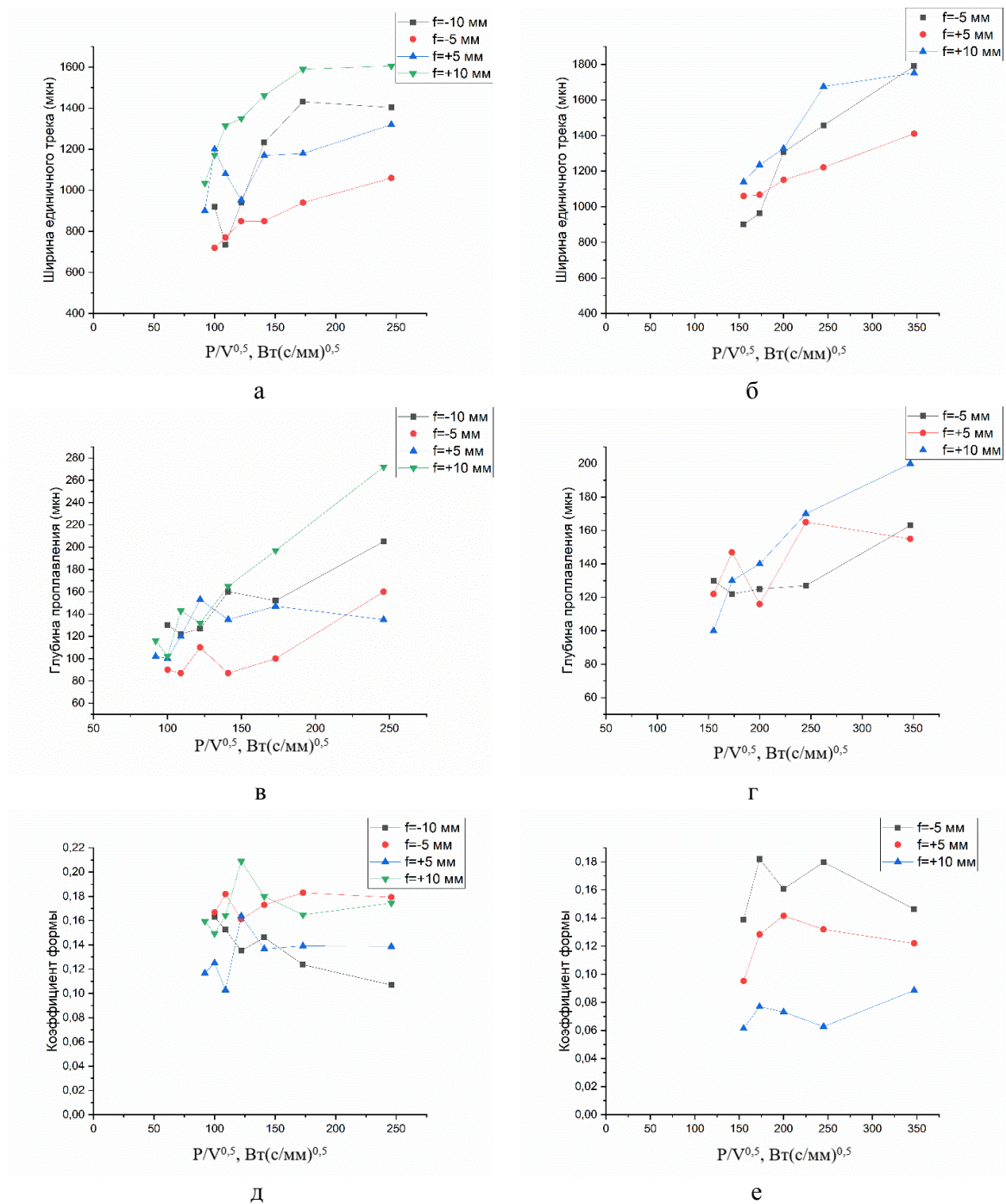


Рис. 5. Зависимость ширины единичного трека (а, б), глубины проплавления (в, г)

и коэффициента формы единичного трека (д, е) от параметра P/\sqrt{V}

Мощность лазерного излучения: а, в, д – 500 Вт; б, г, е – 1000 Вт

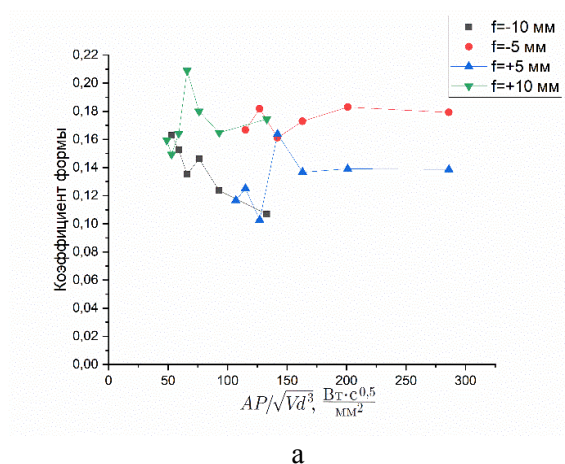
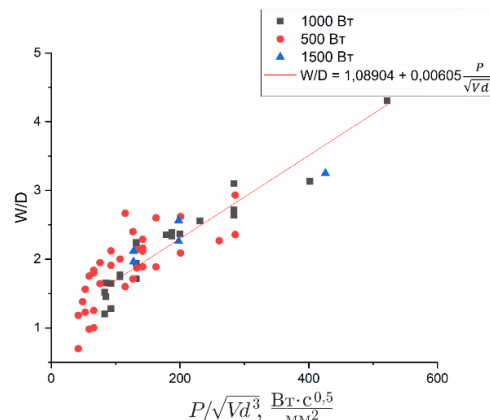
Fig. 5. Dependence of the width of a single track (a, b), substrate penetration depth (c, d)

and shape factor of a single track (e, f) on the P/\sqrt{V} parameter

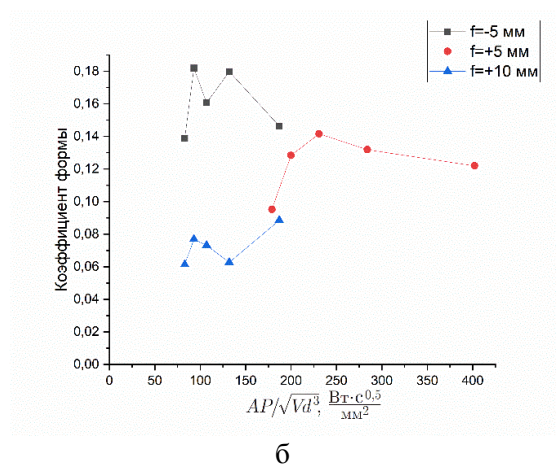
Laser power: a, c, e – 500 W; b, d, f – 1000 W

Рис. 6. Зависимость безразмерной ширины единичных треков от безразмерной энергии при мощности излучения 500, 1000 и 1500 Вт

Fig. 6. Dependence of the dimensionless width of single tracks on the generalized energy at radiation powers of 500, 1000, and 1500 W



а



б

Рис. 7. Зависимость коэффициента формы от обобщенной энергии. Мощность лазерного излучения: а – 500 Вт; б – 1000 Вт

Fig. 7. Dependence of the shape factor on the generalized energy. Laser power: а – 500 W; б – 1000 W

Итак, для мощности лазерного излучения 500 Вт оптимальная скорость сканирования находится в диапазоне 15–20 мм/с. Для мощности лазерного излучения 1000 Вт границы оптимальной скорости не столь очевидны, поэтому было решено исследовать зависимость микротвердости от энергетического параметра $\frac{P}{\sqrt{Vd^3}}$. Именно количество и плотность со-

общенной порошковому слою энергии определяют степень его расплава, глубину проплавления и температуру ванны расплава и, как следствие, количество образуемых в процессе наплавки вторичных фаз.

На рис. 8, в, г изображена зависимость микротвердости единичных треков от обобщенной энергии для мощности излучения 500, 1000 Вт. Отчетливо видны значения энергии, при которых микротвердость достигает максимального значения. Это может свидетельствовать о подборе оптимальных параметров лазерной обработки для данной толщины насыпного слоя. Также стоит обратить внимание на то, что зависимость микротвердости и зависимость коэффициента формы от сообщенной энергии, зависимость коэффициента формы от параметра P/\sqrt{V} имеют одинаковый вид, из чего можно сделать следующий вывод: увеличение количества сообщенной порошковому слою энергии приводит к созданию более широких

и низких треков с низкой микротвердостью. Снижение количества энергии, наоборот, приводит к созданию более узких и высоких валиков с большей твердостью. Это позволяет в зависимости выбора режимов наплавки либо создавать покрытия, либо выращивать объемные детали с заранее известными механическими свойствами.

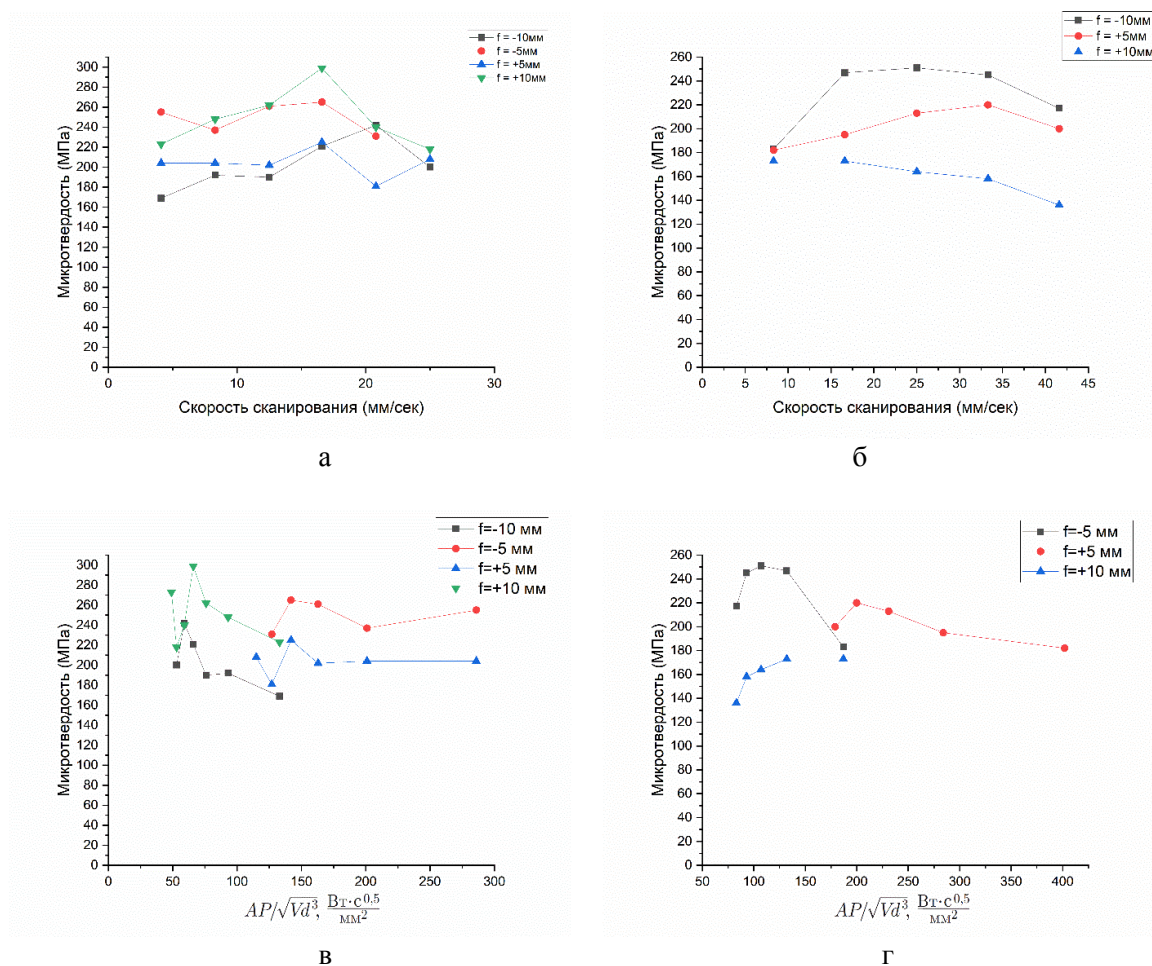


Рис. 8. Зависимость микротвердости единичных треков от скорости сканирования (а, б) и обобщенной энергии (в, г). Мощность излучения: а, в – 500 Вт; б, г – 1000 Вт

Fig. 8. Dependence of the microhardness of single tracks on the scanning speed (a, b) and generalized energy (c, d). Radiation power: a, c – 500 W; b, d – 1000 W

Таким образом, появляется возможность напрямую управлять свойствами многослойных наплавленных покрытий с помощью изменения количества энергии, сообщаемой порошкo-вому слою.

Выводы

В работе были проведены поиск и исследование оптимальных режимов лазерной наплавки порошка ПН85Ю15. Получены экспериментальные данные о зависимости геометрических характеристик треков от параметров лазерной наплавки.

Ширина, высота трека и глубина проплавления растут с ростом мощности и уменьшаются с ростом скорости.

Исследовано влияние температуры ванны расплава на геометрические характеристики единичных треков.

Исследована зависимость микротвердости полученных образцов от скорости сканирования и энергетических параметров.

Установлено, что совокупность экспериментальных данных описывается в обобщенных пространственных и энергетических координатах линейной зависимостью.

Список литературы

1. **Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R.** Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mater. Rev.*, 2012, no. 57, pp. 133–164. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000014
2. **Евгенов А. Г., Лукина Е. А., Королев В. А.** Особенности процесса селективного лазерного синтеза применительно к литейным сплавам на основе никеля и интерметаллида Ni_3Al // Новости материаловедения. Наука и Техника. 2016. № 5. С. 3–11.
3. **Dutta Majumdar J., Manna I.** Laser material processing. *Int. Mater. Rev.*, 2011, no. 56, pp. 341–388. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000003
4. **Fabbro R.** Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, no. 43. DOI 10.1088/0022-3727/43/44/445501
5. **Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E.** A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018. DOI 10.1155/2018/4920718
6. **Kumar P., Farah J.** Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Mater. Lett.*, 2019, no. 252, pp. 256–259.
7. **Scime L., Beuth J.** Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.*, 2019, no. 29, p. 100830. DOI 10.1016/j.addma.2019.100830
8. **Kusuma C., Ahmed S. H., Mian A., Srinivasan R.** Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti). *J. Mater. Eng. Perform.*, 2017, no. 26, pp. 3560–3568. DOI 10.1007/s11665-017-2768-6
9. **Каблов Е. Н., Бунтушкин В. П., Поварова К. Б., Базылева О. А., Морозова Г. И., Казанская Н. К.** Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // Металлы. 1999. № 1.
10. **Каблов Е. Н., Ломберг Б. С., Бунтушкин В. П., Голубовский Е. Р., Мубояджян С. А.** Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al – перспективный материал для лопаток турбин // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7.
11. **Kumar K. G., Anand T. J. S.** A Novel Intermetallic Nickel Aluminide (Ni_3Al) as an Alternative Automotive Body Material. *Int. J. Eng. Technol.*, 2011, pp. 274–282.
12. **Гринберг Б., Иванов М.** Интерметаллиды Ni_3Al и TiAl : микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург, 2002.
13. **Скобло Т., Петренчук В.** Выбор порошковой композиции и оптимальных параметров обработки при нанесении покрытий лазерным методом на кулачки распределительного вала // Распределение химических элементов по сечению детали. 1992. № 4. С. 57–71. URL: <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
14. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO_2 lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 970–974. DOI 10.1070/qe2014v044n10abeh015412
15. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B.** High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO_2 lasers. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 233–238. DOI 10.1070/qe2014v044n03abeh015320

16. **Фернандо Г. Л.** Методики оптимизации процесса лазерного нанесения износостойких покрытий на валы газотурбинных установок: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 148 с.
17. **Григорьянц А., Шиганов И., Мисюров А.** Технологические процессы лазерной обработки. М., 2008. 663 с.
18. **Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., Formanoir C. de, Witvrouw A., Van Hooreweder B.** On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Addit. Manuf.*, 2018, no. 23, pp. 161–169. DOI 10.1016/j.addma.2018.08.006
19. **Golyshev A., Orishich A.** Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks. *Met. Work. Mater. Sci.*, 2019, no. 21, pp. 82–92. DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92
20. **Солоненко О. П., Алхимов А. П., Марусин В. В., Рахимьянов Х. М., Оришич А. М., Салимов Р. А., Щукин В. Г., Косарев В. Ф.** Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 2000. Т. 18: Высокоэнергетические процессы обработки материалов. 425 с. ISBN 5-02-031528-1
21. **Rubenchik A. M., King W. E., Wu S. S.** Scaling laws for the additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, no. 257, pp. 234–243. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.034
22. **Golyshev A. A., Orishich A. M., Filippov A. A.** Similarity Laws in Laser Cladding of Cermet Coatings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 4, pp. 758–767. DOI 10.15372/pmtf20190421

References

1. **Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R.** Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mater. Rev.*, 2012, no. 57, pp. 133–164. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000014
2. **Evgenov A. G., Lukin E. A., Korolev V. A.** Features of the selective laser synthesis process as applied to casting alloys based on nickel and Ni₃Al intermetallic compound. *News of Materials Science. Science and Technology*, 2016, no. 5, pp. 3–11. (in Russ.)
3. **Dutta Majumdar J., Manna I.** Laser material processing. *Int. Mater. Rev.*, 2011, no. 56, pp. 341–388. DOI 10.1179/1743280411Y.0000000003
4. **Fabbro R.** Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, no. 43. DOI 10.1088/0022-3727/43/44/445501
5. **Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E.** A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018. DOI 10.1155/2018/4920718
6. **Kumar P., Farah J.** Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Mater. Lett.*, 2019, no. 252, pp. 256–259.
7. **Scime L., Beuth J.** Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.*, 2019, no. 29, p. 100830. DOI 10.1016/j.addma.2019.100830
8. **Kusuma C., Ahmed S. H., Mian A., Srinivasan R.** Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Commercially Pure Titanium (CP-Ti). *J. Mater. Eng. Perform.*, 2017, no. 26, pp. 3560–3568. DOI 10.1007/s11665-017-2768-6
9. **Kablov E. N., Buntushkin V. P., Povarova K. B., Bazyleva O. A., Morozov G. I., Kazanskaya N. K.** Low-alloy light heat-resistant high-temperature materials based on the intermetallic compound Ni₃Al. *Metals*, 1999, no. 1. (in Russ.)
10. **Kablov E. N., Lomberg B. S., Buntushkin V. P., Golubovsky E. R., Muboyadzhyan S. A.** Alloy based on Ni₃Al intermetallic compound – promising material for turbine blades. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2002, no. 7. (in Russ.)
11. **Kumar K. G., Anand T. J. S.** A Novel Intermetallic Nickel Aluminide (Ni₃Al) as an Alternative Automotive Body Material. *Int. J. Eng. Technol.*, 2011, pp. 274–282.
12. **Grinberg B., Ivanov M.** Intermetallic compounds Ni₃Al and TiAl: microstructure, deformation behavior. Ekaterinburg, 2002. (in Russ.)

13. **Skoblo T., Petrenchyuk V.** Choice of powder composition and optimal processing parameters for laser coating on camshaft cams. *Distribution of chemical elements over the section of the part*, 1992, no. 4, pp. 57–71. (in Russ.) URL: <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
14. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Experimental study of laser-oxygen cutting of low-carbon steel using fibre and CO₂ lasers under conditions of minimal roughness. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 970–974. DOI 10.1070/qe2014v044n10abeh015412
15. **Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B.** High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO₂ lasers. *Quantum Electron.*, 2014, no. 44, pp. 233–238. DOI 10.1070/qe2014v044n03abeh015320
16. **Fernando G. L.** Techniques for optimizing the process of laser deposition of wear-resistant coatings on the shafts of gas turbine plants. Cand. Tech. Sci. Diss. Moscow, 2017, 148 p. (in Russ.)
17. **Grigoryants A., Shiganov I., Misyurov A.** Technological processes of laser processing. Moscow, 2008, 663 p. (in Russ.)
18. **Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., Formanoir C. de, Witvrouw A., Van Hooreweder B.** On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Addit. Manuf.*, 2018, no. 23, pp. 161–169. DOI 10.1016/j.addma.2018.08.006
19. **Golyshev A., Orishich A.** Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks. *Met. Work. Mater. Sci.*, 2019, no. 21, pp. 82–92. DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92
20. **Solonenko O. P., Alkhimov A. P., Marusin V. V., Rakhimyanov H. M., Orishich A. M., Salimov R. A., Shchukin V. G., Kosarev V. F.** Low-temperature plasma. Novosibirsk, Nauka, 2000, vol. 18: High-energy processes of materials processing, 425 p. (in Russ.) ISBN 5-02-031528-1
21. **Rubenchik A. M., King W. E., Wu S. S.** Scaling laws for the additive manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, no. 257, pp. 234–243. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.034
22. **Golyshev A. A., Orishich A. M., Filippov A. A.** Similarity Laws in Laser Cladding of Cermet Coatings. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 4, pp. 758–767. DOI 10.15372/pmtf20190421

Информация об авторе

Михаил Александрович Гулов, старший лаборант

Information about the Author

Mikhail A. Gulov, Senior Laboratory Assistant

Статья поступила в редакцию 13.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 13.05.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021

Научная статья

УДК 535-14

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-78-92

**Разработка узкополосного фильтра
для реализации метода андерсемплинга
в импульсных терагерцевых спектрометрах**

**Алина Анатольевна Рыбак¹
Сергей Александрович Кузнецов²
Андрей Васильевич Аржанников³
Назар Александрович Николаев⁴**

¹⁻⁴ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

^{1, 4} Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

² Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук «КТИПМ»
Новосибирск, Россия

³ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ a.rybak1@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3586-9526>

² serge_smith@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-8125>

³ arzhan1@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

⁴ nazar@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>

Аннотация

Рассмотрен подход к созданию узкополосного квазиоптического фильтра с центральной частотой $\nu = 806$ ГГц ($\lambda = 372$ мкм), предназначенного для реализации метода андерсемплинга в импульсной терагерцевой спектроскопии. Частота выбрана с целью мониторинга линии поглощения молекулярного газа СО в локальном окне прозрачности атмосферы. Фильтр основан на эталоне Фабри – Перо и представляет собой полипропиленовую пленку с нанесенными с обеих сторон частотно-избирательными поверхностями (ЧИП) в форме квадратных прорезей в напыленном алюминиевом слое. Посредством численного моделирования пропускания предложенной структуры определено, что оптимум отношения ширины металлической перемычки a к латеральному периоду g ЧИП лежит в окрестности $a/g = 0,5$. При выборе g менее половины рабочей длины волны λ показано, что полная ширина на полувысоте пропускания получаемого квазиоптического фильтра составляет менее 4 %, что достаточно для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцевых спектрометрах.

Ключевые слова

импульсная терагерцевая спектроскопия, частотно-избирательные поверхности, квазиоптические фильтры, андерсемплинг

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90137.

Авторы выражают благодарность ЦКП «ВТАН НГУ» за предоставленное для выполнения проекта оборудование.

Для цитирования

Рыбак А. А., Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Николаев Н. А. Разработка узкополосного фильтра для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцевых спектрометрах // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 78–92. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-78-92

© Рыбак А. А., Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Николаев Н. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 78–92

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 78–92

Design of a Narrowband Filter for Implementing the Undersampling Method in Terahertz Time-Domain Spectrometers

Alina A. Rybak¹, Sergei A. Kuznetsov²
Andrey V. Arzhannikov³, Nazar A. Nikolaev⁴

¹⁻⁴ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

^{1,4} Institute of Automation and Electrometry
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

² Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk Branch TDIAM
Novosibirsk, Russian Federation

³ Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ a.rybak1@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3586-9526>

² serge_smith@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-8125>

³ arzhan1@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

⁴ nazar@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>

Abstract

In this paper, we propose a design of a narrow-band quasi-optical filter with a central frequency $\nu = 806$ GHz ($\lambda = 372$ μm) suitable for the implementation of the undersampling technique in terahertz time-domain spectroscopy. The frequency was chosen to monitor the absorption line of the molecular gas CO in the local transparency window of the atmosphere. The filter is designed as the Fabry-Perot etalon based on a polypropylene film with frequency-selective surfaces (FFS) on both sides consisting of square slots in a sprayed aluminum layer. Through numerical simulation of the transmission of the proposed structure, we defined that the optimum ratio of the width of the metal bridge a to the pitch g of the FSS lies in the vicinity of $a/g = 0.5$. For g less than half of the operating wavelength λ , the FWHM of the filter is less than 4%, which is sufficient for the implementation of the undersampling method in terahertz time-domain spectroscopy.

Keywords

terahertz time-domain spectroscopy, frequency-selective surfaces, quasi-optical filters, undersampling

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-32-90137.

The authors acknowledge the NSU Shared Equipment Center “VTAN” for the equipment provided for the project

For citation

Rybak A. A., Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Nikolaev N. A. Design of a Narrowband Filter for Implementing the Undersampling Method in Terahertz Time-Domain Spectrometers. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 78–92. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-78-92

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот электромагнитного спектра обычно определяют в пределах от 0,1 (иногда от 0,3) до 10 ТГц, что соответствует длинам волн от 3 (1) мм до 30 мкм. Для исследования диэлектрических свойств сред и материалов в данном диапазоне популярным является метод импульсной терагерцовой спектроскопии (ИТС, в англоязычной литературе Terahertz time-domain spectroscopy, или сокращенно THz-TDS). Метод основан на когерентном детектировании временной формы терагерцового (оптического) поля, что позволяет непосредственно определить его амплитуду и фазу, причем в широкой полосе частот. Это, в свою очередь, дает возможность измерить комплексную диэлектрическую проницаемость или комплексный показатель преломления материалов с высокой точностью. Типич-

ным сигналом спектрометра является одно- или двухпериодное колебание электромагнитного поля, длительностью ~ 1 пс (10^{-12} с), несущее широкий спектр частот [1; 2]. При детектировании сигнала осуществляется дискретизация непрерывной волновой формы поля с заданным временным интервалом и сохранение полученных значений в цифровом виде на компьютере. Таким образом, для ИТС справедлива теорема отсчетов (Уиттекера – Котельникова – Шенона) [3; 4]. Она выдвигает требования к временному интервалу выборки в соответствии с максимальной частотой, содержащейся в спектре сигнала. Так, например, при граничной частоте (на которой динамический диапазон спектрометра становится менее 1), равной $f_{\max} = 5$ ТГц временной интервал выборки должен составлять 100 пс, что соответствует частоте семплирования $f_{\text{sam}} = 2f_{\max} = 10$ ТГц.

Современные коммерчески доступные ИТС охватывают широкий спектральный диапазон от 50 ТГц до 6 ТГц [5; 6] и обладают динамическим диапазоном более 90 дБ в низкочастотной области спектра. Однако не для всех задач требуется измерение в широком спектре. Например, нами ранее была показана возможность сокращения времени измерения и повышения отношения сигнал / шум при измерениях на ИТС с использованием низкочастотных квазиоптических фильтров на основе частотно-избирательных поверхностей [7]. Они также называются антиалиасными (anti-alias) фильтрами, поскольку предотвращают смешение информативного спектра сигнала с компонентами (алиасами), лежащими выше частоты Найквиста, равной $f_{\text{sam}}/2$. Такие фильтры имеют повышенные требования к внеполосовому подавлению спектральных компонент сигнала и позволяют увеличить временной интервал дискретизации в системе детектирования ИТС, что в итоге значительно уменьшает время измерения или при его сохранении позволяет снизить шум за счет большего накопления сигнала. Аналогичным образом в ИТС может быть применен метод андерсемплинга (в зарубежной литературе undersampling или bandpass sampling) [8], который уменьшает время измерения посредством ограничения спектра сигнала полосовым фильтром. Иначе говоря, данный метод подобен предыдущему, но в противовес может работать со средними и высокими частотами сигнала.

Мы предполагаем два актуальных сценария применения метода андерсемплинга. Первый – это выделение в высокочастотной спектральной области сигнала узкой полосы, соответствующей окну прозрачности атмосферы [9]. Линии поглощения атмосферы в основном обусловлены вращательными и колебательно-вращательными модами молекулярного водяного пара. Их интенсивность значительно растет выше частоты 1 ТГц, что в совокупности с падением динамического диапазона спектрометров затрудняет проведение исследований методом ИТС на частотах выше 1,6 ТГц (рис. 1). Безусловно, герметичный бокс, закрывающий ТГц путь в спектрометре и продуваемый азотом, сухим воздухом или откачиваемый до вакуума, решает проблему влияния атмосферной влаги на измерения. Однако такой подход требует дополнительного времени на продувку / откачку, повышая влияние долговременного дрейф-сигнала, и в некоторых случаях не совместим с температурными измерениями, например, в случае установки в систему смещаемого криостата [10].

Второй сценарий – это исследование узкополосных резонансов. Такими резонансами могут обладать метаматериалы, например используемые в качестве сенсоров, в том числе биомолекул [11]. Типичным примером является металлическая наноантенна, обладающая резонансной частотой, близкой к колебательной частоте интересующей молекулы. При попадании молекулы в область локального усиления поля наноантенной на спектральном контуре плазмонного резонанса последней появляется узкополосный пик пропускания, индуцированный молекулой. Этот эффект называют Фано-резонансом, и его обычно описывают через систему связанных осцилляторов наноантенна-молекула.

Также не исключен сценарий, объединяющий оба предыдущих. Например, одной из задач, для которой предполагается применение метода андерсемплинга, является спектроскопия молекулярных газов. В нашем случае в качестве модельного газа выбран монооксид углерода. Поскольку молекула СО является симметричным волчком, ее ТГц спектр погло-

щения состоит из ряда эквидистантных линий (рис. 2). Благодаря этому свойству и доступности газа он часто применяется для калибровки терагерцовых спектрометров [12].

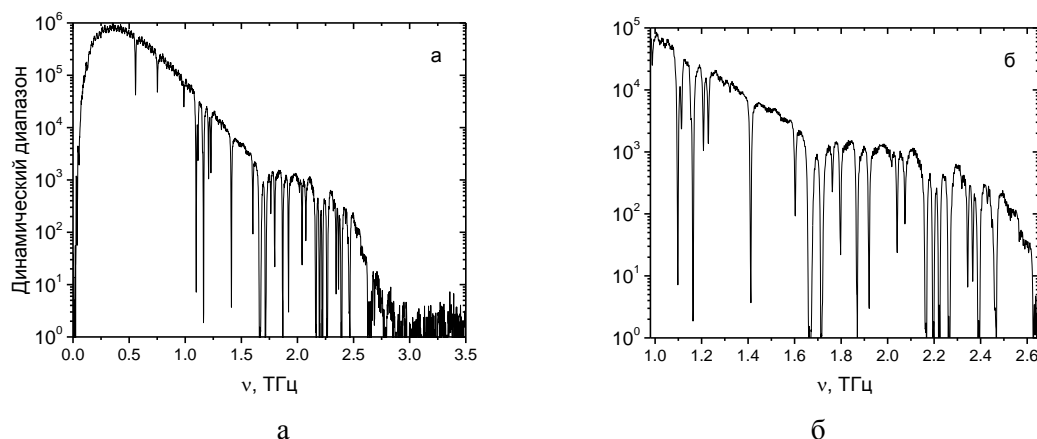


Рис. 1. Динамический диапазон ИТС, разработанного в ИАиЭ СО РАН: обзорный вид (а) и высокочастотная часть (б). Узкие линии подавления сигнала соответствуют линиям поглощения атмосферной влаги (H_2O)

Fig. 1. Dynamic range of the TDS developed at the IA&E SB RAS: overview (a) and high-frequency part (b). The narrow lines of signal suppression correspond to the absorption lines of atmospheric moisture (H_2O)

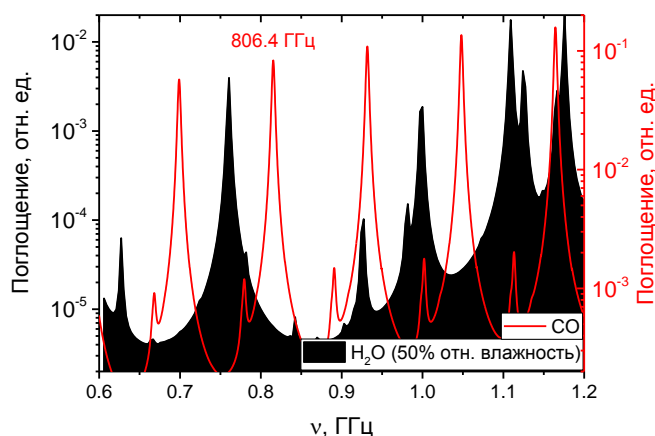


Рис. 2. Терагерцовый спектр поглощения атмосферной влаги при относительной влажности 50 % (черный) и спектр монооксида углерода (красный) из базы HITRAN (<https://hitran.iao.ru/>). Поглощение приведено в относительных единицах и нормировано для наглядности

Fig. 2. Terahertz absorption spectrum of atmospheric moisture at 50% relative humidity (black) and spectrum of carbon monoxide (red) from the HITRAN database (<https://hitran.iao.ru/>). Absorption is given in relative units and normalized for clarity

Для апробации метода андерсемплинга нами выбрана линия CO с частотой в окрестности 806 ГГц. Это обусловлено следующими факторами. Во-первых, выигрыш при применении метода андерсемплинга тем больше, чем выше частота полосы, поскольку именно в более высоких частотах наблюдается повышенный шум ИТС. С другой стороны, в окрестности 0,8 ТГц динамический диапазон спектрометра остается достаточным (на 2 порядка выше, чем на частотах выше 1,6 ТГц) для измерения сильных газовых линий. В свою очередь, про-

пускание окон прозрачности атмосферы начинает значительно падать на более высоких частотах (свыше десяти раз на частоте в окрестности 1,15 ТГц относительно 0,85 ТГц).

Целью данной работы является разработка узкополосного квазиоптического фильтра на основе частотно-избирательных поверхностей, предназначенного для реализации метода андерсемплинга в импульсной терагерцовой спектроскопии. Отметим, что, несмотря на существующий объем литературы по ИТС, нами не было найдено ни одной статьи, посвященной применению метода андерсемплинга совместно с данным видом спектроскопии.

Подход к разработке узкополосного квазиоптического ТГц фильтра

В данной работе рассмотрен подход к созданию узкополосного квазиоптического фильтра, основанный на использовании эталона Фабри – Перо с сеточными рефлекторами. Такой фильтр обеспечивает узкую полосу пропускания и последовательно совмещается с более широкополосным полосовым пропускающим фильтром (ППФ), выполненным на саморезонансных сетках и предназначенным для подавления высших резонансов эталона Фабри – Перо для обеспечения его монохроматичности.

Технология моделирования и изготовления широкополосных ППФ с шириной на полувысоте 10–20 % была представлена нами ранее в работах [13–16]. Такие фильтры были разработаны нами под задачи спектральной диагностики ТГц излучения в экспериментах по его генерации в плазме при инъекции мощного релятивистского электронного пучка [13; 14; 17; 18]. ППФ состоит из нескольких гальванических сеток, обычно в количестве 4–6 шт. в зависимости от необходимых характеристик результирующей полосы пропускания, и обеспечивает высокое внеполосовое подавление (3–6 порядков по мощности) вплоть до ближнего ИК диапазона. Каждая сетка представляет собой тонкую фольгу с регулярно расположенными субволновыми резонансными щелевыми элементами дипольного типа (как правило, в форме поляризационно-нечувствительных крестов или трилистников), изготовленными фотолитографически. Такие сетки также называются саморезонансными, поскольку работают на локализованном плазмонном резонансе, обусловленном возбуждением локальных стоячих волн на щелях сетки [19]. Последнее приводит к многократному усилению локального поля в области щелей и, как следствие, к близкому к единице пропусканию сетки на ее резонансной частоте. В микроволновой литературе подобные структуры известны под термином «частотно-избирательные поверхности» (ЧИП) [20; 21]. Существенно, что резонансная длина волны ЧИП λ_{res} лежит выше точки возбуждения высших дифракционных гармоник, что обеспечивается условием:

$$\frac{g}{\lambda_{\text{res}}} < \frac{1}{1 + \sin \theta}, \quad (1)$$

где g – эффективный латеральный период ячеек ЧИП, θ – угол падения. В случае $g \ll \lambda_{\text{res}}$ для ЧИП принято использовать термин «метаповерхность» [22; 23].

Как будет показано ниже, для реализации метода андерсемплинга ширина полосы пропускания фильтра должна составлять менее 4 %. Отметим, что ширина полосы фильтрации одиночной ЧИП, входящей в состав ППФ, убывает с уменьшением ширины щелей по квазилинейному закону [24; 25], что на первый взгляд позволяет соответствующим образом изменить дизайн ЧИП для необходимого сужения ширины полосы многосеточного фильтра. Наши исследования, однако, показали, что пиковое пропускание ППФ быстро деградирует при сужении щелей ЧИП, что обусловлено двумя факторами: 1) быстрым возрастанием омических потерь в сетках на частоте резонанса; 2) рассогласованием импеданса сетки и свободного пространства, приводящего в случае узких щелей к резкому возрастанию коэффициента отражения. Указанные факторы позволяют сделать вывод, что уменьшение ширины полосы ППФ ниже 10 % не является целесообразным при создании ППФ с высоким (> 85 %) коэффициентом пропускания в максимуме, а оптимальным решением получения свободного от

внеполосовых гармонических резонансов узкополосного фильтра с шириной полосы в несколько процентов является интеграция ППФ с узкополосным фильтром Фабри – Перо (ФФП).

Дизайн фильтра Фабри – Перо и моделирование его характеристик

1. Концепция фильтра

ФФП представляет собой открытый квазиоптический резонатор, сформированный двумя плоскопараллельными отражателями (зеркалами), имеющими высокие коэффициенты отражения ρ_1 , ρ_2 (рис. 3). ФФП является вариантом многолучевого интерферометра Фабри – Перо [26] с тем отличием, что первый работает на плоскопараллельном волновом пучке без непосредственного образования пространственной интерференционной картины. В том случае, когда расстояние между зеркалами ФФП строго фиксировано и не может механически варьироваться, для фильтра принято также использовать термин «эталон Фабри – Перо».

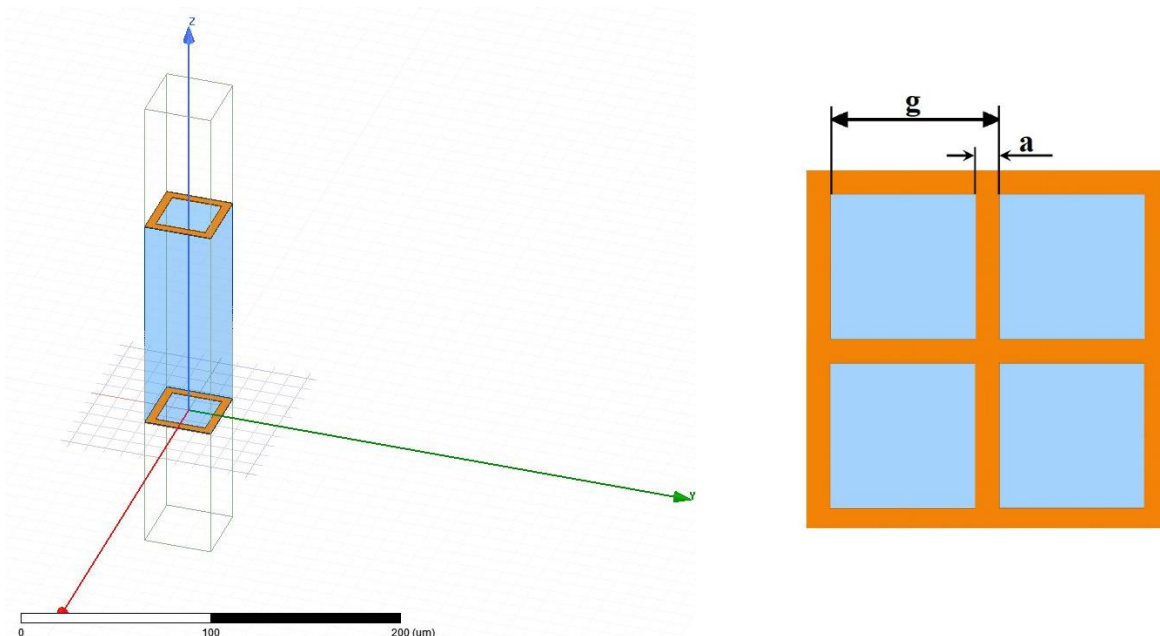


Рис. 3. Элементарная ячейка периодической структуры фильтра Фабри – Перо с металлическими сеточными отражателями (показаны оранжевым цветом), разделенными диэлектрическим слоем (показан голубым): слева – в изометрической проекции, справа – 2D вид сверху. Рисунок соответствует случаю квадратных сеток, моделировавшемуся в данной работе (g – латеральный период сетки, a – ширина металлических перемычек между ячейками)

Fig. 3. A unit cell of a periodic structure Fabry – Perot filter with metal mesh reflectors (orange) separated by a dielectric layer (blue): left – isometric plane, right – 2D top view. The figure corresponds to the case of square grids modeled in this work (g is the lateral period of the grid, a is the width of the metal bridges between the cells)

Как следует из теории ФФП [26], двухзеркальная система имеет пиковое пропускание на длинах волн λ_m^{\max} , соответствующих условию конструктивной интерференции соседних лучей (парциальных волн), образующихся в результате деления основной волны при последовательном отражении от зеркал:

$$4\pi \frac{n L}{\lambda_m^{\max}} \cos\theta - (\phi_1 + \phi_2) = 2m\pi, \quad (2)$$

где m – порядок интерференции; L и n – расстояние и показатель преломления среды между зеркалами соответственно, θ – угол падения излучения, отсчитываемый от нормали; $\phi_1 = \text{Arg}(\rho_1)$, $\phi_2 = \text{Arg}(\rho_2)$ – фазы коэффициентов отражения зеркал, которые в общем случае не равны $\pm\pi$.

Для фиксированного интерференционного порядка m относительная ширина полосы фильтрации ФФП быстро убывает с ростом амплитудных коэффициентов отражения зеркал ρ_1 , ρ_2 согласно формуле

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_m^{\max}} \cong \frac{\Re}{m\pi + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}}, \quad (3)$$

где, $\Re = (1 - |\rho_1||\rho_2|) / \sqrt{|\rho_1||\rho_2|}$. При этом пропускание в максимуме зависит также от амплитудных коэффициентов пропускания зеркал τ_1 , τ_2 ,

$$T_{\max} = \frac{|\tau_1|^2 |\tau_2|^2}{(1 - |\rho_1||\rho_2|)^2}. \quad (4)$$

Важно отметить, что в оптическом диапазоне длин волн в качестве зеркал ФФП используются отражательные металлические или многослойные диэлектрические покрытия [27], для которых коэффициент поглощения A относительно мал: $A_i = 1 - |\tau_i|^2 - |\rho_i|^2 \ll 1$. В этом случае, как нетрудно показать на основе соотношения (4), величина T_{\max} может быть легко обеспечена на приемлемом для практики уровне, составляя десятки (вплоть до сотни) процентов. Напротив, при переходе в дальний ИК или ТГц диапазоны, для которых создание многослойных диэлектрических покрытий представляет непростую технологическую задачу ввиду большой рабочей длины волны (в десятки и сотни мкм), применение отражателей на основе металлических пленок сталкивается с принципиальной трудностью: ввиду высокой отражательной способности пленок в указанной области спектра, уменьшение их толщины для достижения приемлемого коэффициента пропускания зеркал ФФП приводит к резкому увеличению омических потерь в металлическом слое [28; 29] и, как следствие, резкому падению величины T_{\max} . Решение указанной проблемы состоит в замене сплошных отражательных пленок на перфорированные. Действительно, при использовании высокопроводящего металлического слоя с толщиной больше толщины скин-слоя его коэффициент поглощения может быть обеспечен на уровне $\sim 1\%$ и меньше, в то время как необходимый уровень прозрачности / отражения легко реализуется путем создания в металлическом слое сквозных отверстий с заданным коэффициентом заполнения металлом, т. е. в результате превращения сплошного металлического слоя в сетку. Во избежание дифракционных потерь при произвольном угле падения излучения на сетку ($\theta = 0 \div \pi/2$) латеральный период расположения ячеек квадратной сетки g должен быть вдвое меньше длины волны, как это следует из приведенного выше условия дифракционной одномодовости (1): $g/\lambda_{\text{res}} < 1/2$.

Описанная идея субволновой металлической сетки, как перфорированного отражателя ФФП с малым коэффициентом поглощения на практике оказалась очень плодотворной. Фактически данный подход был изложен еще в 50-х гг. XX в. [30] и впоследствии получил инструментальное развитие в работах различных исследовательских групп при создании квазиоптической аппаратуры для спектральных измерений от дальнего ИК диапазона до миллиметровых волн [31–36]. Отметим, что сеточные рефлекторы являются разновидностью ЧИП. Как правило, геометрия отверстий в таких рефлекторах выбирается круглой или квадратной, что обеспечивает отсутствие локализованных плазмонных резонансов вплоть до точки дифракции. АЧХ пропускания / отражения подобных сеток – плавно возрастающая / убываю-

щая (в длинноволновом пределе квадратично) функция, что является необходимым критерием для сохранения селективных характеристик ФФП в пределах его рабочей полосы.

2. Полноволновое электродинамическое моделирование

В данной работе расчет и оптимизация ФФП выполнены с использованием коммерческого пакета 3-мерного электродинамического моделирования ANSYS® Electromagnetics Suite R19. Данный пакет является хорошо известным программным продуктом класса “3D Full Wave Analysis”, использующим метод конечных элементов для численного интегрирования уравнений Максвелла в частотной области. При моделировании ФФП как регулярно-периодической структуры использован режим портов Флоке с периодическими граничными условиями (“Master-Slave” Boundary Conditions), применяемыми к элементарной ячейке ФФП (см. рис. 3). Порты Флоке располагались на расстоянии, равном удвоенному периоду ячейки структуры (2g) сверху и снизу от ее поверхностей по нормали к оси Z.

В качестве базового дизайна сеток нами использована «классическая» геометрия квадратно-упакованных ячеек с отверстиями квадратной формы (см. рис. 3). Сеточные рефлекторы предполагались размещенными на поверхности полипропиленовой (ПП) пленки, обеспечивающей фиксацию зазора между сетками и имеющей низкий тангенс диэлектрических потерь. Комплексная диэлектрическая проницаемость ПП задавалась равной $\epsilon = 2,28 \cdot (1 - j \cdot 10^{-3})$, проводимость и толщина металла сеток – $1,5 \cdot 10^7$ Ом/м и 0,4 мкм соответственно. Толщина ПП пленки задавалась в окрестности 120 мкм, что связано с доступными нам образцами пленок и близостью данного значения к длине волны λ_0^{\max} фундаментального резонанса ФФП, который по условию задачи должен совпадать с длиной волны излучения 372 мкм, соответствующей частоте 806 ГГц:

$$L \approx \frac{\lambda_0^{\max}}{2n}, \quad (5)$$

где $n = \text{Re} \sqrt{\epsilon}$. Соотношение (5) получено из (2) для $m = 0$, с учетом того, что в длинноволновом приближении $\phi_1 = \phi_2 \approx \pi$.

На первом этапе были проведены предварительные поисковые расчеты для различного отношения параметров a/g в диапазоне от 0,1 до 0,8. При фиксированном отношении a/g моделировались спектры пропускания ФФП при значении $g = p \times \lambda_0^{\max}$, где параметр p принимал значения от 0,1 до 0,5 с шагом 0,05. Характерный вид полученных кривых представлен на рис. 4. Для примера приведены данные для $a/g = 0,25$.

Чтобы определить оптимальный диапазон значений геометрических параметров структуры, соответствующий поставленной задаче, нами был проведен анализ полученных кривых и построены зависимости амплитуд (максимума пропускания, T_{\max}) и относительных ширин резонансов ($\Delta\lambda/\lambda_m^{\max}$) от параметра p . В результате стало ясно, что оптимальные значения для нашей задачи лежат в окрестности $a/g = 0,5$, поэтому на втором этапе был дополнительно проведен более детальный расчет для диапазона значений a/g от 0,4 до 0,6 (рис. 5). Ввиду большого объема полученных данных здесь мы ограничимся только результатами, полученными на втором этапе.

Далее мы покажем, что полная ширина на полувысоте полосы пропускания фильтра должна быть менее 4 % для реализации метода андерсемплинга в импульсном терагерцовом спектрометре, а пока будем использовать это значение как отправную точку.

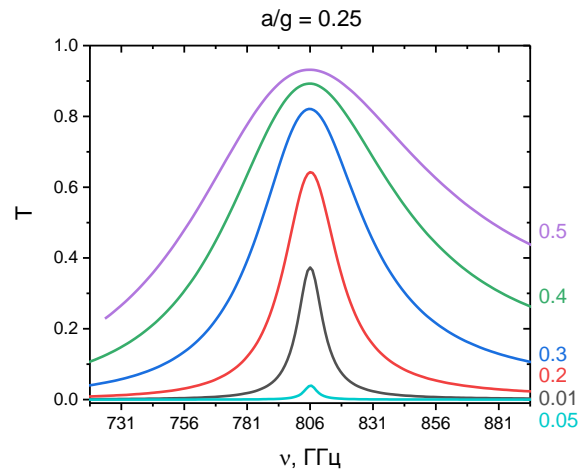


Рис. 4. Пропускание структуры, представленной на рис. 2, с различными значениями параметров $g = p \times \lambda_0^{\max}$, где $a/g = 0,25$. Значение параметра p указано для каждой кривой соответствующим цветом справа

Fig. 4. The transmission of the structure represented in fig. 2. with different values of the parameters $g = p \times \lambda_0^{\max}$, where $a/g = 0.25$. The value of the parameter p is indicated for each curve by the corresponding color on the right

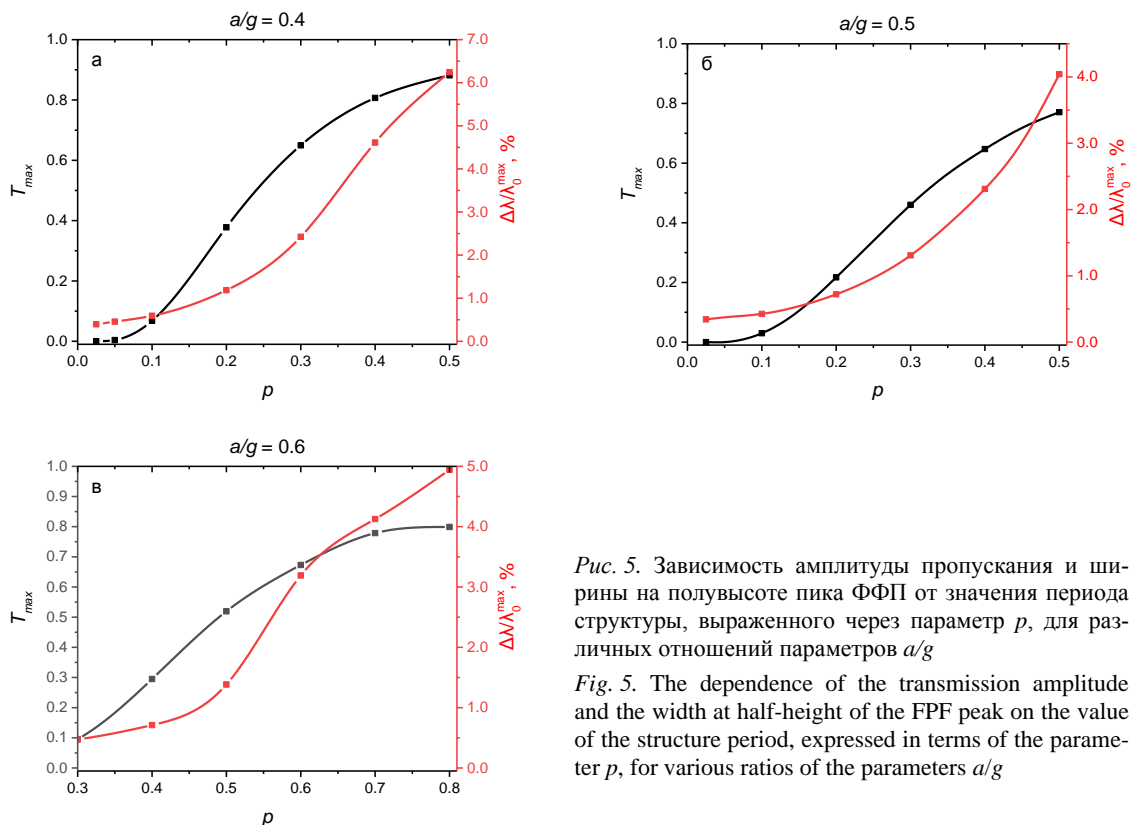


Рис. 5. Зависимость амплитуды пропускания и ширины на полувывоте пика ФФП от значения периода структуры, выраженного через параметр p , для различных отношений параметров a/g

Fig. 5. The dependence of the transmission amplitude and the width at half-height of the FPF peak on the value of the structure period, expressed in terms of the parameter p , for various ratios of the parameters a/g

Согласно рис. 5, для $\Delta\lambda/\lambda_m^{\max} = 4\%$ имеем: при $a/g = 0,4$ $T_{\max} = 88\%$; при $a/g = 0,5$ $T_{\max} = 77\%$; при $a/g = 0,6$ $T_{\max} = 76\%$. Однако при уменьшении ширины полосы фильтра до 2 %, что, возможно, потребует для повышения эффекта от применения метода андерсемплинга, пропускание изменится заметным образом, так при $a/g = 0,4$ $T_{\max} = 29\%$; при $a/g = 0,5$ $T_{\max} = 45\%$; при $a/g = 0,6$ $T_{\max} = 40\%$. Таким образом, для дальнейших оценок мы остановимся на отношении $a/g = 0,5$ как более близком к оптимальному по параметру пропускания для фильтров с шириной полосы уже 4 %. Параметр p также выбран равным 0,5.

Оценка эффекта при применении андерсемплинга

Далее проведена оценка спектра пропускания комплексного фильтра, состоящего из доступного полосового фильтра с центральной частотой 800 ГГц и шириной полосы 20 %, и промоделированного выше ФФП с шириной 4 %. Результаты представлены на рис. 6.

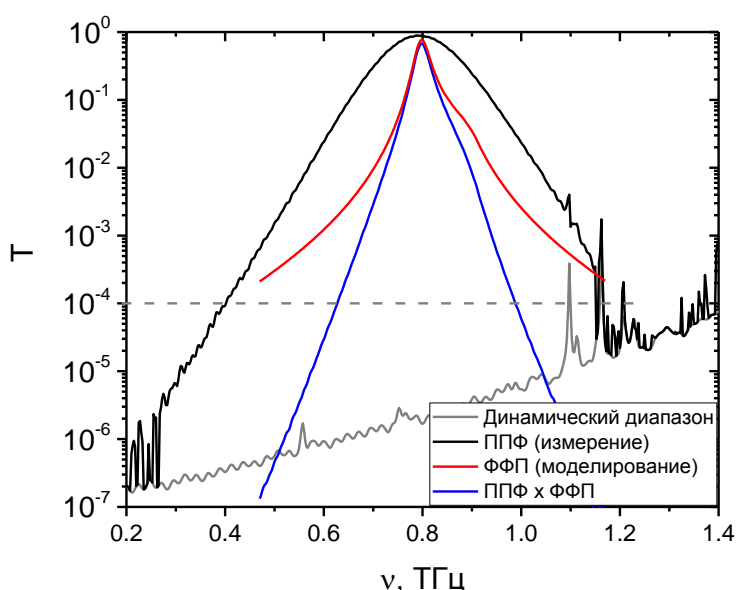


Рис. 6. Оценка пропускания комплексного фильтра (синий), состоящего из доступного полосового фильтра с центральной частотой 800 ГГц и шириной полосы 20 % (черный – экспериментальное измерение) и фильтра Фабри – Перо (красный – численный расчет). Серой сплошной линией указан динамический диапазон импульсного ТГц спектрометра. Серый пунктир для наглядности показывает уровень пропускания 10^{-4}

Fig. 6. Estimation of the transmission of a complex filter (blue) consisting of an available bandpass filter with a center frequency of 800 GHz and a bandwidth of 20 % (black – experimental measurement) and a Fabry – Perot filter (red – numerical calculation). The gray solid line indicates the dynamic range of the TDS. The gray dotted line shows a transmission level of 10^{-4} for clarity

Контур пропускания результирующего узкополосного фильтра представлен синим цветом. Для оценки предположим, что алиасинг от внеполосового сигнала будет ниже уровня 10^{-4} , так как отношение сигнал / шум (не путать с динамическим диапазоном) терагерцовых спектрометров обычно не превышает 10^3 , такой уровень искажений затеряется в шумах. По уровню 10^{-4} левая и правая границы полосы фильтра составляют $\nu_L = 627,3$ ГГц и $\nu_H = 988,3$ ГГц соответственно. Таким образом, из метода андерсемплинга можно оценить параметр s – во сколько раз возможно увеличение шага семплирования:

$$1 \leq s \leq \frac{v_H}{v_H - v_L}.$$

В нашем случае параметр s лежит в диапазоне от 1 до 2,74, и поскольку он может принимать целочисленные значения, то нам доступно $s = 2$.

В результате нами показано, что при выборе параметров $a/g = 0,5$, $p = 0,5$ возможна разработка узкополосного фильтра с максимумом пропускания $\sim 68\%$, позволяющим применение метода андерсемплинга в импульсном ТГц спектрометре при увеличении шага семплирования в 2 раза. Оценочно, выбор $a/g = 0,5$ и p в диапазоне 0,35–0,4 позволит установить параметр андерсемплинга $s = 4$, за счет большего сужения полосы пропускания результирующего фильтра и уменьшения ее максимума приблизительно до 27 %, что на самом деле не является критичным, так как динамический диапазон ИТС, как видно из рис. 6, более 10^5 в окрестности частот 800 ГГц.

Также стоит отметить, что рассматриваемая для детектирования ширина газовой линий составляет менее 4 ГГц, при этом абсолютная ширина результирующего узкополосного фильтра составит около 16 ГГц при относительной ширине 2 %. Таким образом, рассчитанный фильтр вполне пригоден для поставленной задачи.

Заключение

В данной работе рассмотрен подход к созданию узкополосного квазиоптического фильтра, основанный на использовании эталона Фабри – Перо. Фильтр представляет собой полипропиленовую пленку с нанесенными с обеих сторон частотно-избирательными поверхностями в форме квадратных прорезей в напыленном алюминиевом слое. Посредством численного моделирования пропускания предложенной структуры при выборе отношения $a/g = 0,5$, где a – ширина металлической перемычки, g – период микроструктуры, который составляет менее половины рабочей длины волны ($\lambda = 372$ мкм), показано, что полная ширина на полувысоте пропускания полученного фильтра составляет менее 4 %, что достаточно для реализации метода андерсемплинга в импульсных терагерцевых спектрометрах. Путем фильтрации широкополосного сигнала спектрометра и увеличения шага семплирования ТГц импульса предполагается возможным сокращение времени сбора данных до 4 раз.

На следующем этапе данного исследования предполагается изготовление разработанного фильтра и экспериментальная апробация предложенного подхода.

Список литературы

1. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцевый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // *Автоматрия*. 2010. Т. 46, № 3. С. 110–117.
2. Sartorius B., Roehle H., Künzel H., Böttcher J., Schlak M., Stanze D., Venghaus H., Schell M. All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 13, pp. 9565–9570.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
4. Shannon C. Communication in the presence of noise. *Proc. IRE*, 1949, vol. 37, no. 1, pp. 10–21.
5. Vieweg N., Rettich F., Deninger A., Roehle H., Dietz R., Göbel T., Schell M. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range. *J. Infrared, Millim. Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, no. 10, pp. 823–832.
6. Stehr D., Morris C. M., Schmidt C., Sherwin M. S. High-performance fiber-laser-based terahertz spectrometer. *Opt. Lett.*, 2010, vol. 35, no. 22, pp. 3799–3801.

7. Рыбак А. А., Николаев Н. А., Кузнецов С. А., Yang Sh.-H. Применение ёмкостных микроструктур в качестве антиалиасных фильтров для задач широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии // *Автометрия*. 2020. Т. 56, № 1. С. 124–132.
8. Harada H., Prasad R. *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Artech House, 2002. 395 p.
9. Slocum David M. et al. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 127, pp. 49–63.
10. Wang Ch.-R. et al. Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K. *Infrared Physics & Technology*, 2019, vol. 97, pp. 1–5.
11. Wendao X., Xie L., Ying Y. Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: a review. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, no 37, pp. 13864–13878.
12. Withawat W., Naftaly M. Fundamentals of measurement in terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, vol 35, no. 8, pp. 610–637.
13. Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., et al. Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM. *Terahertz Sci. and Tech.*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 18–39.
14. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Вячеславов Л. Н. и др. Диагностический комплекс для исследований генерации субтерагерцового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3 // *Физика плазмы*. 2012. Т. 38, № 6. С. 496–505.
15. Kuznetsov S. A., Astafyev M. A., Gelfand A. V., Arzhannikov A. V. Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications. In: Proc. 44th European Microwave Conf. (*EuMC 2014*). Rome, Italy, October 6–9, 2014, Article no. 6986576, pp. 881–884.
16. Кузнецов С. А., Гельфанд А. В. Исследование спектральных характеристик микроструктурных квазиоптических полосовых фильтров субтерагерцового диапазона // *Изв. высших учебных заведений. Физика*. 2015. Т. 58, № 11. С. 113–120.
17. Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., et al. Generation of High-Power Sub-THz Waves in Magnetized Turbulent Electron Beam Plasmas. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 81–90.
18. Arzhannikov A. V., Thumm M. K. A., Burdakov A. V., et al. Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams”. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 478–485.
19. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Gelfand A. V. et al. Microstructured Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. 2010. Т. 5, вып. 4, С. 79–90.
20. Munk B. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. J. Wiley & Sons, 2000.
21. Касьянов А. О., Обуховец В. А. Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // *Антенны*. 2005. № 9. С. 4–12.
22. Holloway C. L., Kuester E. F., Gordon J. A. et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 10–35.
23. Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., Simovski C. R. Metasurfaces: From microwaves to visible. *Phys. Reports*, 2016, vol. 634, pp. 1–72.
24. Möller K. D., Warren J. B., Heaney J. B., Kotecki C. Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions. *Appl. Opt.*, 1996, vol. 35, pp. 6210–6215.
25. Chase S. T., Joseph R. D. Resonant array bandpass filters for the far infrared. *Appl. Opt.*, 1983, vol. 22, pp. 1775–1779.
26. Кузнецов С. А., Астафьев М. А., Скляр В. Ф., Лазорский П. А., Аржанников А. В. Спектральные измерения диэлектрических свойств полипропиленовых пленок в субтерагерцовом диапазоне частот // *Вестник НГУ. Серия: Физика*. 2014. Т. 9, № 4. С. 15–38.

27. **Розенберг Г. В.** Оптика тонкослойных покрытий. М.: ГИФМЛ, 1958.
28. **Каплан А. Е.** Об отражательной способности металлических пленок в СВЧ- и радиодиапазоне // Радиотехника и электроника. 1964. № 10. С. 1781–1787.
29. **Carli B.** Reflectivity of metallic films in the infrared. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, vol. 67, no. 7, pp. 908–910.
30. **Casey J. P., Lewis E. A.** Interferometer Action of a Parallel Pair of Wire Gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, vol. 42, pp. 971–977.
31. **Renk K. F., Genzel L.** Interference Filters and Fabry-Perot Interferometers for the Far Infrared. *Appl. Opt.*, 1962, vol. 1, pp. 643–648.
32. **Ulrich R., Renk K. F., Genzel L.** Tunable Submillimeter Interferometers of the Fabry-Perot Type. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1963, vol. 11, no. 5, pp. 363–371.
33. **Rawcliffe R. D., Randall C. M.** Metal Mesh Interference Filters for the Far Infrared. *Appl. Opt.*, 1967, vol. 6, pp. 1353–1358.
34. **Sakai K., Fukui T., Tsunawaki Y., Yoshinaga H.** Metallic mesh bandpass filters and Fabry-Perot interferometer for the far infrared. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1969, no. 8, pp. 1046–1055.
35. **Steup D.** A tuneable 600 GHz bandpass-filter with large free-spectral-range. *Int. J. Infrared Milli Waves*, 1992, no. 13, pp. 1767–1779.
36. **Kozlov G. V., Volkov V. V.** Coherent Source Submillimeter Wave Spectroscopy. In: Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids (Topics in Applied Physics, Vol. 74). Ed. by G. Gruener. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1998, pp. 51–109.

References

1. **Antsygin V. D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A., Potaturkin O. I.** Small-size terahertz spectrometer using the second harmonic of a femtosecond fiber laser. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 294–300.
2. **Sartorius B., Roehle H., Künzel H., Böttcher J., Schlak M., Stanze D., Venghaus H., Schell M.** All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 13, pp. 9565–9570.
3. **Gonorovsky I. S.** Radio engineering circuits and signals: Textbook for universities. Moscow, Radio and communication, 1986, 512 p.
4. **Shannon C.** Communication in the presence of noise. *Proc. IRE*, 1949, vol. 37, no. 1, pp. 10–21.
5. **Vieweg N., Rettich F., Deninger A., Roehle H., Dietz R., Göbel T., Schell M.** Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range. *J. Infrared, Millim. Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, no. 10, pp. 823–832.
6. **Stehr D., Morris C. M., Schmidt C., Sherwin M. S.** High-performance fiber-laser-based terahertz spectrometer. *Opt. Lett.*, 2010, vol. 35, no. 22, pp. 3799–3801.
7. **Rybak A. A., Nikolaev N. A., Kuznetsov S. A., Yang Sh.-H.** Application of Capacitive Microstructures as Anti-Aliasing Filters for Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 101–108.
8. **Harada H., Prasad R.** Simulation and Software Radio for Mobile Communications. Artech House, 2002. 395 p.
9. **Slocum David M. et al.** Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 127, pp. 49–63.
10. **Wang Ch.-R. et al.** Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K. *Infrared Physics & Technology*, 2019, vol. 97, pp. 1–5.
11. **Wendao X., Xie L., Ying Y.** Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: a review. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, no 37, pp. 13864–13878.

12. **Withawat W., Naftaly M.** Fundamentals of measurement in terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, vol 35, no. 8, pp. 610–637.
13. **Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., et al.** Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM. *Terahertz Sci. and Tech.*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 18–39.
14. **Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Vyacheslavov L. N. et al.** Diagnostic complex for studying the generation of subterahertz radiation during beam-plasma interaction at the GOL-3 facility. *Plasma Phys.*, 2012. vol. 38, no. 6. pp. 496–505. (in Russ.)
15. **Kuznetsov S. A., Astafyev M. A., Gelfand A. V., Arzhannikov A. V.** Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications. In: Proc. 44th European Microwave Conf. (*EuMC 2014*). Rome, Italy, October 6–9, 2014, Article no. 6986576, pp. 881–884.
16. **Kuznetsov S. A., Gelfand A. V.** Investigation of Spectral Characteristics for Microstructured Quasi-Optical Bandpass Subterahertz Filters. *Russ. Phys. J.*, 2016, vol. 58, no. 11, pp. 1605–1612.
17. **Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T., et al.** Generation of High-Power Sub-THz Waves in Magnetized Turbulent Electron Beam Plasmas. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 81–90.
18. **Arzhannikov A. V., Thumm M. K. A., Burdakov A. V., et al.** Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams”. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 478–485.
19. **Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Gelfand A. V. et al.** Microstructured Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 79–90.
20. **Munk B.** Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. *J. Wiley & Sons*, 2000.
21. **Kasyanov A. O., Obukhovets V. A.** Frequency-selective surfaces. Main areas of application. *Antennas*, 2005, no. 9, pp. 4–12. (in Russ.)
22. **Holloway C. L., Kuester E. F., Gordon J. A. et al.** An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 10–35.
23. **Glybovski S. B., Tretyakov S. A., Belov P. A., Kivshar Y. S., Simovski C. R.** Metasurfaces: From microwaves to visible. *Phys. Reports*, 2016, vol. 634, pp. 1–72.
24. **Möller K. D., Warren J. B., Heaney J. B., Kotecki C.** Cross-shaped bandpass filters for the near- and mid-infrared wavelength regions. *Appl. Opt.*, 1996, vol. 35, pp. 6210–6215.
25. **Chase S. T., Joseph R. D.** Resonant array bandpass filters for the far infrared. *Appl. Opt.*, 1983, vol. 22, pp. 1775–1779.
26. **Kuznetsov S. A., Astafiev M. A., Sklyarov V. F., Lazorsky P. A., Arzhannikov A. V.** Spectral measurements of the dielectric properties of polypropylene films in the subterahertz frequency range. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 15–38. (in Russ.)
27. **Rosenberg G. V.** Optics of thin-layer coatings. Moscow, GIFML, 1958. (in Russ.)
28. **Kaplan A. E.** On the reflectivity of metal films in the microwave and radio ranges. *Radio engineering and electronics*, 1964, no. 10, pp. 1781–1787. (in Russ.)
29. **Carli B.** Reflectivity of metallic films in the infrared. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, vol. 67, no. 7, pp. 908–910.
30. **Casey J. P., Lewis E. A.** Interferometer Action of a Parallel Pair of Wire Gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, vol. 42, pp. 971–977.
31. **Renk K. F., Genzel L.** Interference Filters and Fabry-Perot Interferometers for the Far Infrared. *Appl. Opt.*, 1962, vol. 1, pp. 643–648.
32. **Ulrich R., Renk K. F., Genzel L.** Tunable Submillimeter Interferometers of the Fabry-Perot Type. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1963, vol. 11, no. 5, pp. 363–371.

33. **Rawcliffe R. D., Randall C. M.** Metal Mesh Interference Filters for the Far Infrared. *Appl. Opt.*, 1967, vol. 6, pp. 1353–1358.
34. **Sakai K., Fukui T., Tsunawaki Y., Yoshinaga H.** Metallic mesh bandpass filters and Fabry-Perot interferometer for the far infrared. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1969, no. 8, pp. 1046–1055.
35. **Steup D.** A tuneable 600 GHz bandpass-filter with large free-spectral-range. *Int. J. Infrared Milli Waves*, 1992, no. 13, pp. 1767–1779.
36. **Kozlov G. V., Volkov V. V.** Coherent Source Submillimeter Wave Spectroscopy. In: Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids (Topics in Applied Physics, Vol. 74). Ed. by G. Gruener. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1998, pp. 51–109.

Информация об авторах

Алина Анатольевна Рыбак, аспирант 4-го курса НГУ

WoS Researcher ID AAR-1373-2020

Scopus Author ID 57216637852

Сергей Александрович Кузнецов

WoS Researcher ID A-6723-2014

Scopus Author ID 56426776500

Андрей Васильевич Аржанников, доктор физико-математических наук

WoS Researcher ID C-2443-2019

Scopus Author ID 7004910972

Назар Александрович Николаев, кандидат технических наук

WoS Researcher ID AAN-1279-2019

Scopus Author ID 56363884600

Information about the Authors

Alina A. Rybak, Post-Graduate Student

WoS Researcher ID AAR-1373-2020

Scopus Author ID 57216637852

Sergei A. Kuznetsov

WoS Researcher ID A-6723-2014

Scopus Author ID 56426776500

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher ID C-2443-2019

Scopus Author ID 7004910972

Nazar A. Nikolaev, Candidate of Science (Technology)

WoS Researcher ID AAN-1279-2019

Scopus Author ID 56363884600

*Статья поступила в редакцию 16.11.2021;
одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 10.12.2021
The article was submitted 16.11.2021;
approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 10.12.2021*

От редактора

2021 год прошел в Новосибирском государственном университете под знаком 60-летия физического факультета. По этой причине редакционная коллегия «Сибирского физического журнала» приняла решение опубликовать серию статей, посвященных описанию нынешнего статуса кафедр, учебно-научных и научно-исследовательских подразделений физфака, занятых подготовкой научно-инженерных кадров по всем ее уровням: бакалавриат, магистратура, аспирантура и докторантура. Ориентиром для осуществления этой серии публикаций послужил самый первый выпуск нашего журнала, который вышел в 2006 году под названием «Вестник НГУ. Серия: Физика». Этот первый выпуск в полной мере отразил статус, к которому пришел факультет по результатам его развития за сорок пять лет со дня основания. Подробное описание работы кафедр физфака того времени и составило содержание выпуска. Поскольку пандемия коронавируса не позволила редакционной коллегии СФЖ реализовать в 2021 году задуманную серию статей, посвященных 60-летию ФФ, то было принято решение опубликовать эти статьи в учебно-методическом разделе нескольких выпусков журнала в наступившем 2022 году. Таким образом, учебно-методический раздел первого выпуска 17-го тома СФЖ открывает серию статей, которые отражают состояние подготовки научно-инженерных кадров на физическом факультете НГУ в настоящее время.

А. В. Аржанников
главный редактор журнала

Учебно-методическая статья

УДК 378.1 + 51-7

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-94-103

Кафедра высшей математики физического факультета Новосибирского государственного университета

Виктор Алексеевич Александров ¹
Ольга Анатольевна Богоявленская ²
Александр Петрович Ульянов ³

¹⁻³ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

^{1,2} Институт математики им. С. Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ v.aleksandrov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6622-8214>

² o.bogoiavlenskaia@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3115-8236>

³ a.ulyanov@g.nsu.ru

Аннотация

В статье представлена кафедра высшей математики физического факультета Новосибирского государственного университета. Рассказывается об истории создания кафедры, ее традициях и методах, которые используют ее преподаватели. Читатель также узнает некоторые основные сведения о коллективе кафедры и особенностях преподаваемых курсов.

Ключевые слова

математический анализ, линейная алгебра, дифференциальные уравнения, теория функций комплексного переменного, теория вероятностей, математическая статистика, вычислительные методы

Для цитирования

Александров В. А., Богоявленская О. А., Ульянов А. П. Кафедра высшей математики физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 94–103. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-94-103

Higher Mathematics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University

Victor A. Aleksandrov ¹, Olga A. Bogoyavlenskaya ²
Alexander P. Ulyanov ³

¹⁻³ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

^{1,2} Sobolev Institute of Mathematics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ v.aleksandrov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6622-8214>

² o.bogoiavlenskaia@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3115-8236>

³ a.ulyanov@g.nsu.ru

Abstract

The article presents the higher mathematics chair of the physics department at Novosibirsk State University, describing the history of its creation, its traditions, and methods used by its lecturers. The reader can also find here some general information about the staff and the courses taught.

© Александров В. А., Богоявленская О. А., Ульянов А. П., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 94–103

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 94–103

Keywords

mathematical analysis, linear algebra, differential equations, complex analysis, probability theory, mathematical statistics, computational methods

For citation

Aleksandrov V. A., Bogoyavlenskaya O. A., Ulyanov A. P. Higher Mathematics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 94–103. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-94-103

Введение

Кафедра высшей математики обеспечивает преподавание всех математических курсов, читаемых на физическом и геолого-геофизическом факультетах Новосибирского государственного университета. На кафедре работает более 90 преподавателей. Большинство них – совместители, основным местом работы которых являются различные институты Сибирского отделения Российской академии наук. Тем самым студенты уже на младших курсах встречаются с активно работающими учеными. В этом проявляется одна из существенных особенностей НГУ.

История становления кафедры

Кафедра была создана в мае 1989 г. и к настоящему времени работает уже более 32 лет.

Конечно, студентам-физикам преподавали математику с самого начала создания университета, т. е. с 1959 г. Но к 1989 г. в полной мере проявились недостатки той ситуации, когда разные математические курсы на физическом факультете читали разные кафедры механико-математического факультета. Это затрудняло согласование программ как между математическими предметами, так и между математическими и физическими курсами. Необходимость устранить это затруднение и была главной причиной создания кафедры высшей математики физического факультета. В процессе создания кафедры были пересмотрены программы всех математических курсов, читаемых на физическом факультете. Эту работу проделал основатель и первый заведующий кафедрой канд. физ.-мат. наук, проф. В. В. Иванов, руководивший кафедрой 17 лет подряд.

В дальнейшем программы модернизировались как по мере возникновения необходимости адаптировать математические курсы к изменениям в курсах физики, читаемых на факультете, так и по мере появления новых образовательных стандартов. Последнее, к сожалению, обычно сводится к административному уменьшению количества учебных часов, отводимых на изучение математики. Иногда кафедре приходится разрабатывать и совершенно новые курсы. Например, в 2013–2019 гг. кафедра обеспечивала преподавание всех математических курсов студентам-физикам Русско-китайского института Хэйлунцзянского университета в городе Харбине в Китайской Народной Республике. Преподавание велось на русском языке по специально разработанным на кафедре программам. По некоторым курсам были даже изданы учебные пособия. К сожалению, в 2020 г. это сотрудничество было прервано из-за прекращения сообщения между странами, вызванного пандемией COVID-19. Другим примером может служить создание курса высшей математики, чтение которого на геолого-геофизическом факультете НГУ кафедра обеспечивает с 2017 г. по настоящее время.

В 2006–2016 гг. кафедрой заведовал д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. Александров. С декабря 2016 г. по настоящее время заведующим кафедрой является PhD, доц. А. П. Ульянов.

Особенности преподавания и структура курсов

Особенности преподавания на кафедре определяются теми задачами, которые кафедра ставит перед собой.

Во-первых, мы считаем, что должны дать студентам утилитарные математические знания и навыки, которые нужны им для усвоения физических курсов, читаемых на нашем факультете. Более того, мы стремимся сообщить эти знания и выработать соответствующие навыки до того, как они потребуются в физических курсах. Это наша программа-минимум. Тем, кто не справился с ней, мы ставим двойки на экзаменах.

Во-вторых, мы хотим дать прочное основание математическим знаниям, полученным студентами. Мы стремимся показать студентам логику построения изучаемых математических теорий, научить их рассуждать логически и доказывать теоремы. Ни в коем случае мы не хотим, чтобы наши курсы превратились в сборник «кулинарных рецептов» – «делай так-то, и получишь то-то». Тем, кто справился с этой задачей, мы ставим четверки и пятёрки на экзаменах.

В-третьих, мы хотим научить наших студентов читать толстые учебники и современные научные статьи, для того чтобы они могли сами осваивать те разделы математики (например, вейвлет-преобразования), которые им не были рассказаны в обязательных курсах в университете, но которые понадобились им в их (будущей) исследовательской работе. Мы очень ценим таких студентов, потому что видим в них будущую гордость факультета.

Судя по обратной связи, которую получают преподаватели кафедры, наши студенты одобряют как эти принципы, так и методы их реализации и считают, что в целом кафедре удастся реализовать их на практике.



Студенты второго курса физфака НГУ
на лекции по «Основам функционального анализа» в аудитории им. Мальцева
23 октября 2021 г.
Second-year students of the NSU Physics Department
at a Fundamentals of Functional Analysis lecture in the Maltsev lecture hall,
October 23, 2021

Особенностью преподавания математики на физфаке НГУ, которой нет, например, на мехмате НГУ, является то, что наряду с двумя традиционными формами обучения – лекциями и семинарами – мы применяем еще и третью форму обучения – прием заданий. Задания по каждому предмету составляются лектором заранее, доводятся до студентов в начале учебного года и состоят из блоков по 10–15 задач, соответствующих темам, пройденным по данному предмету в течение месяца. Обычно задания не являются индивидуальными (т. е. все студенты данного потока решают одни и те же задачи). Но по некоторым предметам, например по «Линейной алгебре и геометрии» и «Теории вероятностей и математической статистике», задания частично индивидуальны. В каждой учебной группе задания принимает се-

минарист в течение всего семестра во внеучебное время. Сдать задачу означает рассказать ее решение преподавателю и ответить на возникающие по ходу вопросы.

Метод заданий приучает студентов к систематической работе в семестре (поскольку физически невозможно сдать такое количество задач в течение одной зачетной недели) и к взаимопомощи в учебе, когда более сильные студенты объясняют решение задач более слабым (поскольку просто переписанное решение не помогает: нужно уметь ответить на вопросы преподавателя, понимать ход решения и знать соответствующую теорию). Наконец, сдача заданий служит хорошей подготовкой к экзамену, поскольку дает студентам опыт общения с преподавателями, приучает их связно излагать свои мысли, слышать вопросы преподавателя и аргументированно отвечать на них.

Кратко перечислим учебные дисциплины кафедры по состоянию на 2021/2022 учебный год. Но сначала сделаем несколько замечаний. По большинству из учебных дисциплин каждую неделю проходит 1 пара лекций, 1 пара практических занятий и 1 пара сдачи заданий. Если по какому-то предмету предусмотрено иное количество учебных часов, то это явно указано ниже. На некоторых предметах предусмотрены потоковые контрольные работы от одного до трех раз в семестр. На первом курсе бакалавриата студенты отделения общей физики и отделения физической информатики изучают математику совместно по одним программам. Со второго года они учатся по разным программам, но некоторые предметы всё-таки остаются общими. Наконец, отметим, что на общефизическом потоке есть обязательная дисциплина «Методы математической физики», но ниже мы ее не упоминаем, поскольку по традиции ее читает кафедра теоретической физики.

Первый семестр

- «Основы математического анализа» (в неделю 2 пары лекций, 2 пары практических занятий, 1–2 пары сдачи заданий): предел и непрерывность функций одной переменной; дифференциальное исчисление функций одной переменной; интеграл Римана; числовые и функциональные ряды;
- «Линейная алгебра и геометрия»: векторная алгебра и геометрия; матрицы, комплексные числа, многочлены; фигуры второго порядка; начала линейной алгебры; определители.

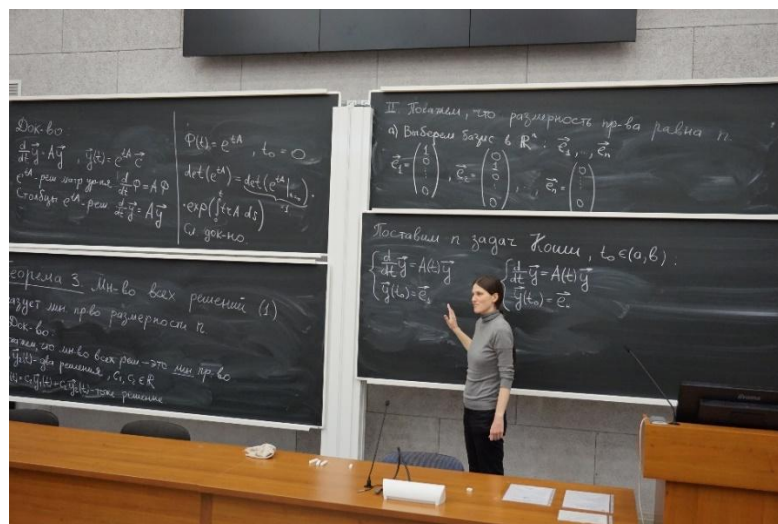
Второй семестр

- «Основы математического анализа» (в неделю 2 пары лекций, 2 пары практических занятий, 1–2 пары сдачи заданий): дифференциальное исчисление функций многих переменных; мера и интеграл; кратные и поверхностные интегралы, векторные поля и дифференциальные формы;
- «Линейная алгебра и геометрия»: линейные операторы; пространства со скалярным произведением; основы обработки данных; начала дифференциальной геометрии; группы и алгебры.

Отделение общей физики

Третий семестр

- «Теория функций комплексного переменного»: элементарные функции; комплексное дифференцирование и интегрирование; ряды; вычеты и интегралы; введение в асимптотические методы;
- «Основы функционального анализа»: ряды Фурье; преобразование Фурье; преобразование Лапласа; обобщенные функции;
- «Дифференциальные уравнения»: уравнения первого порядка; системы и уравнения высокого порядка; общая теория линейных систем; линейные системы с постоянными коэффициентами; линейные уравнения высокого порядка; краевые задачи.



Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель М. А. Скворцова читает лекцию по дифференциальным уравнениям для студентов второго курса физфака в аудитории им. Мальцева 6 ноября 2021 г.

Candidate of Sciences, Senior Lecturer M. A. Skvortsova lectures on differential equations to second-year students of the Physics Department in the Maltsev lecture hall, November 6, 2021

Четвертый семестр

- «Основы функционального анализа»: геометрия пространств со скалярным произведением; ортогональные многочлены; ограниченные операторы в гильбертовых пространствах; интегральные уравнения;
- «Дифференциальные уравнения»: вариационное исчисление; малые колебания и периодические решения; зависимость решений от начальных данных и параметров; введение в теорию устойчивости; фазовые траектории автономных систем; первые интегралы и линейные однородные уравнения в частных производных первого порядка.

Пятый семестр

- «Векторный и тензорный анализ»: ортогональные тензоры в геометрии и механике; тензорная алгебра; тензорные поля;
- «Теория вероятностей и математическая статистика»: классическая вероятностная модель; размещение частиц по ячейкам; статистики Максвелла – Больцмана, Бозе – Эйнштейна, Ферми – Дирака; независимые события, схема Бернулли; условная вероятность, формула полной вероятности; случайные величины, функции распределения; коэффициент корреляции; сходимости по распределению; сходимости с вероятностью единицы; центральная предельная теорема; эмпирическая функция распределения; задача оценивания неизвестных параметров; задача линейной регрессии; доверительные интервалы для параметров нормального распределения; проверка гипотез; критерии согласия Колмогорова и хи-квадрат.

Седьмой семестр

- «Основы вычислительной физики»: решение конечных уравнений; вычисление интегралов; интерполяция и аппроксимация; решение обыкновенных дифференциальных уравнений; решение задач линейной алгебры; решение задачи Коши для уравнения диффузии; дискретное преобразование Фурье; нелинейное уравнение Шрёдингера; решение нелинейных операторных уравнений; уравнение переноса; метод Бубнова – Галёркина, метод конечных элементов; генерация последовательности случайных чисел.



Кандидат физико-математических наук, доцент Е. П. Волокитин ведет семинар по дифференциальным уравнениям для студентов одной из групп второго курса физфака НГУ 8 ноября 2021 г.

Candidate of Sciences, Docent E.P. Volokitin in a Differential Equations recitation with a group of second-year students of the Physics Department, November 8, 2021

Отделение физической информатики

Третий семестр

- «Основы функционального анализа и теории функций»: элементы теории функций комплексного переменного; ряды Фурье; преобразование Фурье; операционное исчисление; обобщённые функции;
- «Дискретная математика»: алгебра высказываний и булевы функции; элементы комбинаторики; азбука теории графов; сложность алгоритмов.

Четвертый семестр

- «Основы функционального анализа и теории функций»: геометрия пространств со скалярным произведением; интегральные уравнения; вариационное исчисление;
- «Дискретная математика»: алгоритмы и их сложность; линейное программирование; матроиды; приближённые алгоритмы решения комбинаторных задач; элементы теории кодирования;
- «Методы математической физики» (в неделю 1 пара лекций, 2 пары практических занятий, 1–2 пары сдачи заданий): элементы общей теории; системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка; линейные дифференциальные уравнения произвольного порядка; автономные системы, элементы теории устойчивости; элементы аналитической теории линейных дифференциальных уравнений второго порядка; краевые задачи для линейных уравнений, задача Штурма – Лиувилля.

Пятый семестр

- «Методы математической физики» (в неделю 1 пара лекций, 2 пары практических занятий, 1–2 пары сдачи заданий): линейные уравнения в частных производных первого и второго порядка; гиперболические уравнения; эллиптические уравнения; параболические уравнения; системы уравнений первого порядка с частными производными;
- «Теория вероятностей и математическая статистика» (вместе с отделением общей физики).

Седьмой семестр.

- «Основы вычислительной физики» (вместе с отделением общей физики).

Подготовка и публикация методических материалов

За время существования кафедры ее преподавателями издано около 60 учебных пособий. Среди пособий, изданных в последние 10 лет, особенно отметим следующие два, выделяющиеся не только высоким методическим уровнем, но и тем, что каждое из них полностью покрывает теоретический материал соответствующего курса:

- онлайн видео-курс «Основы математического анализа»¹, записанный в 2014/2015 учебном году канд. физ.-мат. наук, доц. Г. В. Дятловым. Отметим также, что этот курс лекций полностью опубликован в виде семи учебных пособий [1–7].
- учебное пособие по курсу «Основы вычислительной физики» в двух частях [8; 9], изданное канд. физ.-мат. наук, старшим преподавателем С. В. Смирновым.

Научная работа на кафедре

Кафедра не является выпускающей, поэтому среди наших преподавателей нет ни одного выпускника нашей кафедры. Все мы закончили разные кафедры мехмата НГУ или физфака НГУ, или аналогичные факультеты других российских и зарубежных университетов. Как следствие, преподаватели кафедры имеют очень разные научные интересы, и невозможно говорить какой-то единой тематике научных исследований, проводимых на кафедре. Но научные исследования ведутся.

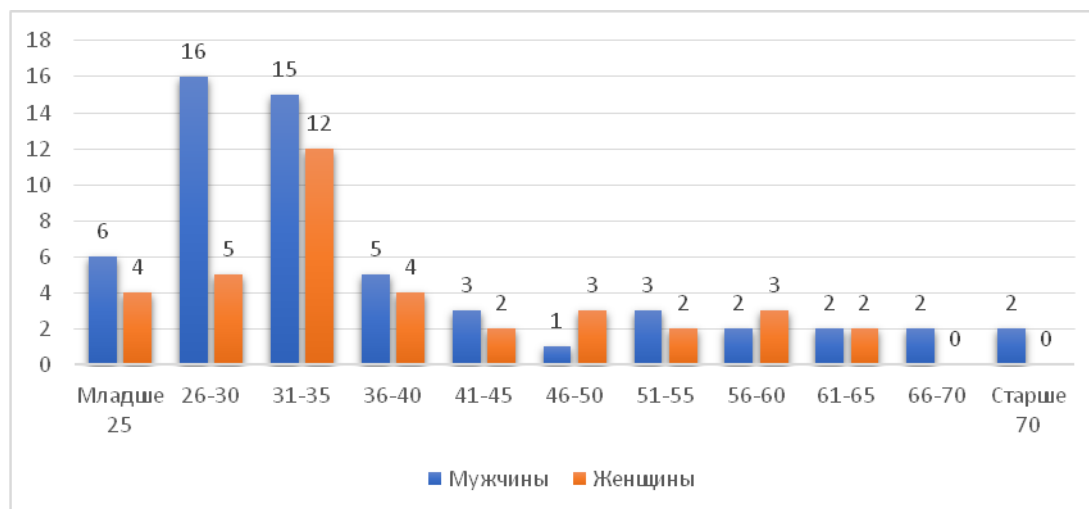
Самым ярким результатом, полученным на кафедре за последние 5 лет, безусловно, является решение проблемы Эйлера, опубликованное канд. физ.-мат. наук, старшим преподавателем кафедры А. В. Гавриловым в статье [10]. В ней он доказал, что в трехмерном евклидовом пространстве существует не всюду равный нулю установившийся гладкий поток идеальной несжимаемой жидкости, при котором жидкость остается неподвижной вне некоторого шара достаточно большого радиуса. Проблему о том, существуют ли такие потоки, знал еще Леонард Эйлер. Несколько столетий она не поддавалась решению. Среди специалистов даже существовало мнение, что таких потоков быть не может. Статья А. В. Гаврилова [10] вызвала большой резонанс в математическом сообществе и получила международное признание.

Кадровый состав кафедры

В 2021/2022 учебном году на кафедре работает 94 преподавателя, в том числе 2 профессора, 17 доцентов, 46 старших преподавателей, 24 ассистента и 5 почасовиков. Среди сотрудников кафедры есть 4 доктора физико-математических наук, 48 кандидатов физико-математических наук и 4 обладателя степени PhD по математике, полученной в зарубежных университетах. При этом только 15 преподавателей кафедры являются штатными сотрудниками

¹ Дятлов Г. В. Онлайн видео-курс «Основы математического анализа». 2014/2015 учебный год. URL: <http://www.phys.nsu.ru/ok03/matan1415.html>. URL: <http://matan.dyatlov.org>.

НГУ. Большинство преподавателей (а именно 74 человека) работают по совместительству. Средний возраст преподавателей 38 лет.



Возрастной состав кафедры высшей математики физического факультета
Age structure for the Higher Mathematics Chair of the Physics Department

Большинство преподавателей кафедры являются выпускниками Новосибирского государственного университета. Но есть и выпускники других российских и зарубежных университетов. Например, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель А. В. Гаврилов – выпускник мехмата Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель Г. А. ван Беверн – выпускница мехмата Томского государственного университета; а канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель У. Искакова – выпускница математического факультета Казахского государственного университета им. аль-Фараби (Алма-Ата).

Среди наших преподавателей есть обладатели ученой степени доктора философии (PhD), получившие ее в зарубежных университетах. Например, доц. А. П. Ульянов получил степень PhD по алгебраической геометрии в Университете штата Пенсильвания (Penn State, USA); канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель Н. В. Бускин получил степень PhD по алгебраической геометрии в Массачусетском университете в Амхерсте (UMass, USA); а старший преподаватель Т. В. Прасолов получил степень PhD по теории вероятностей в Университете Хериот-Уатт (Heriot-Watt University, Scotland).

Преподаватели кафедры регулярно получают гранты для проведения научных исследований. Например, гранты Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых получили канд. физ.-мат. наук, доц. А. С. Сердюков (в 2020 г.) и канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель О. И. Криворотько (в 2021 г.). Но, конечно, эти гранты связаны с их исследованиями по основному месту работы, ведь грантов для поддержки преподавателей младших курсов университетов в России просто нет.

Среди преподавателей кафедры есть и представители высокотехнологических компаний. Например, упоминавшийся выше в связи с онлайн видео-курсом «Основы математического анализа» канд. физ.-мат. наук, доц. Г. В. Дятлов является директором Новосибирского технологического центра компании «Бейкер Хьюз» (Baker Hughes).

Мы считаем, что для студентов-физиков очень важно с самого начала обучения в НГУ видеть перед собой преподавателей, получивших очень разное образование и работающих в самых разных разделах математики, физики и их приложений: от штатных преподавателей

НГУ и совместителей из институтов Сибирского отделения Российской академии наук до представителей больших наукоёмких компаний.

Заключение

Дополнительную информацию, например программы и задания любого из курсов, читатель может найти на сайте кафедры. Деликатность ситуации состоит в том, что в момент написания этой статьи сайт кафедры находится по адресу <http://www.phys.nsu.ru/ok03/>, в то время как в момент выхода этой статьи из печати он уже может быть передвинут на новый адрес <https://www.nsu.ru/n/physics-department/departments/kafedra-vysshey-matematiki/>, поэтому мы указываем здесь оба адреса.

Список литературы

1. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 1. Предел и непрерывность функций одной переменной. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2014. 80 с. ISBN 978-5-86134-147-9
2. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 2. Дифференциальное исчисление функций одной переменной. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2014. 62 с. ISBN 978-5-86134-149-3
3. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 3. Интеграл Римана. Часть 4. Числовые ряды. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2014. 66 с. ISBN 978-5-86134-151-6
4. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 5. Дифференциальное исчисление функций многих переменных. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2014. 68 с. ISBN 978-5-86134-153-0
5. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 6. Мера и интеграл. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2014. 56 с. ISBN 978-5-86134-157-8
6. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 7. Анализ на многообразиях в конечномерных арифметических пространствах. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2015. 64 с. ISBN 978-5-86134-159-2
7. **Дятлов Г. В.** Основы математического анализа для студентов-физиков. Лекции. Часть 7. Анализ на многообразиях в конечномерных арифметических пространствах (окончание). Часть 8. Функциональные последовательности и ряды. Новосибирск: Ин-т математики СО РАН, 2015. 64 с. ISBN 978-5-86134-163-9
8. **Смирнов С. В.** Основы вычислительной физики: Учебное пособие. Часть 1. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. 113 с. ISBN 978-5-4437-0429-6
9. **Смирнов С. В.** Основы вычислительной физики: учебное пособие. Часть 2. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. 104 с. ISBN 978-5-4437-0676-4
10. **Gavrilov A. V.** A steady Euler flow with compact support. *Geometric and Functional Analysis*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 190–197. DOI 10.1007/s00039-019-00476-6

References

1. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 1. Limit and continuity of functions of one variable. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2014, 80 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-147-9
2. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 2. Differential calculus of functions of one variable. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2014, 62 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-149-3

3. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 3. The Riemann integral. Part 4. Infinite series. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2014, 66 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-151-6
4. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 5. Differential calculus of functions of several variables. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2014, 68 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-153-0
5. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 6. Measure and integral. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2014, 56 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-157-8
6. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 7. Analysis on manifolds in finite-dimensional spaces. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2015, 64 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-159-2
7. **Dyatlov G. V.** The fundamentals of mathematical analysis for physics students. Lectures. Part 7. Analysis on manifolds in finite-dimensional spaces (continued). Part 8. Sequences and series of functions. Novosibirsk, Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 2015, 64 p. (in Russ.) ISBN 978-5-86134-163-9
8. **Smirnov S. V.** The fundamentals of computational physics: a tutorial. Part 1. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 2015, 113 p. (in Russ.) ISBN 978-5-4437-0429-6
9. **Smirnov S. V.** The fundamentals of computational physics: a tutorial. Part 2. Novosibirsk, Novosibirsk State University, 2017, 104 p. (in Russ.) ISBN 978-5-4437-0676-4
10. **Gavrilov A. V.** A steady Euler flow with compact support. *Geometric and Functional Analysis*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 190–197. DOI 10.1007/s00039-019-00476-6

Информация об авторах

Виктор Алексеевич Александров, доктор физико-математических наук, доцент

WoS Researcher ID F-5715-2013

Scopus Author ID 7006723631

SPIN 4938-9373

Ольга Анатольевна Богоявленская, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher ID F-9713-2019

Scopus Author ID 55783131900

Александр Петрович Ульянов, PhD по математике

Scopus Author ID 8888574700

Information about the Authors

Victor A. Aleksandrov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Docent

WoS Researcher ID F-5715-2013

Scopus Author ID 7006723631

SPIN 4938-9373

Olga A. Bogoyavlenskaya, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher ID F-9713-2019

Scopus Author ID 55783131900

Alexander P. Ulyanov, PhD in Mathematics

Scopus Author ID 8888574700

Статья поступила в редакцию 14.11.2021;

одобрена после рецензирования 01.02.2022; принята к публикации 01.02.2022

The article was submitted 14.11.2021;

approved after reviewing 01.02.2022; accepted for publication 01.02.2022

Учебно-методическая статья

УДК 538.9

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

Кафедра физики полупроводников физического факультета Новосибирского государственного университета

Виталий Львович Альперович¹

Зе Дон Квон²

Александр Васильевич Латышев³

¹⁻³ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹⁻³ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ alper@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0069-1983>

² kvon@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7873-0757>

³ latyshev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4016-593X>

Аннотация

Кафедра физики полупроводников физического факультета НГУ готовит специалистов для научно-исследовательской работы в области физики конденсированного состояния, физики полупроводников и физики низкоразмерных систем и наноструктур. Кафедра дает знания, обеспечивающие возможность ее выпускникам участвовать в развитии полупроводниковых технологий, совершенствовании существующих и создании новых приборов оптоэлектроники, микро- и наноэлектроники. В статье изложена история создания кафедры, прослежены основные этапы формирования учебных курсов и работы по организации научно-исследовательской практики студентов в лабораториях Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова (ИФП СО РАН) – базового Института кафедры. Дан обзор преподаваемых на кафедре учебных курсов для подготовки бакалавров и магистров. Рассказано о научных и технологических достижениях ИФП СО РАН, об имеющемся в лабораториях Института уникальном измерительном, аналитическом и технологическом оборудовании, что служит основой для организации научно-исследовательской работы студентов на высоком научно-методическом уровне.

Ключевые слова

физика полупроводников, физика конденсированного состояния, теория твердого тела, физика поверхности, низкоразмерные системы, гетероструктуры, электронный транспорт, атомная структура, гетерозепитаксия, оптические явления, радиационная физика, нанодиагностика, квантовые технологии

Для цитирования

Альперович В. Л., Квон З. Д., Латышев А. В. Кафедра физики полупроводников физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 104–117. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

© Альперович В. Л., Квон З. Д., Латышев А. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 104–117

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 104–117

Department of Semiconductor Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University

Vitaly L. Alperovich¹, Ze Don Kvon²
Alexander V. Latyshev³

¹⁻³ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁻³ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ alper@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0069-1983>

² kvon@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7873-0757>

³ latyshev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4016-593X>

Abstract

The Department of Semiconductor Physics at the Faculty of Physics, Novosibirsk State University, trains specialists for research work in the field of condensed matter physics, semiconductor physics and the physics of low-dimensional systems and nanostructures. It also provides knowledge enabling its graduates to participate in developing semiconductor technologies, improving existing and creating new opto-, micro- and nanoelectronic devices. The article describes the history of the creation of the department, the main stages of the formation of training courses and work on the organization of students' research practice in the laboratories of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (ISP), which is the basic Institute for the department. An overview of the training courses taught at the department for the preparation of bachelors and masters is given. It is told about the scientific and technological achievements of ISP, and about unique measuring, analytical and technological equipment available in the laboratories of the Institute, which is the basis for organizing research work of students at a high scientific and methodological level.

Keywords

semiconductor physics, condensed matter physics, solid state theory, surface physics, low-dimensional systems, heterostructures, electronic transport, atomic structure, heteroepitaxy, optical phenomena, radiation physics, nanodiagnostics, quantum technologies

For citation

Alperovich V. L., Kvon Z. D., Latyshev A. V. Department of Semiconductor Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 104–117. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-104-117

Введение

Научно-техническая революция в конце XX в., ознаменовавшая начало эпохи тотальной коммуникации, связана в первую очередь с полупроводниками, так как они являются ее технологическим фундаментом. Более того, именно один из полупроводников, кремний (Si), является в XXI в. материалом номер один, потому что элементная база всей современной электроники, начиная с суперкомпьютеров и заканчивая мобильными устройствами в руках каждой домохозяйки, представляет собой сверхбольшие интегральные схемы, ключевым и основным элементом которых являются кремниевые полевые транзисторы нанометровых размеров. К сказанному можно добавить, что произошедшая на наших глазах революция в производстве осветительных устройств, когда на смену лампам накаливания и газоразрядным светильникам пришли светодиодные источники освещения, также вызвана достижениями в физике и технологии полупроводников.

С другой стороны, многие выдающиеся открытия в физике последних десятилетий были сделаны именно в полупроводниковых системах. Достаточно вспомнить целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла, глубина и общезначимое значение которых такова, что они демонстрируют абсолютно уникальное событие в истории Нобелевских премий: две Нобелевские премии были присуждены за эффекты, иллюстрирующиеся одной экспериментальной зависимостью. Также нельзя не вспомнить всем известный графен, который пред-

ставляет собой первый двумерный полупроводник, и так называемые топологические изоляторы, являющиеся, с одной стороны, новыми разновидностями полупроводников, а с другой – реализацией новых квантовых состояний вещества.

Сказанного выше более чем достаточно, чтобы прийти к выводу о том, что современная физика полупроводников оказалась в начале XXI в. самой актуальной физической дисциплиной с точки зрения как прикладной, так и фундаментальной физики.

История создания кафедры

Кафедра физики полупроводников была основана в 1963 г. академиком Анатолием Васильевичем Ржановым, который руководил ею более 25 лет. Основные спецкурсы читали А. В. Ржанов, А. Ф. Кравченко, А. В. Чаплик, С. В. Богданов и Ф. Л. Эдельман. В 1972 г. учебный план кафедры существенно перерабатывается; студентам предлагаются новые спецкурсы: «Оптические явления в полупроводниках» (К. К. Свиташев), «Акустика кристаллов» (И. Б. Яковкин), «Электрон-фононные взаимодействия в полупроводниках» (С. В. Богданов), «Микроэлектроника» (С. П. Синица), «Неустойчивости тока в полупроводниках» (П. А. Бородавский). В начале восьмидесятых добавились курсы «Электронные свойства неупорядоченных полупроводников» (Э. М. Баскин) и «Радиационная физика полупроводников» (Н. Н. Герасименко).

С 1990 по 2010 г. кафедрой руководил Заслуженный деятель науки РФ д-р физ.-мат. наук, проф. Александр Сергеевич Терехов. В этот период была проведена кардинальная перестройка учебного плана. Теперь он включал общие спецкурсы: «Введение в специальность» (А. С. Терехов), «Кристаллофизика полупроводников» (С. И. Чикичев), «Теория твердого тела» (А. В. Чаплик), «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем» (Д. З. Квон). По всем общим спецкурсам были введены семинарские занятия. В учебный план были также добавлены спецкурсы более узкого профиля: «Радиационная физика полупроводников» (А. В. Двуреченский), «Физическая акустика твердого тела» (Д. В. Петров), «Электронные свойства полупроводников с примесями и дефектами» (Э. М. Баскин).

Переход НГУ на двухуровневую систему образования в 1994 г. вносит дополнительные изменения в учебный план. Были введены новые спецкурсы для магистрантов: «Оптические процессы в полупроводниках» (В. Л. Альперович), «Физические основы нанотехнологии» (А. В. Двуреченский), «Гетерозипитаксия» (А. В. Латышев), «Квантовый транспорт в низкоразмерных структурах» (А. Г. Погосов), «Нанодиагностика» (А. В. Латышев).

С 2010 г. кафедра физики полупроводников, уже под руководством академика А. В. Латышева, продолжает работу на основе тех же принципов, которые заложил академик А. В. Ржанов и творчески развил профессор А. С. Терехов. В 2016 г. в учебном плане появились еще два новых спецкурса, направленных на углубленное изучение основ физики и технологии современных полупроводниковых приборов: «Полупроводниковая электроника» (Д. Р. Исламов) и «Полупроводниковая оптоэлектроника» (Г. Э. Шайблер). В настоящее время на кафедре работают А. В. Чаплик, А. В. Двуреченский, Д. З. Квон, В. Л. Альперович, А. Г. Погосов, О. Е. Терещенко, Л. С. Брагинский, А. В. Ненашев, Д. Р. Исламов, Г. Э. Шайблер, Е. Е. Родякина, Д. М. Казанцев и А. С. Петров. Сайт кафедры: <http://www.phys.nsu.ru/departament/index.php/chairs/fpp>

Специализация и учебные курсы кафедры

На кафедре осуществляется обучение студентов по направлению подготовки: «510104 – Физика полупроводников. Микроэлектроника», а базовым институтом является Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.



Кафедра физики полупроводников в 2014 году.

Сидят: проф. А. В. Двуреченский, проф. З. Д. Квон, проф. А. В. Латышев, проф. В. Л. Альперович, проф. А. Г. Погосов, проф. А. В. Чаплик. Стоят: доцент Л. С. Брагинский, проф. О. Е. Терещенко, доцент А. В. Ненашев

Department of Semiconductor Physics in 2014.

Sitting: Professors A. V. Dvurechenskii, Z. D. Kvon, A. V. Latyshev, V. L. Alperovich, A. G. Pogosov, A. V. Chaplik. Standing: Assistant Professor L. S. Braginsky, Professor O. E. Tereshchenko, Assistant Professor A. V. Nenashev

Программы обучения на кафедре предусматривают получение студентами базовых знаний по физике конденсированного состояния, физики полупроводников и диэлектриков, а также необходимых умений и навыков научно-исследовательской работы с использованием современных полупроводниковых технологий. Обучение начинается в 5-м семестре с годового курса «Введение в физику полупроводников», который преподают профессор В. Л. Альперович и доцент А. В. Ненашев. Цель курса – познакомить студентов с основными идеями, методами и явлениями физики кристаллических твердых тел: металлов, диэлектриков и полупроводников и тем самым подготовить к углубленному изучению отдельных разделов физики полупроводников при дальнейшем обучении на кафедре. Изложение основ физики твердого тела невозможно без использования идей и принципов квантовой механики и статистической физики. Поскольку систематическое изучение этих дисциплин начинается только на 3-м курсе, необходимые для изучения зонной теории твердых тел сведения по квантовой механике и статистической физике излагаются на качественном уровне, без привлечения сложного математического аппарата. Большое внимание уделено центральным идеям физики кристаллических твердых тел: о симметрии кристаллов и квазичастицах. В рамках этого курса, наряду с лекциями и семинарами, в 5-м семестре организуются ознакомительные экскурсии в лаборатории института, которые проводят ведущие научные сотрудники вместе с преподавателями. Это помогает студентам выбрать задачи и руководителей для выполнения научной работы в лабораториях института.

В течение 6-го и 7-го семестров профессор О. Е. Терещенко преподаёт годовой курс «Кристаллофизика полупроводников», который посвящен изучению атомной и электронной структуры кристаллов, основ их физико-химических свойств, а также знакомству с современными методами исследования структуры и электронных свойств твердых тел. В программу курса включены основные вопросы кристаллофизики и кристаллохимии полупроводников: строение атомов и молекул; механизм образования и типы химических связей; теория кристаллических решеток и методы их классификации; теория обратной решетки; зонная структура кристаллов; рост объемных кристаллов и тонких пленок; методы экспериментального определения кристаллических структур с помощью дифракции рентгеновских

лучей и электронов; атомная структура и электронные свойства поверхности полупроводников.

На 4-м курсе преподаются еще два годовых курса. Профессор З. Д. Квон читает курс «Физика полупроводниковых тонких слоев и низкоразмерных систем». Первая часть этого курса посвящена изложению сначала физики приповерхностных слоев пространственного заряда в полупроводниках, а затем структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) и приборов на их основе, прежде всего прибора зарядового сдвига и МДП-транзистора. В МДП-транзисторе в 1966 г. была впервые реализована двумерная электронная система, т. е. он сыграл уникальную роль не только в развитии полупроводниковой индустрии, но и в рождении нового фундаментального направления физики конденсированного состояния – физики низкоразмерных электронных систем. Все открытия физики полупроводников последних 50 лет связаны с рождением и развитием этого направления. Квантовый эффект Холла, дробный квантовый эффект Холла, гетероструктуры – вот неполный список этих открытий, удостоенных Нобелевской премии по физике. Основные идеи и понятия физики низкоразмерных электронных систем являются предметом второй части курса. Здесь рассматриваются энергетический спектр и плотность состояний двумерных, одномерных (квантовые проволоки) и нульмерных (квантовые точки) систем; квантовые макроскопические явления (эффект Аронова – Бома, квантовый эффект Холла); графен, топологические изоляторы, двумерные полуметаллы.

Академик А. В. Чаплик и доцент Л. С. Брагинский преподают годовой курс «Теория твердого тела», который является базовым для понимания электронных свойств металлов, диэлектриков и полупроводников, а также функционирования приборов на их основе. В первой части курса изучаются динамика решетки (фононный спектр кристалла, теплоемкость, роль ангармонизма); электронные спектры (зонная теория) твердых тел (теорема Блоха, квазиимпульс, приближения слабой и сильной связи, эффективная масса, к-р-метод, локализованные состояния электронов в кристаллах) и явления, обусловленные электрон-электронным взаимодействием (статическое и динамическое экранирование, плазменные колебания и затухание Ландау, диэлектрическая проницаемость, переход Мотта, вигнеровская кристаллизация). Во второй части изучается теория кинетических явлений в твердых телах (кинетическое уравнение Больцмана, время релаксации импульса, электро- и теплопроводность, термоэлектрические эффекты, рассеяние электронов на примесях и фононах, электрон-электронное рассеяние, фононная теплопроводность, а также кинетические явления в магнитном поле: эффект Холла, магнетосопротивление, квантовые гальваномагнитные эффекты). Далее рассматриваются оптические явления в твердых телах (решеточное поглощение и комбинационное рассеяние света, поляритоны, поглощение свободными носителями заряда, межзонное поглощение, экситоны, переходы примесь – зона).

В магистратуре, с 1-го по 3-й семестр, на кафедре преподается восемь полугодичных спецкурсов. Курс «Оптические процессы в полупроводниках» (профессор В. Л. Альперович) посвящен основам физики взаимодействия электромагнитного излучения с твердыми телами, знакомству с оптическими методами исследования полупроводников, а также с принципами работы полупроводниковых фотоприемников и светоизлучающих приборов. Вначале обсуждается соотношение между феноменологическим и микроскопическим подходами к описанию оптических свойств вещества; далее изучаются микроскопические механизмы поглощения света в полупроводниках (межзонные оптические переходы, экситонные эффекты, поглощение света на колебаниях решетки и на свободных носителях заряда, оптические переходы с участием примесных уровней); процессы с участием неравновесных носителей заряда (внутренний и внешний фотоэффект, излучательная рекомбинация электронов и дырок); оптические явления в полупроводниковых микроструктурах – квантовых ямах и сверхрешетках. Наряду с традиционными фотоэффектами, рассмотрены оптическая ориентация спинов и выстраивание импульсов электронов, горячая поляризованная фотолюминесценция, фототоки на баллистических и горячих электронах, а также основанные на этих явлениях спек-

троскопические методы исследования энергетического спектра и механизмов рассеяния импульса, энергии и спина электронов.

Член-корреспондент РАН, профессор А. В. Двуреченский преподает курсы «Радиационная физика полупроводников» и «Физические основы нанотехнологии». Цель курса «Радиационная физика полупроводников» – дать базовые знания по основным понятиям, законам и теории микроскопического описания механизмов потерь энергии быстрых частиц при движении в твердом теле. Зачем нужен этот курс: 1) в современном аналитическом оборудовании электронные, ионные, рентгеновские (синхротронные) и лазерные пучки широко используются для исследования структуры и состава материала; 2) тот же набор радиационных воздействий применяется для управления функциональными характеристиками материалов и приборов на их основе.

Задача курса «Физические основы нанотехнологии» – дать базовые знания по основным разделам нанотехнологии полупроводников: методам и подходам, обеспечивающим создание структур, содержащих элементы размерами нанометрового диапазона (1–100 нм), приводящими к принципиально новым свойствам и характеристикам; методам формирования наноструктур на поверхности полупроводниковых кристаллов в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии и эпитаксии из металлоорганических соединений; нанесению металлических и диэлектрических пленок при физическом, химическом и плазменном осаждении материалов, оптической, электронной, рентгеновской и ионной литографии, плазменном и ионном анизотропном селективном травлении.

Академик А. В. Латышев преподает курсы «Гетероэпитаксия» и «Нанодиагностика». Цель курса «Гетероэпитаксия» – дать магистрантам базовые знания по некоторым разделам физики кристаллизации, физики твердого тела и физики полупроводников для понимания структурных процессов, протекающих на поверхности кристалла при сублимации, эпитаксиальном росте, термическом отжиге и фазовых переходах, необходимые для осуществления фундаментальных и прикладных исследований в области физики конденсированных сред и физического материаловедения, физики и технологии твердотельных низкоразмерных систем. В курсе рассматриваются термодинамика поверхности однокомпонентных и многокомпонентных кристаллов, равновесная форма кристалла (теорема Вульфа, поверхностное натяжение, фазовый переход порядок – беспорядок, структура атомных ступеней), поверхностная диффузия, механизмы и кинетика роста кристаллов, термодинамические и кинетические аспекты неустойчивости поверхностной морфологии (эшелонирование ступеней, взаимодействие с дефектами и дислокациями, эффект Швёбеля).

Курс «Нанодиагностика» направлен на формирование у студентов базовых знаний о современных методах диагностики и развитие навыков проведения самостоятельных исследований структуры, химического состава, оптических и электрофизических свойств поверхности твердого тела, микро- и наносистем. В курсе рассматриваются методы измерений состава, структуры и геометрических размеров наноматериалов и наноструктур; разработка стандартных образцов и методик измерений для обеспечения единства измерений в нанометровом диапазоне; взаимодействие электронного пучка с полупроводником (упругое и неупругое рассеяние, дифракция быстрых и медленных электронов); методы сканирующей электронной микроскопии и ионной микроскопии, просвечивающей и отражательной электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии (туннельная и атомно-силовая микроскопия, оптическая микроскопия ближнего поля); оптические методы: эллипсометрия, инфракрасная спектроскопия, Фурье-спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света; методы электронной спектроскопии: Оже-спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; рентгеновские дифракционные методы.

Курс «Квантовый транспорт в низкоразмерных полупроводниковых структурах» преподаёт профессор А. Г. Погосов. Цель спецкурса – обучение студентов основам современных теорий, описывающих квантовый электронный транспорт в низкоразмерных полупроводниковых системах, знакомство с кинетическими явлениями, обусловленными интерференцией

электронных волн, корреляционными эффектами, с методами и подходами, использующимися для их описания. Спецкурс состоит из семи разделов, в которых отражены различные типы квантового электронного транспорта в полупроводниковых структурах пониженной размерности. Основная идея курса – изучение кинетических явлений и эффектов, выходящих за рамки квазиклассического подхода и одноэлектронной зонной теории. Существенное внимание уделено квантовым кинетическим явлениям в полупроводниковых структурах малых размеров – наноструктурах. Эти явления относятся к числу наиболее ярких и интенсивно исследуемых транспортных свойств систем пониженной размерности. Спецкурс включает знакомство с технологией изготовления наноструктур и техникой низкотемпературного эксперимента; квантовые интерференционные явления в неупорядоченных проводниках; баллистический транспорт в низкоразмерных системах; транспорт в сильном магнитном поле (краевые токовые состояния и квантовый эффект Холла); одноэлектронный транспорт (квантовые точки и туннельные нанопереходы, кулоновская блокада, одноэлектронный транзистор); дробный квантовый эффект Холла.

Курс «Полупроводниковая электроника», который преподает доцент Д. Р. Исламов, посвящен технологии создания и физическим принципам работы полупроводниковых приборов. Программа курса включает основные физические явления, лежащие в основе работы полупроводниковых приборов; зонные диаграммы и вольт-амперные характеристики контакта металл-полупроводник и р-п-перехода; принципы работы диода и стабилитрона; гетеропереходы; принцип действия, характеристики и эквивалентные схемы полевых транзисторов на структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП); комплементарные МДП схемы; принцип работы биполярных транзисторов; другие приборы на основе р-п-переходов (тиристоры, симисторы, варикапы, р-і-п-диоды); технологию производства полупроводниковых интегральных схем; полупроводниковые датчики (магнитного поля, давления, температуры); флеш-память (принцип действия, ресурс, скорость чтения и записи); основы цифровой электроники (ключ, инвертор, базовые логические элементы, синхронные и асинхронные схемы, сдвиговый регистр). Особое внимание уделяется компоновке элементной базы в микросхемах для конструирования сложных аналоговых и цифровых схем, а также современным проблемам в развитии технологии интегральных схем (планарная технология, трехмерная технология, металлизация, low- κ диэлектрики).

Спецкурс «Полупроводниковая оптоэлектроника», который преподает доцент Г. Э. Шайблер, дает студентам базовые знания, умения и навыки по устройству, принципам работы, областям применения полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Спецкурс начинается с изучения основных излучающих полупроводниковых приборов – светодиодов и лазеров. Особое внимание уделяется технологии и параметрам современных белых светодиодов, основу которых составляет синий светодиод на гетеропереходе нитрида галлия GaN с твердым раствором InGaN. Далее рассматриваются полупроводниковые фотоприемники: фоторезисторы, фотодиоды, ПЗС-матрицы, КМОП-матрицы, а также солнечные элементы и полупроводниковые фотокатоды с отрицательным электронным средством. Дается обзор полупроводниковых приборов СВЧ и терагерцового диапазона, систем волоконно-оптической связи. Анализируются основные характеристики приборов, которые приводятся в технической документации («даташите»). Излагаются основы технологий, используемых при изготовлении приборов; рассматриваются основные электрические схемы подключения приборов.

В четвертом семестре магистратуры учебных курсов нет; он целиком посвящен научно-исследовательской работе в лабораториях института, подготовке и защите магистерской диссертации.

Научно-исследовательская работа студентов проводится на протяжении всего периода обучения. Два раза в семестр студенты готовят краткие письменные отчеты (с оценкой руководителя) и выступают на заседаниях кафедры с устным отчетом о ходе и результатах научной практики в лабораториях. Наличие публикации по результатам научно-исследователь-

ской работы является необходимым условием успешной защиты магистерской диссертации и получения рекомендации в аспирантуру.

Научно-исследовательская работа в ИФП СО РАН

Научно-исследовательская работа студентов проводится в базовом институте кафедры – Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН, <http://www.isp.nsc.ru>). ИФП СО РАН, созданный в 1964 г., в настоящее время состоялся как признанный исследовательский центр, интегрированный в международное научное сообщество, который совмещает достижения в области фундаментальных исследований с практической реализацией высокотехнологических инновационных разработок, необходимых современной экономике и подготовкой высококвалифицированных научных сотрудников и инженерно-технических специалистов.

ИФП СО РАН принадлежит ведущая роль в реализации целого ряда больших академических и промышленно-ориентированных проектов. Институт имеет немало высококвалифицированных специалистов с многолетним опытом выполнения крупных научно-исследовательских программ. Он также обладает целым набором самого современного научного, технологического и диагностического оборудования. В ИФП СО РАН накоплен огромный опыт по подготовке кадров высшей квалификации, начиная с аспирантуры. Он выпустил в свет сотни кандидатов и десятки докторов наук. Институт тесно связан с ведущими предприятиями высокотехнологической промышленности как в Сибирском регионе, так и во всей России, с федеральными министерствами и ведомствами.

Институт занимает ведущие позиции в области физики полупроводников, физики конденсированного состояния, физики и технологии низкоразмерных систем, опто-, нано- и акустоэлектроники, сенсорики, однофотоники и одноэлектроники, квантовой электроники, спинтроники. Основные фундаментальные достижения Института связаны с исследованием атомных процессов и электронных явлений на поверхности полупроводников и границах раздела полупроводниковых структур, квантовых эффектов в структурах пониженной размерности, в том числе в сверхрешетках и гетероструктурах с квантовыми ямами [1; 2]. Важными представляются работы Института по разработке элементной базы перспективной электронной техники и нового поколения устройств нано- и оптоэлектроники, основанных на использовании низкоразмерных структур, в которых происходит переход к нанометровым масштабам, и, как следствие, определяющую роль начинает играть квантово-механическая природа квазичастиц в твердом теле.



Научная работа студентов кафедры физики полупроводников
Research work of students at the Department of Semiconductor Physics

Одним из основных достижений Института в указанном направлении является разработка технологии выращивания эпитаксиальных полупроводниковых структур с двумерным электронным газом. Такие структуры представляют собой потенциальную яму на основе многослойной эпитаксиальной пленки из атомно-чистых материалов с практически идеальными структурными границами и удаленным легированием, чтобы исключить рассеяние на примесях. На основе гетероструктур AlGaAs/GaAs изготовлены затворно-управляемые квантовые интерферометры, имеющие электронное кольцо с рекордно малым эффективным радиусом 90–130 нм. Отметим, что в России описанные технологии имеются только в ИФП СО РАН.

Суперкомпьютерное моделирование наносистем на основе двумерного электронного газа позволило предсказать целый ряд особенностей электронного транспорта, которые определяются законами квантовой механики, установить топологию удерживающего электроны потенциала, геометрию электронных систем, а также характер квантовых и одноэлектронных явлений, происходящие внутри наноустройств.

ИФП СО РАН входит в число лидеров по разработке технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – одной из основных технологий современной физики полупроводников и полупроводниковой электроники, представляющей собой процесс послойного, контролируемого эпитаксиального роста различных соединений на уровне одного атомного монослоя. Технология МЛЭ позволяет создавать атомарно резкие границы раздела, недоступные в других технологиях. Использование в технологии МЛЭ атомарно-чистых исходных материалов в условиях сверхвысокого вакуума (лучшего, чем в окружающем нас космосе), дает возможность создания материалов и структур с принципиально новыми свойствами [3].

Предельным случаем систем с пониженной размерностью являются нульмерные системы, состоящие из массива атомных кластеров или островков нанометровых размеров в полупроводниковой матрице. Дискретный спектр энергетических состояний в таких кластерах подобен энергетическому спектру отдельных атомов, что позволяет говорить об «искусственных атомах». Такие кластеры получили название «квантовых точек». Предсказываемое теоретически и наблюдаемое экспериментально квантование энергетического спектра носителей заряда (дырок) в квантовых точках германия формирует особенности в транспорте носителей заряда и фотопроводимости [4].

В Институте созданы экспериментальные образцы лазеров с вертикальным резонатором, которые отличаются от обычных полосковых полупроводниковых лазеров расположением брэгговских зеркал резонатора параллельно плоскости полупроводниковой пластины. Лазерная структура содержит более тысячи слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и обеспечивает высокую добротность микрорезонатора. Полученные таким образом излучатели одиночных фотонов с токовой накачкой на основе микрорезонаторных структур с InAs квантовыми точками малой плотности могут быть использованы при создании систем квантовых вычислений, квантовой криптографии и миниатюрных атомных стандартов частоты нового поколения.

Одним из самых заметных достижений ИФП СО РАН является разработка технологии МЛЭ высококачественных структур с HgTe квантовыми ямами. Следует отметить, что подобная технология существует в мире еще только в одном месте – в Вюрцбургском университете (Германия). Замечательным свойством HgTe квантовых ям является тот факт, что в формировании их энергетического спектра ключевая роль принадлежит релятивистским эффектам. Благодаря этим эффектам, в зависимости от толщины указанных ям в них можно реализовать целый набор уникальных квантовых систем. При определенной толщине квантовой ямы ширина запрещенной зоны становится равной нулю, а электроны и дырки становятся безмассовыми дираковскими фермионами. Квантовые ямы с инвертированной зонной структурой являются двумерными топологическими изоляторами. В квантовой яме, изготовленной на основе теллурида ртути, обнаружена новая низкоразмерная система – двумерный полуметалл, состоящий из легких электронов и более тяжелых дырок. В отличие от традиционных трехмерных полуметаллов, таких как висмут, сурьма или графит, в двумерном полу-

металле простым изменением затворного напряжения можно получить любое соотношение между концентрацией двумерных электронов и дырок. В указанной системе предсказан и наблюдается целый ряд новых явлений, вызванных взаимодействием электронов и дырок [5]. Также следует отметить, что на основе МЛЭ технологии HgTe в ИФП СО РАН получены трехмерные топологические изоляторы, обладающие рекордно высокими подвижностями поверхностных дираковских фермионов. Именно благодаря этому достижению впервые был проведен эксперимент по прямому наблюдению жесткой связи импульса и спина – наиболее фундаментальному свойству всех трехмерных топологических изоляторов [6]. В Институте также исследуются трехмерные топологические изоляторы на основе полупроводниковых соединений A_5B_6 (Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 и др.), в которых обнаружены токи двумерных дираковских фермионов, управляемые светом [7].

В течение последних десятилетий усилия физиков и технологов были также направлены на разработку методов и подходов, позволяющих запининговать вихри сверхпроводящего материала и, таким образом, получить материал, способный оставаться сверхпроводящим в сильных магнитных полях. В ИФП СО РАН предложен способ локализации вихрей в наносистемах и перехода в бездиссипативное состояние в относительно высоких магнитных полях [8].

Среди наиболее выдающихся достижений за последние годы в области опто- и фотоэлектроники можно выделить разработку технологии получения полупроводниковых слоев на основе соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ), которое является основным материалом современной микрофотоэлектроники [9]. При создании варизонных структур на основе КРТ были разработаны физические основы детекторной структуры для фотоприемных устройств нового поколения. Линейчатые и матричные фотоприемники на основе ГЭС КРТ МЛЭ предназначены для оснащения инфракрасных тепловизионных систем, применяемых в военной области, медицине, электроэнергетики, наземном, воздушном и водном транспорте, металлургическом и нефтехимическом производствах и строительстве.

Разработанные в Институте уникальные полупроводниковые эмиттеры холодных фотоэлектронов были успешно использованы в международном научном эксперименте, «моделирующим» атомные процессы в ранней Вселенной. Этот эксперимент проводился в Институте ядерной физики (Гейдельберг, Германия) [10].

Следует особо отметить, что фундаментальные свойства наносистем зависят не только от квантовых размерных эффектов, но также от тонкой микроскопической структуры материалов, используемых в технологическом процессе. Поэтому для разработки действующих макетов квантовых электронных приборов и устройств в Институте организован полный замкнутый цикл «изготовление – характеристика», позволяющий оперативно находить оптимальные технологические решения для создания приборов нового поколения. Разрабатываемые подходы базируются на создании модельных квантовых систем с последующим экспериментальным исследованием, численным моделированием и теоретическим анализом оптических и электронных характеристик. Управление атомными и электронными процессами и поиск путей их реализации является главной проблемой на современном этапе развития твердотельных технологий. Ее решение открывает новые возможности конструирования методами зонной инженерии и инженерии волновых функций наноструктур их электронного спектра и свойств, определяемых квантово-механической природой элементарных возбуждений в твердом теле. Всё это и составляет одно из главных направлений института, связанное с квантовыми технологиями, развитие которых требует объединения усилий физиков и технологов, теоретиков и экспериментаторов, инженеров и специалистов по вычислительным системам.

Образовательные задачи

Основная задача кафедры физики полупроводников – подготовка специалистов высшей категории для проведения научных исследований на мировом уровне с применением совре-

менных методов исследований в области физики конденсированного состояния, физики полупроводников и диэлектриков, физики твердого тела, физики низкоразмерных систем, опто- и нанoeлектроники, микросенсорики, твердотельной нанофотоники, квантовой электроники и квантовых технологий.

Все выпускники кафедры получают знания и навыки по физико-химическим основам микро-, опто- и нанoeлектроники, осваивают современные полупроводниковые технологии, включая технологии эпитаксиального роста тонких пленок, комплексной диагностики систем пониженной размерности, наноструктурирования и полупроводниковых нанотехнологий.

Система подготовки специалистов – трехуровневая: первая ступень – основное базовое четырехлетнее образование завершается защитой квалификационной работы бакалавра; вторая – двухгодичная магистратура, с защитой магистерской диссертации; третья – четырехгодичная аспирантура, с защитой выпускной квалификационной работы, которая может быть основой диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук по соответствующим специальностям.

Выпускники кафедры являются подготовленными научными исследователями, способными решать физическими методами современные научные задачи, имеющие навыки преподавать дисциплины физико-математического профиля в вузах и колледжах. Лучшие выпускники магистратуры проходят обучение в аспирантуре и могут защитить диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Подготовка специалистов на кафедре реализуется известными российскими научными школами, получившими мировое признание. Высокий уровень подготовки специалистов на кафедре физики полупроводников обеспечивается оптимальным выбором обновляемых спецкурсов, правильным сочетанием экспериментальных и теоретических методов с широким использованием компьютерной техники современного научного и технологического оборудования, учебной литературы.



Группа выпускников кафедры физики полупроводников после защиты дипломов
A group of graduates of the Department of Semiconductor Physics after defending their diplomas

В настоящее время студенты проводят исследования атомных процессов и электронных явлений на поверхности полупроводников и границах раздела полупроводниковых структур, квантовых эффектов в структурах пониженной размерности, в том числе в эпитаксиальных сверхрешетках и гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками, исследуют квантовые свойства гетероэпитаксиальных структур и их приложения для получения нового поколения нанoeлектроники и систем оптоэлектроники; создают и исследуют новые материалы для электроники, в том числе СВЧ-электроники, силовой электроники и сенсорики, изучают графен, слоистые полупроводники, сращенные структуры АЗВ5-кремний, тонкие слои кремния на изоляторе, кристаллы алмаза и алмазоподобные пленки; разрабатывают полупроводниковые наносистемы для нано- и биосенсоров; проводят исследования в области квантовой информатики и сенсорики. Наши студенты разрабатывают физико-химические основы для технологий получения новых материалов электроники будущего. В числе приоритетных направлений – развитие электронной компонентной базы на новых физических принципах и переход от двумерной к трехмерной схемотехнической архитектуре.

Студенты, специализирующиеся на кафедре физики полупроводников, в дополнение к имеющимся традиционным возможностям использования уникального аналитического и технологического оборудования в ИФП СО РАН, имеют возможность работать на современном экспериментальном оборудовании ведущих мировых производителей в центре коллективного пользования диагностическим оборудованием (ЦКП «Наноструктуры», <http://www.isp.nsc.ru/ckp>) при ИФП СО РАН для выполнения исследований в рамках дипломных и диссертационных работ.

Заключение

Таким образом, кафедра физики полупроводников физического факультета НГУ дает знания и навыки для научно-исследовательской работы в актуальных областях физики конденсированного состояния и полупроводниковых высоких технологий, направленных на совершенствование существующих и создание новых приборов опто-, микро- и нанoeлектроники. Научные и технологические достижения базового Института кафедры – ИФП СО РАН в области изучения квантовых свойств гетероэпитаксиальных структур, полупроводниковых технологий, квантовой оптики и квантовой информатики, устройств квантовой криптографии и квантовой сенсорики, имеющееся в лабораториях Института уникальное измерительное, аналитическое и технологическое оборудование служат основой для научно-исследовательской работы студентов. Всё это позволяет надеяться, что кафедра станет своего рода центром по созданию нового поколения квантовых конструкторов и технологов.

Список литературы

1. Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (1964–2014) / Отв. ред. А. В. Латышев, А. В. Двуреченский, А. Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014. 844 с.
2. **Latyshev A. V., Dvurechenskii A. V., Aseev A. L.** Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications. Elsevier Inc, 2017. 527 p.
3. **Latyshev A. V., Fedina L. I., Rogilo D. I., Sitnikov S. V., Kosolobov S. S.** Atomically Controlled Silicon Surface. Novosibirsk, Parallel, 2016, 220 p.
4. **Pchelyakov O. P., Dvurechenskii A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L.** Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27.
5. **Gusev G. M., Olshanetsky E. B., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Portal J. C.** Quantum Hall Effect near the Charge Neutrality Point in a Two-Dimensional Electron-Hole System. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, pp. 166401–166404.

6. **Maier H., Ziegler J., Fischer R., Kozlov D., Kvon Z. D., Mikhailov N., Dvoretzky S. A., Weiss D.** Ballistic Geometric Resistance Resonances in a Single Surface of a Topological Insulator. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, 2023.
7. **Reimann J., Schlauderer S., Schmid C. P., Langer F., Baierl S., Kokh K. A., Tereshchenko O. E., Kimura A., Lange C., Gdde J., Hfer U., Huber R.** Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band. *Nature*, 2018. vol. 562, pp. 396–400.
8. **Crdoba R., Baturina T. I., Ses J., Mironov A. Yu., Teresa J. M. de, Ibarra M. R., Nasimov D. A., Gutakovskii A. K., Latyshev A. V., Guillamn I., Suderow H., Viera S., Baklanov M. R., Palacios J. J., Vinokur V. M.** Magnetic field-induced dissipation-free state in superconducting nanostructures. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, 1437.
9. Фотоприемные устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий-ртуть-теллур / Отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 258 с.
10. **Novotný O., Wilhelm P., Paul D., Klosi ., Saurabh S., Becker A., Blaum K., George S., Gck J., Grieser M., Grussie F., R. von Hahn, Krantz C., Kreckel H., Meyer C., Mishra P. M., Muell D., Nuesslein F., Orlov D. A., Rimmmler M., Schmidt V. C., Shornikov A., Terekhov A. S., Vogel S., Zajfman D., Wolf A.** Quantum-state-selective electron recombination studies suggest enhanced abundance of primordial HeH⁺. *Science*, 2019, vol. 365, no. 6454, pp. 676–679.

References

1. Anniversary collection of selected papers of the Rzhavov Institute of Semiconductor Physics (1964–2014). Eds. A. V. Latyshev, A. V. Dvurechenskii, A. L. Aseev. Novosibirsk, Parallel, 2014, 844 p. (in Russ.)
2. **Latyshev A. V., Dvurechenskii A. V., Aseev A. L.** Advances in Semiconductor Nanostructures: Growth, Characterization, Properties and Applications. Elsevier Inc, 2017. 527 p.
3. **Latyshev A. V., Fedina L. I., Rogilo D. I., Sitnikov S. V., Kosolobov S. S.** Atomically Controlled Silicon Surface. Novosibirsk, Parallel, 2016, 220 p.
4. **Pchelyakov O. P., Dvurechenskii A. V., Latyshev A. V., Aseev A. L.** Ge/Si heterostructures with coherent Ge quantum dots in silicon for applications in nanoelectronics. *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 14–27.
5. **Gusev G. M., Olshanetsky E. B., Kvon Z. D., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Portal J. C.** Quantum Hall Effect near the Charge Neutrality Point in a Two-Dimensional Electron-Hole System. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, pp. 166401–166404.
6. **Maier H., Ziegler J., Fischer R., Kozlov D., Kvon Z. D., Mikhailov N., Dvoretzky S. A., Weiss D.** Ballistic Geometric Resistance Resonances in a Single Surface of a Topological Insulator. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, 2023.
7. **Reimann J., Schlauderer S., Schmid C. P., Langer F., Baierl S., Kokh K. A., Tereshchenko O. E., Kimura A., Lange C., Gdde J., Hfer U., Huber R.** Subcycle observation of lightwave-driven Dirac currents in a topological surface band. *Nature*, 2018. vol. 562, pp. 396–400.
8. **Crdoba R., Baturina T. I., Ses J., Mironov A. Yu., Teresa J. M. de, Ibarra M. R., Nasimov D. A., Gutakovskii A. K., Latyshev A. V., Guillamn I., Suderow H., Viera S., Baklanov M. R., Palacios J. J., Vinokur V. M.** Magnetic field-induced dissipation-free state in superconducting nanostructures. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, 1437.
9. Photodetectors based on the cadmium-mercury-tellurium epitaxial system. Ed. Aseev A. L. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012, 258 p. (in Russ.)
10. **Novotný O., Wilhelm P., Paul D., Klosi ., Saurabh S., Becker A., Blaum K., George S., Gck J., Grieser M., Grussie F., R. von Hahn, Krantz C., Kreckel H., Meyer C., Mishra P. M., Muell D., Nuesslein F., Orlov D. A., Rimmmler M., Schmidt V. C., Shornikov A.,**

Terekhov A. S., Vogel S., Zajfman D., Wolf A. Quantum-state-selective electron recombination studies suggest enhanced abundance of primordial HeH⁺. *Science*, 2019, vol. 365, no. 6454, pp. 676–679.

Информация об авторах

Виталий Львович Альперович, доктор физико-математических наук, профессор
Зе Дон Квон, доктор физико-математических наук, профессор
Александр Васильевич Латышев, доктор физико-математических наук, академик РАН

Information about the Authors

Vitaly L. Alperovich, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
Ze Don Kvon, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
Alexander V. Latyshev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Academician of Russian Academy of Sciences

*Статья поступила в редакцию 25.09.2021;
одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 01.12.2021
The article was submitted 25.09.2021;
approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 01.12.2021*

Учебно-методическая статья

УДК 621.039.6; 378.096

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

Кафедра физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета

Владимир Вадимович Анненков¹, Андрей Васильевич Аржанников²
Пётр Андреевич Багрянский³, Алексей Дмитриевич Беклемишев⁴
Владимир Иванович Давыденко⁵, Станислав Леонидович Сеницкий⁶
Дмитрий Иванович Сковородин⁷, Антон Вячеславович Судников⁸
Иван Сергеевич Черноштанов⁹, Эдуард Александрович Федоренков¹⁰
Андрей Александрович Шошин¹¹

¹⁻¹¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹⁻¹¹ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ annenkov.phys@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5577-8595>

² a.v.arzhannikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

³ P.A.Bagryansky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5388-0492>

⁴ bekl@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6297-1337>

⁵ V.I.Davydenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3250-1745>

⁶ S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>

⁷ D.I.Skovorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>

⁸ A.V.Sudnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2994-9899>

⁹ I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3801-4382>

¹⁰ E.Fedorenkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9475-4860>

¹¹ a.a.shoshin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-2377-5012>

Аннотация

В статье описана система подготовки научно-инженерных кадров на кафедре физики плазмы физического факультета НГУ с активным участием в этом процессе научных сотрудников плазменных лабораторий Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. В тексте дано представление о плазме, как о предмете, изучаемом на этой кафедре, и далее отражена следующая информация: история создания кафедры, читаемые по кафедре спецкурсы, тематика бакалаврских и магистерских диссертаций, достижения выпускников кафедры в последнем десятилетии. С учетом основной тематики научных исследований в плазменных лабораториях ИЯФ в тексте представлен обзор работ на работающих в Институте плазменных установках и обозначена перспектива создания линейной плазменной ловушки следующего поколения (ГДМЛ). Особое внимание уделено перспективе использования открытых магнитных систем для удержания горячей плазмы применительно к решению проблемы управляемого термоядерного синтеза, поскольку эти системы должны послужить полем основной деятельности будущих выпускников кафедры физики плазмы.

Ключевые слова

кафедра физики плазмы, магнитное удержание плазмы, пучок нейтральных атомов, релятивистский электронный пучок, пучково-плазменная система

Для цитирования

Анненков В. В., Аржанников А. В., Багрянский П. А., Беклемишев А. Д., Давыденко В. И., Сеницкий С. Л., Сковородин Д. И., Судников А. В., Черноштанов И. С., Федоренков Э. А., Шошин А. А. Кафедра физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 118–141. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

© Анненков В. В., Аржанников А. В., Багрянский П. А., Беклемишев А. Д.,
Давыденко В. И., Сеницкий С. Л., Сковородин Д. И., Судников А. В.,
Черноштанов И. С., Федоренков Э. А., Шошин А. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 118–141

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 118–141

Department of Plasma Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University

Vladimir V. Annenkov¹, Andrey V. Arzhannikov²
 Peter A. Bagryansky³, Alexei D. Beklemishev⁴
 Vladimir I. Davydenko⁵, Stanislav L. Sinitsky⁶
 Dmitry I. Skovorodin⁷, Anton V. Sudnikov⁸
 Ivan S. Chernoshtanov⁹, Eduard A. Fedorenkov¹⁰
 Andrey A. Shoshin¹¹

¹⁻¹¹ Budker Institute of Nuclear Physics
 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
 Novosibirsk, Russian Federation
¹⁻¹¹ Novosibirsk State University
 Novosibirsk, Russian Federation

¹ annenkov.phys@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5577-8595>

² a.v.arzhannikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

³ P.A.Bagryansky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0001-5388-0492>

⁴ bekl@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6297-1337>

⁵ V.I.Davydenko@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3250-1745>

⁶ S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8634-5346>

⁷ D.I.Skovorodin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2712-9117>

⁸ A.V.Sudnikov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-2994-9899>

⁹ I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3801-4382>

¹⁰ E.Fedorenkov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9475-4860>

¹¹ a.a.shoshin@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-2377-5012>

Abstract

The article describes the system of scientific-engineering training at the Plasma Physics Department at the Physical Department, NSU with the active participation in this process of researchers from the plasma laboratories of the Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The text gives an idea of plasma as a subject studied in this department, and then consistently reflects the following information: the history of the department, the special courses taught in the department, the subjects of undergraduate and graduate theses, the achievements of graduates of the department in the last decade. Taking into account the main topic of scientific research in the plasma laboratories of the BINP SB RAS, the text gives an overview of the work at the plasma facilities operating at the institute and outlines the prospect of creating a next-generation linear plasma trap (GDMT). Particular attention is paid to the prospect of using open magnetic systems for hot plasma confinement in relation to solving the problem of controlled thermonuclear fusion, since these systems should serve as the field of primary activity for future graduates of the Department of Plasma Physics.

Keywords

Plasma Physics Department, magnetic plasma confinement, neutral atom beam, relativistic electron beam, beam-plasma system

For citation

Annenkov V. V., Arzhannikov A. V., Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Davydenko V. I., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Sudnikov A. V., Chernoshtanov I. S., Fedorenkov E. A., Shoshin A. A. Department of Plasma Physics of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 118–141. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-118-141

Плазма, термоядерные исследования, история кафедры

Плазма – это «четвертое» состояние вещества, которое представляет собой газ, образованный положительными тяжелыми частицами – ионами и легкими электронами. Это состояние получается из обычного газа нейтральных атомов или молекул путем ионизации, т. е. отрывания от них одного или нескольких электронов. В обычном газе взаимодействие частиц происходит при их непосредственном столкновении – близкодействующее взаимодействие. В противоположность газу взаимодействие заряженных частиц плазмы происходит

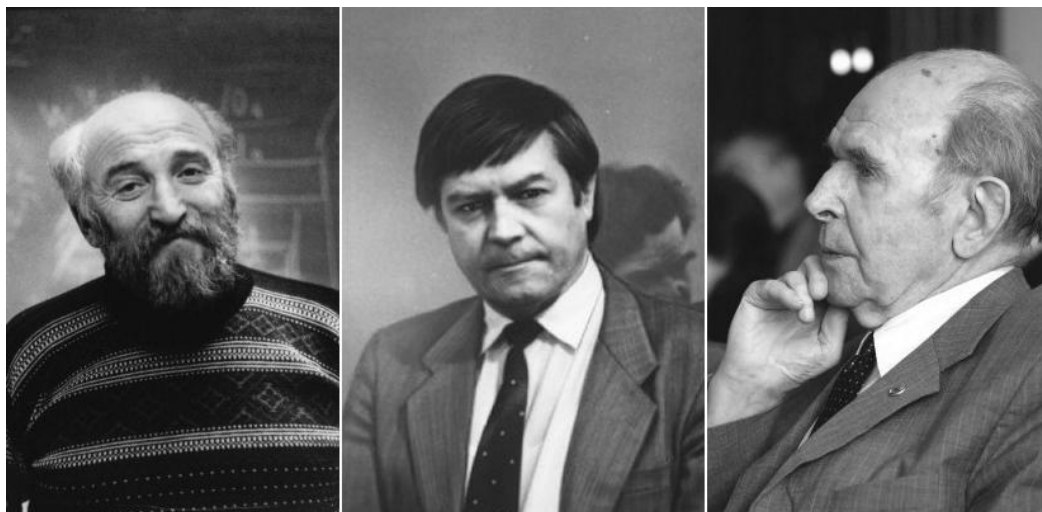
через пространственно распределенное электромагнитное поле, что соответствует понятию дальнодействующего взаимодействия. Наряду с электромагнитным полем, создаваемом в плазме внешними по отношению к ней источниками, вклад в это поле вносят также ионная и электронная компоненты плазмы. Суперпозиция внешних и собственных полей дает результирующее поле в плазме, которое определяет пространственное распределение обеих ее компонент, а также скорости движения ее частиц. В частности, при смещении электронов относительно ионов в локальной области плазмы возникает их взаимное притяжение с высокой напряженностью электростатического поля, которое препятствует дальнейшему разделению этих двух компонентов плазмы. Такое явление обеспечивает плазменной среде низкий уровень плотности заряда в локальных пространственных областях, что обозначено термином «квазинейтральность» плазмы. В этих условиях движение электронов и ионов в плазме осуществляется в самосогласованном режиме через их взаимодействие посредством результирующего электромагнитного поля.

Поскольку сечение кулоновского взаимодействия отдельных частиц плазмы при столкновении между собой зависит от величины передаваемой энергии обратно пропорционально квадрату этой величины, то оказывается, что для плазмы с высокоэнергичными частицами требуется длительное время для достижения термодинамического равновесия. В этих условиях в неравновесной плазме развиваются различные виды присущих ей неустойчивостей, которые базируются на резонансных явлениях в системе «заряженные частицы – электромагнитное поле». Развитие неустойчивостей может приводить к сильно нелинейным колебаниям и, в конечном счете, к турбулентным процессам. Это обуславливает немислимо большое количество возможных состояний плазменных образований, что наблюдается в космическом пространстве и реализуется в лабораторных и промышленных установках. Оказывается, что вещество вселенной в подавляющем числе случаев находится в состоянии плазмы. А на Земле плазменная среда положена в основу большого разнообразия инженерных решений в создаваемых промышленных установках и технологических процессах.

Термин «плазма» применительно к ионизованному газу был введен в 1928 г. американским физиком Ирвингом Ленгмюром в статье «Колебания в ионизованных газах». Исходя из этого можно утверждать, что научные знания по физике плазмы начали формироваться 90 лет назад. К настоящему времени уже сложились научные школы, получены «классические» результаты. Обнаружено много сильно отличающихся состояний плазмы: слабо- и полностью ионизованная, идеальная и неидеальная, вырожденная и др. Придумано много методов исследования и описания плазмы. Изобретено множество технических устройств и технологических процессов с использованием плазмы. Однако до сих пор значительная часть явлений не поддается точному расчету (нет их полного понимания), постоянно обнаруживаются новые эффекты, многие цели не достигнуты. Есть большой простор для новых открытий, научных результатов и изобретений.

Середина 50-х гг. прошлого века была отмечена бурным развитием физики плазмы во всех ведущих странах, что связано с началом проведения систематических исследований, направленных на решение проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС). По инициативе первого директора Института ядерной физики академика Г. И. Будкера эти исследования были начаты в Институте в 1960 г., непосредственно при его создании, и продолжают до настоящего времени. В ходе исследований по проблеме УТС выяснилось, что плазма представляет собой весьма сложную субстанцию, и решение проблемы займет много десятков лет в рамках научно-исследовательских работ всех развитых стран. В этих условиях возникла острая необходимость подготовки научно-инженерных кадров именно по направлению физики плазмы. В 1972 г. академик Г. И. Будкер предложил молодому доктору физико-математических наук Д. Д. Рютову создать кафедру физики плазмы на физфаке НГУ, которая должна была сосредоточиться на подготовке физиков-исследователей для работы в плазменных лабораториях ИЯФ [1]. Начиная с создания и до 1997 г. кафедру физики плазмы возглавлял Д. Д. Рютов, затем до 2009 г. – Э. П. Кругляков, и далее до 2019 г. – А. А. Иванов.

Последние три года кафедра возглавлялась А. Д. Беклемишевым. С 2022 г. кафедрой руководит Д. И. Сковородин. Профессорско-преподавательский состав кафедры состоит главным образом из сотрудников термоядерных лабораторий ИЯФ. В ходе смены поколений состава работников кафедры и процесса накопления опыта и знаний на кафедре физики плазмы сложилась ведущая научная школа, имеющая высокий авторитет на мировом уровне.



Академики Г. И. Будкер, Д. Д. Рютов, Э. П. Кругляков
Academicians G. I. Budker, D. D. Ryutov, E. P. Kruglyakov

Основной научной задачей плазменных лабораторий ИЯФ остается разработка термоядерного реактора на основе линейной магнитной ловушки. Однако в настоящее время значительная часть усилий направлена также и на прикладные исследования, направленные на создание различных инженерно-технических устройств, предназначенных для создания и управления плазменными объектами или использующих плазму в технологических задачах. Плазму надо создавать, нагревать и исследовать с помощью зондовых, микроволновых, оптических или корпускулярных методов, а также моделировать с помощью аналитических методов и численно. Поэтому диапазон возможных специализаций студентов кафедры физики плазмы очень широк.

Система подготовки выпускников.

Базовые лаборатории и тематика проводимых в них исследований.

Практика в лабораториях и примеры квалификационных работ выпускников

С момента организации кафедры физики плазмы система подготовки на ней специалистов проходит по схеме, принятой на физфаке НГУ, а именно: на третьем году обучения происходит специализация студентов по направлениям подготовки, которая сопровождается их распределением по выпускающим кафедрам. При обучении на этих кафедрах значительная доля времени обучения студентов отводится их участию в научно-исследовательских работах в лабораториях институтов СО РАН. Для кафедры физики плазмы такими базовыми лабораториями являются плазменные лаборатории ИЯФ (Лаб. 9-0, 9-1, 10). На третьем курсе каждому студенту кафедры назначается научный руководитель, с которым он определяет тему дальнейшей научной работы. Этому предшествует важный и сложный процесс, который осуществляется кафедрой путем проведения экскурсий на установки, а также организацией встреч, обсуждений и собеседований с возможными научными руководителями. В этом про-

цессе важна собственная инициатива студентов. Предварительную информацию о базовых лабораториях кафедры и потенциальных научных руководителях студенты могут получить еще на первом-втором курсах в процессе выполнения курсовых работ на базе кафедры, а также в ходе экскурсий в Институт. В процессе дальнейшего обучения, специализация студента может измениться, например, при поступлении в магистратуру. Такие изменения всегда требуют значительной дополнительной работы как со стороны студента, так и со стороны научного руководителя, поэтому осознанный выбор специализации и научного руководителя на третьем курсе крайне важен.



Студент 3 курса ФФ НГУ Роман Иванов собирает диагностическую систему для установки КОТ

Roman Ivanov, a 3rd year student of Department of Physics, NSU, assembles a diagnostic system for CAT installation

Лаборатория 9-0 занимает лидирующие позиции в мире по разработке и созданию инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов изотопов водорода. Такие инжекторы нужны для диагностики и нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы. Инжекторы, разработанные и созданные в Институте ядерной физики, успешно применяются для нагрева и диагностики горячей плазмы в ведущих лабораториях России, США, Германии, Швейцарии, Италии, Испании.

Планируемая мощность инжекции в современных магнитных системах достигает уровня нескольких десятков мегаватт. Интенсивные пучки быстрых атомов получают нейтрализацией интенсивных ионных пучков, сформированных большими ионными источниками. Перезарядные инжекторы с энергией атомов до 100 кэВ должны обеспечивать ввод мощности в заданную область плазмы, кроме того, для оптимизации создания плазмы требуется контролируемое изменение мощности и энергии пучка во времени. Для инжекции в термоядерные системы с плотной плазмой большого размера энергия атомов пучка до 100 кэВ является

недостаточной из-за неглубокого проникновения атомов в плазму. Поэтому энергия инжектируемых атомов должна быть увеличена. Такое увеличение энергии может быть достигнуто за счет применения инжекторов пучков быстрых атомов, основанных на обдирке пучков интенсивных отрицательных ионов [2].

Лаборатория 9-0 в последние годы существенно продвинулась в развитии инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов водорода. Разработаны, испытаны и производятся перезарядные инжекторы пучков быстрых атомов водорода с мощностью 1 МВт и длительностью импульса до 2 с, а также импульсные инжекторы с мощностью пучка до 3 МВт. Ведутся работы по оригинальному инжектору пучка атомов водорода с энергией до 1 МэВ на основе отрицательных ионов [2]. Инжектор основан на раздельном формировании и ускорении пучка отрицательных ионов. В настоящее время разработан и испытан поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с током пучка свыше 1 А и энергией более 100 кэВ и ведутся успешные эксперименты по ускорению пучка. Также экспериментально исследованы и испытаны прототипы плазменной и фотонной мишеней для обдирки пучков отрицательных ионов водорода.



Стенд для испытаний инжектора пучка атомов водорода с энергией до 1 МэВ
на основе отрицательных ионов
Test site for hydrogen atom beam injector with energy up to 1 MeV based on negative ions

В лаборатории 9-0 работа по созданию и исследованию инжекторов пучков быстрых атомов водорода выполняется на экспериментальных установках и стендах. Для проведения работы требуется глубокое понимание физических процессов в элементах инжектора и проведение численного моделирования этих процессов с использованием современных кодов.

Установка БНЗТ (бор-нейтронозахватная терапия рака) включает в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией, и мишени для генерации нейтронов, фотонов, позитронов и α -частиц [3]. На установке получают мощные стационарные пучки протонов или дейтронов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА, мощные пучки нейтронов различного энергетического диапазона: холодные, тепловые, эпитепловые, над-эпитепловые, моноэнергетические и быстрые, яркие потоки 478 или 511 кэВ фотонов, α -частиц и позитро-

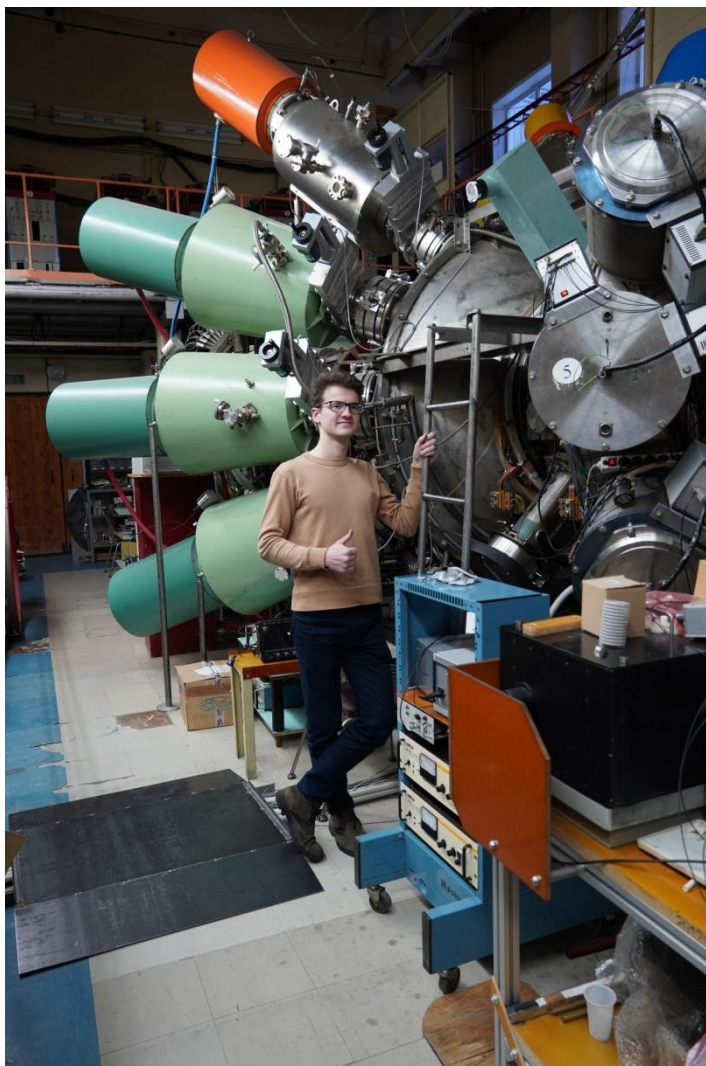
нов. Установку применяли для изучения радиационного блистеринга металлов при имплантации протонов, для измерения сечений реакций ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$, для развития методики бор-нейтронозахватной терапии, для активационного анализа карбида бора и стали [4], сделанных для Международного термоядерного реактора ИТЭР, для определения элементного состава поверхностей измерением энергетического спектра обратно-рассеянных протонов и планируют применять для радиационного тестирования материалов, разработанных для функционирования Большого адронного коллайдера в ЦЕРН в режиме высокой светимости, для детального изучения перспективной безнейтронной термоядерной реакции ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$, для нейтронной дифракции и для множества других приложений. Установка стала прототипом источника нейтронов, поставленного в Китай, в одну из первых шести построенных клиник БНЗТ в мире, и источников нейтронов, изготавливаемых для клиник в России и Италии. Сделанная своими руками установка стала уникальным центром по проведению научных исследований в различных областях знаний в тесной международной кооперации.

Основной объем исследований **лаборатории 9-1** в предшествующие годы был выполнен на установке «газодинамическая ловушка» (ГДЛ), магнитная система которой представляет собой соленоид с магнитными пробками – катушками, создающими сильное магнитное поле по торцам соленоида [5]. Плазма, удерживаемая в ГДЛ, содержит две компоненты ионов. Одна из компонент имеет изотропную в пространстве скоростей максвелловскую функцию распределения с температурой в несколько сотен электрон-вольт. Ее удержание в ловушке аналогично удержанию газа в сосуде с малым отверстием, что и определило название системы. Другая компонента ионов имеет энергию термоядерного диапазона в несколько десятков килоэлектрон-вольт и образуется в результате захвата плазмой мощных атомарных пучков.

В результате успешно проведенных экспериментальных кампаний на установке ГДЛ была продемонстрирована перспективность использования магнитных ловушек открытого типа с простейшей осесимметричной конфигурацией в качестве мощных нейтронных источников и драйверов для подкритических реакторов деления. В ходе работы решен ряд ключевых проблем физики газодинамической ловушки и, в целом, магнитных систем открытого типа для удержания плазмы. Принципиальный результат, определяющий перспективы данного направления исследований по управляемому термоядерному синтезу, был получен в экспериментах по комбинированному нагреву плазмы нейтральными пучками и мощным микроволновым излучением. В этих экспериментах с открытой ловушкой, работающей в квазистационарном режиме, достигнуты рекордные для нее значения температуры электронной компоненты плазмы – около 1 кэВ при средней энергии ионов более 10 кэВ. В результате впервые в магнитной ловушке открытого типа было продемонстрировано устойчивое удержание плазмы с параметрами, требуемыми для создания мощного нейтронного источника, необходимого для ряда актуальных приложений. При этом были решены следующие задачи.

- Экспериментально продемонстрирована возможность стабилизации плазмы высокого давления в магнитной ловушке открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией. Впервые в такой ловушке достигнуто значение параметра $\beta = 60\%$ в устойчивом режиме с дифференциальным вращением плазмы [5–8]. $\beta = 8\pi P_{\text{плазмы}}/B^2$ – отношение давления плазмы к эффективному давлению магнитного поля. Этот параметр характеризует эффективность использования магнитного поля для удержания плазмы. При $\beta = 1$ магнитное поле используется максимально эффективно.

- За счет использования наклонной инжекции мощных атомарных пучков достигнуто стабильное относительно развития ионно-циклотронных неустойчивостей удержание горячих ионов с энергиями термоядерного диапазона и плотностью до $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [5]. Показано, что в этих условиях релаксация быстрых ионов определяется в основном кулоновскими соударениями с электронами, поэтому повышение электронной температуры является ключевым фактором, обеспечивающим увеличение времени удержания горячей компоненты плазмы.



Студент 4 курса ФФ НГУ А. В. Сandomirsky рядом с газодинамической ловушкой (ГДЛ)
A. V. Sandomirsky, 4th year student of Department of Physics, NSU, next to the Gas Dynamic Trap (GDT)

- Предложена и реализована новая схема электронного циклотронного нагрева, основанная на эффекте захвата излучения в неоднородной плазме. В результате в режимах с дополнительным ЭЦР нагревом была достигнута рекордная для квазистационарных магнитных ловушек открытого типа величина электронной температуры – около 1 кэВ [8]. В предыдущих экспериментах на открытых ловушках температура электронов была ограничена величиной менее 0,3 кэВ.

- Продemonстрирован связанный с увеличением электронной температуры рост времени удержания энергичных ионов и выхода термоядерных нейтронов; показано, что повышение электронной температуры вплоть до 1 кэВ не меняет газодинамический характер удержания в центральных областях плазменного столба [8; 9]. Экспериментально подтверждены теоретические представления о механизме поглощения СВЧ излучения в используемой схеме нагрева плазмы [10].

- Реализован новый способ инициации разряда с помощью пробоя нейтрального газа микроволновым излучением в условиях электронного циклотронного резонанса и создания мишенной плазмы для захвата мощных атомарных пучков, существенно улучшающий параметры плазмы на развитой стадии разряда.

- Предложен и реализован новый метод МГД-стабилизации разрядов с предельно высокими значениями электронной температуры, реализующихся при резонансном СВЧ нагреве плазмы с локализацией области поглощения в центре плазменного шнура [8].

Эти достижения позволяют кардинально пересмотреть возможности использования магнитных ловушек открытого типа, таких как ГДЛ, тандемная или многопробочная ловушки, в качестве источника нейтронов для материаловедческих исследований по программе управляемого термоядерного синтеза, реактора для «дожигания» радиоактивных элементов для глубокой переработки ядерных отходов и гибридного энергетического реактора, работающего по схеме «синтез-деление». Предложение по конфигурации такого реактора сформировано сотрудниками кафедры в работах [11; 12].

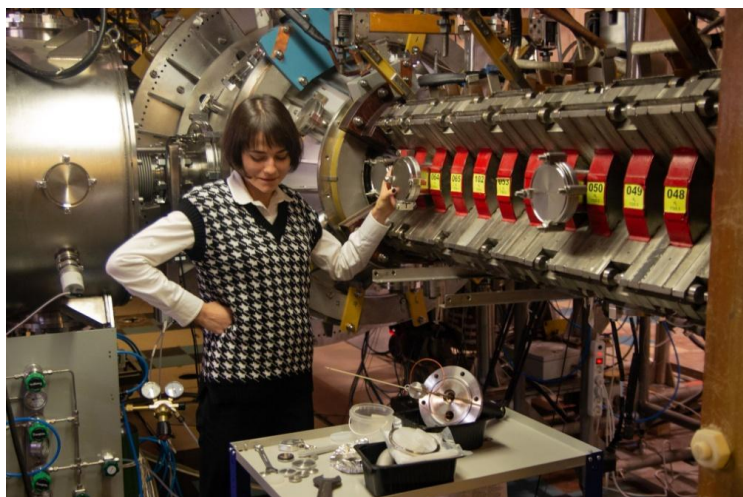
Сегодня одним из основных направлений исследовательской программы на установке ГДЛ является дальнейшее продвижение в сторону эффективного использования магнитного поля для удержания плазмы, т. е. демонстрация устойчивого удержания плазмы с $\beta \rightarrow 1$. С подобной же целью в 2021 г. введена в строй новая установка САТ (Compact axisymmetric toroid), или КОТ (компактный осесимметричный тороид). Эксперимент на этой установке должен продемонстрировать стабильное удержание плазмы с горячими ионами, энергия которых лежит в термоядерном диапазоне, а магнитное поле, созданное диамагнитными токами внутри плазмы, имеет величину сравнимую либо превосходящую магнитное поле ловушки, т. е. формируется конфигурация с обращенным полем. При этом частицы плазмы в основном должны удерживаться магнитным полем, созданным самой плазмой. В этой области мы конкурируем с коллегами из компании «TAE Technologies, Inc.» (США), где проведена серия успешных экспериментов по удержанию горячей плазмы с предельно достижимым параметром на установке C2-W [13].

Направления научно-исследовательских работ, проводимых в **лаборатории 10**, сформировались в течение последних тридцати лет при решении задач удержания высокотемпературной плазмы с помощью многопробочной магнитной ловушки и нагрева этой плазмы путем накачки плазменных колебаний пучком релятивистских электронов с током в несколько десятков килоампер.

Использование многопробочного магнитного поля дает возможность подавления потоков частиц и энергии вдоль силовых линий магнитного поля, что обеспечивает сильное снижение продольных потерь термоядерной плазмы из такой магнитной ловушки. Многопробочная ловушка представляет собой цепочку коротких пробкотронов с небольшим пробочным отношением. Метод удержания плазмы в ней основан на том, что в пространственно периодическом магнитном поле значительная доля плазменных ионов оказывается запертой между двумя пробками отдельного пробкотрона, из которых составлена ловушка. При рассеянии эти ионы покидают отдельный пробкотрон через обои его концы случайным образом, что обеспечивает диффузионный характер их движения вдоль оси магнитной ловушки. Это приводит к значительному росту времени жизни иона в ловушке по отношению к случаю ловушки с однородным по длине магнитным полем [14]. Секции с многопробочным магнитным полем за счет многократного подавления продольных потерь частиц и энергии из центральной ловушки являются одним из ключевых элементов в концепции осесимметричных открытых ловушек реакторного класса. В лаборатории используются две установки, на которых ведутся исследования по многопробочному удержанию плазмы.



Студент 4 курса ФФ НГУ К. С. Колесниченко
около одного из инжекторов пучков атомов установки КОТ
K.S. Kolesnichenko, 4th year student of Department of Physics, NSU,
near one of the atom beam injectors of CAT



Студентка 3 курса ФФ НГУ П. А. Полозова рядом с установкой ГОЛ-НВ
P. A. Polozova, a 3rd year student of Department of Physics, NSU, near the GOL-NB installation

Установка ГОЛ-NB предназначена для непосредственной демонстрации многопробочного подавления продольных потерь из центральной ловушки газодинамического типа. Эта установка была создана за счет глубокой модернизации многопробочной ловушки ГОЛ-3. Первая плазма в ГОЛ-NB была получена в 2019 г. [15]. Установка включает в себя центральную ловушку длиной $\sim 2,5$ м и длинные пробочные секции с прямым либо гофрированным полем. Плазма плотностью $n \sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$ нагревается пучками нейтральных атомов мощностью до 2 МВт. Предполагается, что использование гофрированного поля приведет к существенному росту времени жизни и давления удерживаемой плазмы. Основными задачами установки являются определение зависимости эффективности удержания плазмы от конфигурации эксперимента, исследование различных методов стабилизации плазмы в осесимметричной магнитной конфигурации, а также проверка отдельных физических явлений, обнаруженных на установке ГДЛ.

Сравнительно недавно А. Д. Беклемишевым была выдвинута новая физическая идея динамического многопробочного удержания плазмы за счет винтового характера силовых линий магнитного поля. В этом случае торможение плазмы при ее распространении вдоль оси магнитной ловушки обеспечивается встречным движением магнитных пробок при рассмотрении физического процесса в системе координат, движущейся вместе с потоком плазмы [16]. Во вращающейся синхронно с плазмой системе отсчета периодические вариации магнитного поля движутся вдоль оси плазменного шнура. Гофрированное магнитное поле передает импульс захваченным в отдельных пробкотронах ионам, и в результате за счет столкновений между ионами создается сила, тормозящая продольное течение плазмы. В теоретическом рассмотрении этого физического механизма торможения продольного течения плазмы продемонстрирован экспоненциальный закон снижения потерь в такой ловушке с увеличением ее длины. Следует отметить, что смена направления прокручивания силовых линий винтового магнитного поля на противоположное создает условия для эффективного ускорения ионов плазмы [17], что открывает перспективу создания плазменных реактивных двигателей с высокой тягой [18].

Для проверки концепции подавления продольных потерь из магнитной ловушки за счет прокручивания силовых линий магнитного поля в ИЯФ сооружена установка СМОЛА, на которой в 2017 г. проведена первая серия экспериментов. Поток плазмы с плотностью $10^{18} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$ пропускается через транспортную секцию с 12 периодами винтового магнитного поля. В ходе экспериментов уже подтверждена идея удержания плазмы винтовым магнитным полем [19]. Основными задачами исследований на этой установке являются детальное изучение процессов удержания и ускорения плазмы в винтовом магнитном поле, а также управление длиной свободного пробега ионов в такой системе.

Исследование взаимодействия мощных релятивистских электронных пучков (РЭП) с плотной плазмой проводилось ранее для осуществления быстрого ее нагрева (см. [14]), поскольку импульсная мощность этих пучков достигает 20 ГВт. В ходе исследований по пучковому нагреву плазмы был обнаружен ряд интересных физических эффектов, связанных с генерацией электромагнитных волн с длиной волны в области одного миллиметра [20; 21]. Активное научное и инженерное освоение этого нового спектрального диапазона электромагнитного излучения началось в последнее десятилетие, и это придает особую актуальность изучению механизмов генерации потоков субмм-излучения большой мощности [21]. Экспериментальные исследования по генерации субмм-излучения при пучково-плазменном взаимодействии проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ по схеме накачки пучком верхнегибридных колебаний в замагниченном плазменном столбе и последующей трансформации этих колебаний в направленный поток субмм-излучения, распространяющийся в атмосфере. Установлены закономерности формирования спектрального состава потока излучения и эволюции функции распределения электронов пучка при взаимодействии с плазмой [22]. Кроме рекордного энергосодержания (десятки джоулей в микросекундном импульсе), генерация потока излучения в системе «пучок – плазма» обеспечивает быструю перестройку частоты за

счет варьирования параметров плазмы. Важно отметить, что метод решения задачи о накачки колебаний в плазме вполне применим и для решения задач при возбуждении волн в других средах. Примером может служить решение задачи о возбуждении корабельных волн, которая была впервые рассмотрена в работе Уильяма Томсона (лорда Кельвина) в 1891 г. для случая движения корабля по водной поверхности. Методы, используемые при решении задачи о возбуждении плазменных колебаний, позволили построить решение по возбуждению корабельной волны объектом, движущимся глубоко под поверхностью воды [23; 24].



Установка СМОЛА для изучения течения плазмы в винтовом магнитном поле
SMOLA facility for the study of plasma flow in a helical magnetic field

Второе направление по созданию мощных источников субмм-излучения на основе килоамперных РЭП базируется на двухстадийной схеме, предложенной в [25]. В этих экспериментах один ленточный пучок накачивает электромагнитные колебания с частотой 75 ГГц [26], которые накапливаются в кольцевом планарном резонаторе. Через этот резонатор проходит также и второй ленточный пучок, рассеяние волн на котором обеспечивает преобразование мм-излучения в субмиллиметровую область на частоте в окрестности одного терагерца. Комплекс диагностик установки ЭЛМИ должен обеспечить получение информации об изменениях функции распределения используемых релятивистских пучков, а также детальные измерения спектрального состава как миллиметрового, так и субмиллиметрового излучения.

Также в лаборатории исследуются важные прикладные задачи взаимодействия мощных электронных пучков с металлическими мишенями. Важной для будущих термоядерных реакторов задачей является устойчивость материалов первой стенки к импульсному нагреву, вызванному потоками плазмы. Так, в токамаках импульсная потеря энергии при модах возмущений, локализованных на краю (ELMs – edgelocalized modes), может приводить к растрескиванию и плавлению тугоплавких вольфрамовых пластин, принимающих плазменный поток. Эти процессы моделируются на установке ВЕТА. Вольфрамовые образцы облучаются

электронным пучком с энергией до 100 кэВ и током до 100 А. Процессы, происходящие с вольфрамом во время микро- и миллисекундных импульсов нагрева с предельной плотностью мощности, изучаются набором оптических диагностик [27]. На основе этих данных ищутся возможности для повышения стойкости первой стенки плазменных установок к импульсным нагрузкам. Установка запущена в 2013 г. и сейчас серьезно модернизируется.

С 2013 г. ИЯФ СО РАН ведет работы в рамках проекта ИТЭР. Институт интегрирует и затем изготовит четыре диагностических порт-плага ИТЭР, разрабатывает и изготовит элементы трех российских диагностических систем для определения параметров плазмы в ИТЭР. ИТЭР (www.iter.org) – крупнейший международный проект по созданию экспериментального термоядерного реактора на основе токамака, который строится на юге Франции. Задача проекта – в демонстрации научно-технологической осуществимости использования термоядерной энергетики в промышленных масштабах, а также в отработке необходимых для этого технологических процессов.

Порт-плаг – это вставка в вакуумную камеру, которая позволяет диагностическим системам получить доступ непосредственно к горячей зоне реактора [28]. Задача интегратора – разместить многочисленные диагностические системы в портах, обеспечить их функциональность и совместимость, возможность дистанционного обслуживания элементов диагностик и обеспечить конструкционную прочность по отношению к большому количеству различных воздействий – большими тепловыми и нейтронными потоками, а также радиационными, механическими и электромагнитными нагрузками. Причем выполнять эти работы нужно в тесном сотрудничестве с разработчиками диагностик, которые разбросаны по всему миру. Для примера, в разрабатываемом ИЯФ СО РАН экваториальном порту № 11 ИТЭР располагается 8 диагностик плазмы [28]: рефлектометрия со стороны слабого поля (США); анализатор нейтральных частиц (Россия, Санкт-Петербург); спектрометрия водородных линий (Россия, Москва); рентгеновский кристаллический спектрометр (Индия); ВУФ спектрометр диверторной плазмы (Корея); анализатор остаточных газов (США); ВУФ спектрометр основной плазмы (Корея); система нейтронной активации (Корея). Разработка портов представляет большую сложность, так как комбинация жестких инженерно-физических требований (например, обеспечить высокое подавление нейтронного потока) встречается с суровыми законодательными ограничениями, так как ИТЭР, согласно законодательству, – ядерный реактор. В рамках работ над проектом ИТЭР в ИЯФ СО РАН создана интеграционная площадка, в которой есть большая «чистая» зона, удовлетворяющая условиям для сборки достаточно крупных элементов ядерных реакторов (длина порт-плагов до 6 метров).

Развитие термоядерных исследований в мире как место приложения сил будущих выпускников кафедры физики плазмы

Большая часть работ, проводимых плазменными лабораториями ИЯФ СО РАН, посвящена проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС). Прогресс в параметрах термоядерных установок в мире позволяет говорить о том, что исследования по УТС выходят на «финишную прямую»: на токамаке JT-60 (Япония) продемонстрированы режимы, в которых получено рекордное тройное Лоусоновское произведение (плотность плазмы * температура * время удержания), сооружается ИТЭР – международный токамак, нацеленный на демонстрацию режимов горения плазмы и отработку технологий, в Китае развивается проект ALIANCE, нацеленный на создание гибридной электростанции. В России продолжается строительство токамака T-15МД и разрабатывается проект ТРТ (токамак реакторных технологий). В разных странах развиваются проекты ДЕМО – демонстрационных реакторов, задачей которых будет демонстрация получения электроэнергии на основе термоядерного синтеза. Все проекты ДЕМО сейчас основаны на токамаках, так как токамаки имеют самые высокие параметры по температуре и времени удержания горячей плазмы.

В то же время на пути к коммерчески выгодному реактору до сих пор стоят серьезные трудности, такие как: обеспечение устойчивого горения плазмы в стационарном режиме; стойкость стенок реактора, подвергающихся экстремальным тепловым и механическим нагрузкам, и т. п. Коммерческие реакторы на основе токамаков могут работать только с DT-реакцией, т. е. должны работать с радиоактивным тритием, что резко усложняет постройку и лицензирование (получение разрешения на работу) реактора и, как следствие, сильно увеличивает его стоимость, что снижает его конкурентоспособность.

В перспективе будущее термоядерных реакторов видится на основе безтритиевых реакций (DD, DHe³, pB), но для этих реакций требуется более высокая энергия частиц, поэтому их нельзя реализовать в существующих замкнутых системах типа токамак, но теоретически это возможно реализовать в линейных магнитных системах. Особый интерес также представляют безнейтронные реакции, например ¹¹B(p,α)α – в этой реакции рождаются три α-частицы, и нет нейтронов. Нейтроны вызывают радиационные повреждения всех элементов реактора (стенки камеры, диагностик плазмы, магнитов, конструктивных элементов) и их активацию. Поток нейтронов в проектах коммерческих термоядерных реакторов настолько большой, что на данный момент просто нет сертифицированных материалов, из которых можно было бы изготовить стенку такого реактора.

Учитывая отмеченные особенности энергетических установок с термоядерной плазмой, можно утверждать, что линейные магнитные системы для удержания плазмы, которые создаются в ИЯФ в сотрудничестве с другими научными институтами, имеют неоспоримое преимущество перед тороидальными магнитными системами. Это преимущество – простая с инженерной точки зрения по геометрии магнитная система, допускающая модульный принцип сооружения реактора. В этих условиях обеспечивается быстрое и относительно недорогое строительство термоядерного реактора, а в дальнейшем, в ходе его эксплуатации, возможность удобного ремонта или замены этих модулей.

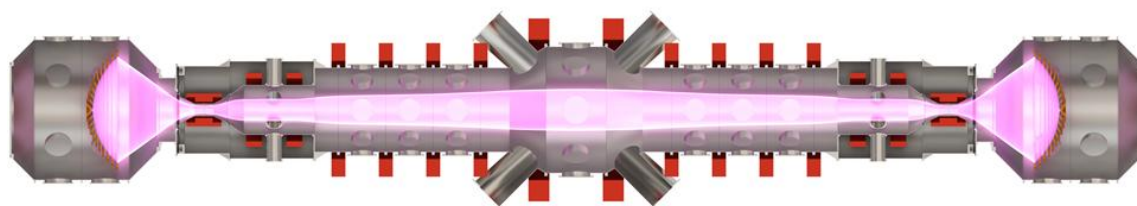
Как много времени нужно, чтобы построить большой токамак, мы можем проследить на опыте сооружения ИТЭР. В 2007 г. началась подготовка площадки для строительства комплекса зданий, сейчас активно ведется строительство токамака (в чем участвуют и ИЯФ СО РАН и выпускники кафедры физики плазмы [28]), а первый запуск по текущему расписанию запланирован на декабрь 2025 г. Но в 2025 г. запущены будут только вакуумная, криогенная и магнитная системы установки с небольшим набором диагностик. Полноценный запуск на изучение DT плазмы в ИТЭР запланирован в декабре 2035 г. Другими словами, постройка большого токамака может занять до 30 лет. На этом фоне линейные плазменные ловушки выгодно отличаются скоростью строительства и низкой ценой. Крупная линейная плазменная установка может быть построена за 4–5 лет.

В настоящее время проведение работ по УТС требует серьезных финансовых и материальных ресурсов, связанных как с необходимостью сооружения крупных установок, так и с их обслуживанием. Для ускорения развития термоядерных технологий в 2020 г. в России принята национальная программа термоядерных и плазменных исследований, предусматривающая сооружение нескольких плазменных установок класса Mega-science. В ИЯФ СО РАН в рамках национальной программы запланировано сооружение двух установок класса Mega-science: прототипа инжектора атомов водорода с энергией 500 кэВ и газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ). На основе прототипа инжектора будет разрабатываться одна из систем дополнительного нагрева для реактора ТРТ.

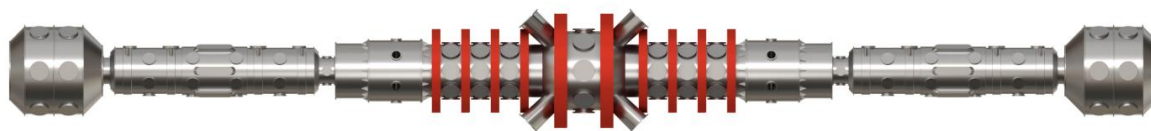
В настоящее время исследовательская программа на установках термоядерного направления ИЯФ СО РАН ориентирована на экспериментальное обоснование проекта ГДМЛ. Этот проект направлен на развитие достижений в области удержания плазмы в исследованиях на установках ГДЛ и ГОЛ-3, а также предполагает реализацию новых идей: диамагнитного и винтового удержания [29], которые недавно были предложены в ИЯФ СО РАН. Проект направлен на отработку термоядерных технологий, необходимых для создания относительно компактного энергетического реактора ядерного синтеза, способного работать с видами топ-

лива, не содержащими радиоактивный тритий и обладающими практически неисчерпаемым ресурсом добычи.

Установка ГДМЛ (длина плазмы в центральной секции 12 м, магнитное поле до 1,5 Тл в области удержания и до 20 Тл (на основе высокотемпературных сверхпроводников) в магнитных пробках) [29] нацелена на удержание плазмы с термоядерными параметрами в квазистационарном режиме и предназначена, с одной стороны, для отработки реакторных технологий (методы нагрева плазмы, системы стабилизации, ввод вещества и т. п.), а с другой – для моделирования и исследования процессов, происходящих в термоядерном реакторе на основе открытой ловушки. ГДМЛ имеет модульный дизайн, что позволяет начать эксперименты с плазмой и проверить работоспособность заложенных в нее идей по мере строительства установки.



Разрез проекта центральной секции установки ГДМЛ
(расстояние между магнитными пробками 10 м)



Проект установки ГДМЛ с секциями многопробочного удержания (длина 24 метра)
GDMT installation project with multimirror sections (length 24 meters)

В настоящее время разрабатывается техническая документация ГДМЛ. На четырех установках меньшего масштаба (ГДЛ, СМОЛА, ГОЛ-NB, КОТ) проводятся поддерживающие эксперименты по моделированию отдельных аспектов работы ГДМЛ. Проведение экспериментов на указанных стендах и на установке ГДМЛ и дальнейшее развитие программы УТС потребует труда большого количества квалифицированных физиков-плазмистов. Интенсивные исследования в области управляемого термоядерного синтеза и большое количество существующих и новых проектов плазменных установок гарантируют выпускникам кафедры трудоустройство как в России, так и за рубежом.

Кафедральные спецкурсы

Кафедра готовит физиков-исследователей, способных вести плодотворную научно-исследовательскую работу в различных областях физики плазмы, а также заниматься научно-педагогической деятельностью. Для этого студентам предлагается двухуровневая система кафедральных спецкурсов¹:

- в бакалаврской программе даются основы теории плазмы и методов исследования плазмы;

¹ <http://wwwold.inp.nsk.su/chairs/plasma/>.

• в магистратуре студенты более глубоко знакомятся с физикой плазмы применительно к самым современным существующим в мире и ИЯФ установкам по управляемому термоядерному синтезу, а также с использованием плазмы в промышленности.

Часть курсов читается с года основания кафедры, но это не означает, что их содержание остается неизменным. Каждое новое поколение преподавателей вносит в них свои модификации в соответствии с развитием физики плазмы и меняющимися программами смежных дисциплин, сохраняя всё лучшее, накопленное за предыдущие годы. Курсы являются авторскими, оригинальными и не имеют аналогов в России.

Достаточно подробное описание курсов кафедры физики плазмы приведено в статье [1], а также на сайте кафедры ².



Состав кафедры физики плазмы.

Сидят (слева направо): С. Л. Синицкий, А. А. Шошин, А. В. Аржаников, А. Д. Беклемишев.

Стоят: В. В. Анненков, Э. А. Федоренков, И. В. Тимофеев, М. С. Христо, А. А. Лизунов,

Т. Д. Ахметов, Д. И. Сковородин, В. В. Поступаев, И. С. Черноштанов, А. В. Судников

Members of the department of plasma physics.

Sitting (from left to right): S. L. Sinitsky, A. A. Shoshin, A. V. Arzhannikov, A. D. Beklemishev.

Stand: V. V. Annenkov, E. A. Fedorenkov, I. V. Timofeev, M. S. Christo, A. A. Lizunov,

T. D. Akhmetov, D. I. Skovorodin, V. V. Postupstuyev, I. S. Chernoshtanov, A. V. Sudnikov

Спецкурсы для обучающихся в бакалавриате

Дисциплина «**Основы физики плазмы**» предназначена для обучения студентов-физиков теоретическим основам физики плазмы. Данный курс читается с 1972 г., структура курса была заложена акад. Д. Д. Рютовым, основной учебник написан проф. И. А. Котельниковым, сейчас лектор – А. Д. Беклемишев.

² <http://wwwold.inp.nsk.su/chairs/plasma/>; <http://www.phys.nsu.ru/department/index.php/chairs/fp>

В курсе дисциплины **«Магнитная гидродинамика»** знакомят с основными теоретическими моделями описания плазмы в гидродинамическом подходе. Данный курс читается с 1972 г., он также сложился под влиянием акад. Д. Д. Рютова, сейчас лектор и автор учебника – проф. И. А. Котельников.

Дисциплина **«Коллективные явления в плазме»** предназначена для ознакомления с иерархией моделей описания плазмы, с кинетическим и гидродинамическим подходами к исследованию волновых свойств плазмы. Курс читается с 1980-х гг., в 2014 г. переработан И. В. Тимофеевым. Сейчас лектор – Д. И. Сковородин.

«Техника плазменного эксперимента» предназначена для обучения основам экспериментальной техники, использующейся для постановки крупных экспериментов по физике плазмы. Основной целью освоения дисциплины является ознакомление с физическими принципами и техническими особенностями систем, оборудования, узлов и отдельных важных элементов, использующихся для создания крупной плазменной установки и проведения сложного эксперимента по физике плазмы и УТС. Курс читали А. Г. Пономаренко (1981–1984 гг.), В. Г. Дудников (1988 г.), В. С. Койдан (с 1989 по 2003 г.), В. И. Давыденко, сейчас лектор – С. В. Полосаткин.

Основной целью освоения дисциплины **«Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1»** является ознакомление с основными методами и оборудованием, используемыми для экспериментального исследования плазмы, принципом работы современных диагностических комплексов на плазменных установках, а также с методом обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных. Данный курс читается на кафедре физики плазмы более 35 лет. Первым лектором был Э. П. Кругляков (1972 г.), затем курс преподавали В. М. Лагунов, А. А. Иванов (с 1988 по 1999 г.), П. А. Багрянский (2000–2003 гг.), А. В. Анискин (2004–2016 гг.), сейчас лектор – А. В. Судников.

Дисциплина **«Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 2»** посвящена некоторым разделам диагностики плазмы, которые не рассматривались в части 1 курса (главным образом это оптические диагностики плазмы, диагностики мощных пучков заряженных частиц и системы сбора данных крупных плазменных установок). Данный курс читается на кафедре физики плазмы более 30 лет. Его преподавали: Б. А. Князев (1988–1991 гг.), С. В. Лебедев (1994 г.), А. В. Бурдаков (1995–2001 гг.), В. В. Поступаев, И. А. Иванов, сейчас лектор – А. А. Лизунов.

Спецкурсы для обучающихся в магистратуре

Дисциплина **«Дополнительные главы теории плазмы»** предназначена для ознакомления студентов-физиков, специализирующихся в области физики плазмы, с терминологией и основными результатами теоретической физики плазмы, теории турбулентности и динамики сложных систем в приложении к физике горячей плазмы. Курс разработан и читается с 2002 г. А. Д. Беклемишевым.

Курс **«Инженерно-физические проблемы УТС»** знакомит слушателей с состоянием исследований на современных термоядерных установках разных классов. Рассматриваются основные направления: классические и «сферические» токамаки, стеллараторы, другие системы с магнитным удержанием, системы инерциального УТС. Данный курс читается более 30 лет, он преподавался В. Г. Дудниковым (1988–1991 гг.), А. А. Кабанцевым (с 1994 по 1998 г.). В 2000 г. курс полностью переработан В. В. Поступаевым, который читает его и в настоящее время.

Дисциплина **«Мощные электронные и ионные пучки»** предназначена для обучения студентов-физиков теоретическим и экспериментальным основам физики мощных электронных и ионных пучков. В курс входит ознакомление с принципами генерации и транспортировки мощных пучков заряженных частиц, устройствами для их реализации и теоретическими моделями для описания процессов, происходящих во время генерации и транспорти-

ровки. Курс разработал в 1993 г. А. В. Аржанников и читал до 2001 г., затем его сменил С. Л. Синицкий.

Главной целью освоения дисциплины **«Низкотемпературная плазма и газовый разряд»** является ознакомление с основными типами газового разряда и с рядом физических процессов, имеющих существенное значение для поддержания низкотемпературной плазмы. Данный курс читается с 1975 г. Его преподавали Б. А. Князев (1981–1988 и 1996–1999 гг.), В. И. Давыденко (1989–1996, 2000–2003, 2006–2012 гг.), Ю. И. Бельченко (в 2004–2005 гг.), сейчас лектор – Т. Д. Ахметов.

«Плазма в космосе» предназначена для ознакомления магистрантов с фундаментальными физическими процессами, происходящими в космосе, строением и эволюцией наблюдаемой части Вселенной, а также с экспериментальными методами и теоретическими моделями, используемыми для изучения и описания космической плазмы. Курс читается более 35 лет, основа заложена Д. Д. Рютовым, затем его преподавал И. А. Котельников, а с 1999 г. в полностью переработанном виде курс читает А. Д. Беклемишев, с 2018 г. его сменил В. В. Анненков.

Целью дисциплины **«Плазменные технологии»** является ознакомление студентов с плазменными технологиями обработки материалов и создания микроструктур, широко используемыми в производстве изделий микроэлектроники и микромеханики, а также с физическими явлениями, лежащими в их основе. Данный курс является оригинальным, в НГУ читается с 1995 г. Первым лектором был В. Г. Дудников, с 1996 г. его читал Ю. И. Бельченко, ему помогали А. С. Золкин (2001 г.) и И. Н. Чуркин (2004–2015 гг.), сейчас лектор – А. А. Шошин.

«Физика открытых ловушек» предназначена для ознакомления магистрантов-физиков с текущим состоянием исследований открытых магнитных ловушек для удержания высокотемпературной плазмы, а также с физическими принципами, определяющими работу открытых магнитных ловушек. В 1995 и 1996 гг. курс читал А. М. Кудрявцев, затем в 1996–1998 гг. – В. И. Давыденко, с 1999 г. – А. А. Иванов, с 2018 г. – В. В. Приходько.

Конкурсы и стипендии. Достижения студентов и выпускников кафедры

За последние 15 лет кафедрой подготовлено 119 бакалавров и 76 магистров. Уже на уровне бакалавриата студенты кафедры занимаются научными исследованиями, результаты которых они успешно докладывают не только на студенческих, но и на «взрослых» научных конференциях.

Полученные в рамках выполнения квалификационных работ результаты выпускников кафедры успешно публикуются в ведущих мировых журналах по физике плазмы, таких как «Nuclear Fusion», «Physics of Plasmas», «Plasma Physics and Controlled Fusion» и др.

Во время обучения на кафедре студенты постоянно занимают призовые места на Международной научной студенческой конференции и в Конкурсе молодых ученых ИЯФ СО РАН.

Студенты кафедры, проходящие практику в Институте ядерной физики, регулярно становятся лауреатами стипендий имени выдающихся ученых по соответствующим направлениям.

Отдельные выдающиеся студенческие работы получали признание на всероссийском уровне. Так, А. В. Судников и В. В. Анненков одерживали победы в конкурсе студентов-физиков фонда «Династия», А. А. Горн получил медаль Российской академии наук за работу «Инжекция электронного пучка в кильватерную волну в ограниченной аксиально симметричной плазме», являвшейся его магистерской диссертацией.

Основная часть выпускников магистратуры продолжает заниматься научной деятельностью, обучаясь в аспирантуре ИЯФ СО РАН или НГУ. Уже на данном этапе они успешно получают грантовую поддержку своих исследований. Так, например, были одобрены все заявки на поддержку научных исследований наших выпускников в рамках конкурса РФФИ «Аспиранты». Больше 15 выпускников кафедры удостоились именных стипендий Президен-

та РФ для аспирантов. В среднем около тридцати пяти процентов выпускников магистратуры успешно защищают кандидатские диссертации в конце обучения в аспирантуре.

Некоторые научные достижения выпускников кафедры последних лет:

- И. В. Тимофеевым совместно с учениками (В. В. Анненковым и Е. П. Волчок) открыты и исследованы новые механизмы генерации электромагнитного излучения в плазме с лазерными или электронными пучками. Полученные ими результаты актуальны в задачах разработки мощных источников узкополосного ТГц излучения, а также для интерпретации солнечных радиовсплесков;
- группой К. В. Лотова разрабатывается теоретический базис передовых экспериментов по плазменному кильватерному ускорению частиц. В частности, при их определяющем участии проводится первый в мире эксперимент по ускорению частиц длинным протонным пучком (проект AWAKE в ЦЕРНе);
- А. С. Аракчеевым и Д. И. Сковородиным проведены значительные теоретические и экспериментальные исследования процессов взаимодействия мощных потоков плазмы с поверхностью металлов. Такие исследования являются ключевыми в задаче разработки внутренних стенок будущих термоядерных реакторов;
- А. В. Аржанниковым с группой выпускников кафедры физики плазмы теоретически обоснованы и экспериментально доказаны различные физические механизмы генерации мощным релятивистским электронным пучком мегаваттных потоков излучения на первой и второй гармонике плазменной частоты [20; 22]. В потоке субмиллиметрового излучения микросекундной длительности достигнут рекордный уровень энергосодержания;
- с помощью теоретических и экспериментальных методов С. Л. Синицким и Е. С. Сандаловым были исследованы неустойчивости мощных релятивистских электронных пучков. Разработанные ими способы подавления поперечных неустойчивостей сыграли определяющую роль в успешном запуске новейших сильноточных линейных индукционных ускорителей, необходимых для задач скоростной рентгенографии;
- под руководством А. В. Судникова на установке СМОЛА [14] было осуществлено экспериментальное подтверждение идеи винтового удержания плазмы, предложенной А. Д. Беклемишевым. Системы такого рода позволяют не только улучшить удержания термоядерной плазмы в открытых магнитных ловушках, но также могут быть использованы в качестве плазменного двигателя на космических аппаратах;
- О. З. Сотниковым с коллегами из лаборатории 9-0 разработан и исследован новый ВЧ источник отрицательных ионов для инжектора высокоэнергетичных нейтралов. С помощью таких установок осуществляется основной нагрев плазмы до термоядерных температур [2];
- Д. В. Яковлевым совместно с командой ГДЛ исследована возможность ЭЦР нагрева плазмы в крупномасштабной открытой магнитной ловушке [8]. Была обнаружена возможность нагрева плазмы до температуры 1 кэВ, а также увеличение времени ее удержания в ловушке. Полученные результаты являются рекордными для систем открытого типа и демонстрируют перспективность развития данного направления.

Заключение

Коллектив кафедры физики плазмы НГУ приглашает студентов и магистрантов выбрать одну из наших специализаций, получить высокую квалификацию и незабываемый опыт работы в научном коллективе на передовых позициях науки. Мы уверены, что все студенты кафедры сделают основательные дипломные работы под квалифицированным руководством и найдут интересный вид деятельности после окончания университета.

Список литературы

1. **Кругляков Э. П., Лотов К. В., Шошин А. А.** Кафедра физики плазмы // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2006. Т. 1, вып. 1. С. 13–22.

2. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 116017. DOI 10.1088/1741-4326/ac175a
3. **Taskaev S., Berendelev E., Bikchurina M. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, no. 10, p. 350. DOI 10.3390/biology10050350
4. **Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al.** Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection. *Fusion Engineering and Design*, 2021, no. 168, p. 112426. DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112426
5. **Ivanov A. A., Prihodko V. V.** Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, no. 6, p. 063001. DOI 10.1088/0741-3335/55/6/063001
6. **Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I.** Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 351–360. DOI 10.13182/FST10-A9497
7. **Иванов А. А., Приходько В. В.** Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы // Успехи физических наук. 2017. Т. 187, вып. 5. С. 547–574. DOI 10.3367/UFNr.2016.09.037967
8. **Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al.** Stable confinement of high-electron-temperature plasmas in the GDT experiment. *Nuclear Fusion*, 2018, vol. 58, p. 094001. DOI 10.1088/1741-4326/aacb88
9. **Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror. *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, no. 5, p. 053009. DOI 10.1088/0029-5515/55/5/053009
10. **Shalashov A. G., Solomakhin A. L., Gospodchikov E. D. et al.** Electron cyclotron emission at the fundamental harmonic in GDT magnetic mirror. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, p. 082506. DOI 10.1063/1.4994793
11. **Arzhannikov A. V., Anikeev A. B., Beklemishev A. D. et al.** Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 090004. DOI 10.1063/1.4964246
12. **Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V. et al.** Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, vol. 30 (181). DOI 10.1007/s41365-019-0707-y
13. **Gota H. et al.** Overview of C-2W: high temperature, steady-state beam-driven field-reversed configuration plasmas. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 106039. DOI 10.1088/1741-4326/ac2521
14. **Бурдаков А. В., Поступаев В. В.** Многопробочная ловушка: путь от пробкотрона Будкера к линейному термоядерному реактору // Успехи физических наук. 2018. Т. 188, С. 651–671. DOI 10.3367/UFNr.2018.03.038342
15. **Postupaev V. V. et al.** Results of the first plasma campaign in a start configuration of GOL-NB multiple-mirror trap. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, p. 025008. DOI 10.1088/1361-6587/ab53c2
16. **Beklemishev A. D.** Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63 (1T), pp. 355–357. DOI 10.13182/FST13-A16953
17. **Beklemishev A. D.** Helical plasma thruster. *Phys. Plasmas*, 2015, no. 22, p. 103506.
18. **Аржаников А. В., Беклемишев А. Д.** Электрореактивный двигатель высокой тяги с гофрированным винтовым магнитным полем // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 1. С. 107–118.
19. **Sudnikov A. V. et al.** Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness. *Journal of Plasma Physics*, 2020, vol. 86, no. 5, p. 905860515.

20. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012, no. 54, p. 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
21. **Аржанников А. В. и др.** Патент RU 2501146C1. Заявка: 2012130121/07, 16.07.2012.
22. **Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A. et al.** Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, no. 62, p. 045002. DOI 10.1088/1361-6587/ab72e3
23. **Аржанников А. В., Котельников И. А.** Метод решения нестационарной задачи возбуждения корабельных волн подводным объектом // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4. С. 43–59.
24. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. *Phys. Rev. E*, 2016, no. 94, p. 023103.
25. **Аржанников А. В., Гинзбург Н. С. и др.** Разработка двухстадийного планарного МСЭ терагерцового диапазона на основе ускорителя ЭЛМИ // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2012, Т. 7, вып. 1. С. 5–14.
26. **Arzhannikov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A. et al.** Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a free – electron maser. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 117, no. 11, p. 114801.
27. **Vyacheslavov L., Vasilyev A., Arakcheev A. et al.** In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, no. 544, p. 152669. DOI 10.1016/j.jnucmat.2020.152669
28. **Sulyaev Yu. S., Alexandrov E. V., Burdakov A. V. et al.** Engineering Calculations and Preparation for Manufacturing of ITER Equatorial port #11. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 6, pp. 1631–1636. DOI 10.1109/TPS.2020.2985113
29. **Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Postupaev V. V.** Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 162–181. DOI 10.1007/s10894-018-0174-1

References

1. **Kruglyakov E. P., Lotov K. V., Shoshin A. A.** Department of Plasma Physics. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 13–22. (in Russ.)
2. **Sotnikov O. et al.** Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 116017. DOI 10.1088/1741-4326/ac175a
3. **Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, no. 10, p. 350. DOI 10.3390/biology10050350
4. **Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M. et al.** Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection. *Fusion Engineering and Design*, 2021, no. 168, p. 112426. DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112426
5. **Ivanov A. A., Prikhodko V. V.** Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, no. 6, p. 063001. DOI 10.1088/0741-3335/55/6/063001
6. **Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I.** Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, vol. 57, no. 4, pp. 351–360. DOI 10.13182/FST10-A9497
7. **Ivanov A. A., Prikhodko V. V.** Gas dynamic trap: experimental results and future prospects. *Phys. Usp.*, 2017, no. 60, pp. 509–533. DOI 10.3367/UFNr.2016.09.037967

8. **Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al.** Stable confinement of high-electron-temperature plasmas in the GDT experiment. *Nuclear Fusion*, 2018, vol. 58, p. 094001. DOI 10.1088/1741-4326/aacb88
9. **Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al.** Overview of ECR plasma heating experiment in the GDT magnetic mirror. *Nuclear Fusion*, 2015, vol. 55, no. 5, p. 053009. DOI 10.1088/0029-5515/55/5/053009
10. **Shalashov A. G., Solomakhin A. L., Gospodchikov E. D. et al.** Electron cyclotron emission at the fundamental harmonic in GDT magnetic mirror. *Physics of Plasmas*, 2017, vol. 24, p. 082506. DOI 10.1063/1.4994793
11. **Arzhannikov A. V., Anikeev A. B., Beklemishev A. D. et al.** Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1771, p. 090004. DOI 10.1063/1.4964246
12. **Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V. et al.** Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, vol. 30 (181). DOI 10.1007/s41365-019-0707-y
13. **Gota H. et al.** Overview of C-2W: high temperature, steady-state beam-driven field-reversed configuration plasmas. *Nuclear Fusion*, 2021, vol. 61, p. 106039. DOI 10.1088/1741-4326/ac2521
14. **Burdakov A. V., Postupaev V. V.** Multiple-mirror trap: a path from Budker magnetic mirrors to linear fusion reactor. *Phys. Usp.*, 2018, no. 61, pp. 582–600. DOI 10.3367/UFNr.2018.03.038342
15. **Postupaev V. V. et al.** Results of the first plasma campaign in a start configuration of GOL-NB multiple-mirror trap. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, p. 025008. DOI 10.1088/1361-6587/ab53c2
16. **Beklemishev A. D.** Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63 (1T), pp. 355–357. DOI 10.13182/FST13-A16953
17. **Beklemishev A. D.** Helical plasma thruster. *Phys. Plasmas*, 2015, no. 22, p. 103506.
18. **Arzhannikov A. V., Beklemishev A. D.** Electro-jet rocket engine with big thrust at helical corrugated magnetic field. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 107–118. (in Russ.)
19. **Sudnikov A. V. et al.** Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness. *Journal of Plasma Physics*, 2020, vol. 86, no. 5, p. 905860515.
20. **Arzhannikov A. V., Timofeev I. V.** Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2012, no. 54, p. 105004. DOI 10.1088/0741-3335/54/10/105004
21. **Arzhannikov A. V. et al.** Patent RU 2501146C1. Application: 2012130121/07, 16.07.2012.
22. **Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A. et al.** Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, no. 62, p. 045002. DOI 10.1088/1361-6587/ab72e3
23. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Method for Solving the Unsteady Problem of Excitation of Ship Waves by an Underwater Object. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 43–59. (in Russ.)
24. **Arzhannikov A. V., Kotelnikov I. A.** Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. *Phys. Rev. E*, 2016, no. 94, p. 023103.
25. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S. et al.** Development of the two-stage planar FEM for the terahertz band on the basis of the ELMI accelerator. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 5–14. (in Russ.)

26. **Arzhannikov A. V., Kalinin P. V., Kuznetsov S. A. et al.** Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a free – electron maser. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, vol. 117, no. 11, p. 114801.
27. **Vyacheslavov L., Vasilyev A., Arakcheev A. et al.** In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, no. 544, p. 152669. DOI 10.1016/j.jnucmat.2020.152669
28. **Sulyaev Yu. S., Alexandrov E. V., Burdakov A. V. et al.** Engineering Calculations and Preparation for Manufacturing of ITER Equatorial port #11. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, no. 6, pp. 1631–1636. DOI 10.1109/TPS.2020.2985113
29. **Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Postupaev V. V.** Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 162–181. DOI 10.1007/s10894-018-0174-1

Информация об авторах

Владимир Вадимович Анненков, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher H-5894-2016

Scopus Author 55900762900

SPIN 9735-1501

Андрей Васильевич Аржанников, доктор физико-математических наук, профессор

WoS Researcher C-2443-2019

Scopus Author 7004910972

Пётр Андреевич Багрянский, доктор физико-математических наук

WoS Researcher ABB-3937-2020

Scopus Author 6603485573

SPIN 9779-7904

Алексей Дмитриевич Беклемишев, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher F-7301-2014

Scopus Author 9532393600

SPIN 9163-4574

Владимир Иванович Давыденко, доктор физико-математических наук

Scopus Author 7005060978

SPIN 8195-1493

Станислав Леонидович Синицкий, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher AET-9250-2022

Scopus Author 6603491134

SPIN 7327-3476

Дмитрий Иванович Сковородин, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher AAD-7116-2019

Scopus Author 37041632600

SPIN 5215-1498

Антон Вячеславович Судников, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher AAB-8348-2022

Scopus Author 37073449300

SPIN 5732-0541

Иван Сергеевич Черноштанов, кандидат физико-математических наук

Scopus Author 37072056100

SPIN 1191-6208

Эдуард Александрович Федоренков, секретарь кафедры

Scopus Author 57208029095

SPIN 8080-6364

Андрей Александрович Шошин, кандидат физико-математических наук

WoS Researcher F-6338-2014

Scopus Author 6603339475

SPIN 7982-7407

Information about the Authors

Vladimir V. Annenkov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher H-5894-2016

Scopus Author 55900762900

SPIN 9735-1501

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

WoS Researcher C-2443-2019

Scopus Author 7004910972

Peter A. Bagryansky, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher ABB-3937-2020

Scopus Author 6603485573

SPIN 9779-7904

Alexei D. Beklemishev, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher F-7301-2014

Scopus Author 9532393600

SPIN 9163-4574

Vladimir I. Davydenko, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)

Scopus Author 7005060978

SPIN 8195-1493

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AET-9250-2022

Scopus Author 6603491134

SPIN 7327-3476

Dmitry I. Skovorodin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AAD-7116-2019

Scopus Author 37041632600

SPIN 5215-1498

Anton V. Sudnikov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher AAB-8348-2022

Scopus Author 37073449300

SPIN 5732-0541

Ivan S. Chernoshtanov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

Scopus Author 37072056100

SPIN 1191-6208

Eduard A. Fedorenkov, Secretary of Department

Scopus Author 57208029095

SPIN 8080-6364

Andrey A. Shoshin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics)

WoS Researcher F-6338-2014

Scopus Author 6603339475

SPIN 7982-7407

Статья поступила в редакцию 25.05.2021;

одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021

The article was submitted 25.05.2021;

approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021

Учебно-методическая статья

УДК 535

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

Кафедра квантовой оптики физического факультета Новосибирского государственного университета

Анатолий Михайлович Шалагин¹

Леонид Вениаминович Ильичев²

^{1,2} Институт автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

^{1,2} Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹ shalagin@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9127-2882>

² leonid@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-3089-4861>

Аннотация

Представлена информация о кафедре квантовой оптики Новосибирского государственного университета. Кратко описана история создания кафедры ее основателем членом-корреспондентом РАН Сергеем Глебовичем Раутианом, описаны основные направления подготовки студентов и их связь с научными исследованиями преподавателей и студентов кафедры.

Ключевые слова

физика лазеров, нелинейная спектроскопия, терагерцовая спектроскопия, нанофотоника, волоконная оптика

Для цитирования

Шалагин А. М., Ильичев Л. В. Кафедра квантовой оптики // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 142–149. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

Quantum Optics Department of the Physics Department at Novosibirsk State University

Anatoliy M. Shalagin¹, Leonid V. Ilchev

^{1,2} Institute of Automation and Electrometry
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

^{1,2} Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹ shalagin@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-9127-2882>

² leonid@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0003-3089-4861>

Abstract

There presented an information on the department of Quantum optics of the Novosibirsk State University. The brief history of the Department since its foundation by the corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Sergei G. Rautian, and main educational directions are described along with their relations to scientific research of teachers and students of the Department.

Keywords

laser physics, nonlinear spectroscopy, THz spectroscopy, nanophotonics, fiber optics

For citation

Shalagin A. M., Ilchev L. V. Quantum Optics Department of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 142–149. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-142-149

© Шалагин А. М., Ильичев Л. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 142–149

Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 142–149

Общая характеристика

Заведующий кафедрой:
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. М. Шалагин
Направление подготовки:
510412 – Физика оптических явлений
Базовый институт:
Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Сервер кафедры:
<http://www.phys.nsu.ru/department/index.php/chairs/ko>

Из истории

Кафедра квантовой оптики Новосибирского государственного университета (НГУ) основана в 1965 г. выдающимся ученым, членом-корреспондентом РАН Сергеем Глебовичем Раутианом, создателем обширной и широко известной научной школы физиков-лазерщиков в Сибири. Кафедра получила свое нынешнее название в 1977 г. До этого с 1965 г. на факультете существовала специальность «Квантовая радиофизика» при кафедре физики полупроводников. В 1969 г. специальность выделилась в отдельную кафедру. С момента создания и до 2002 г. (с перерывом с 1972 по 1977 г.) кафедрой руководил чл.-корр. РАН С. Г. Раутиан. С 2002 г. по настоящее время заведующим кафедрой является ученик С. Г. Раутиана академик РАН Анатолий Михайлович Шалагин.

За время существования кафедра выпустила более 500 специалистов (в среднем 10–12 выпускников в год). Около 25 выпускников получили степень доктора наук, а более 80 защитили кандидатские диссертации. Трое выпускников стали членами РАН. Многие выпускники имеют государственные и академические награды. Выпускники кафедры работают во многих организациях России: Институте автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирском государственном университете, Институте неорганической химии СО РАН, Институте лазерной физики СО РАН, Институте ядерной физики СО РАН, Институте физики полупроводников СО РАН, Институте геологии и геофизики СО РАН, Институте оптики атмосферы СО РАН, Институте физики им. Л. Киренского СО РАН, Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН, Институте химической кинетики и горения СО РАН. Многие выпускники успешно трудятся в научных организациях дальнего зарубежья (США, Великобритания, Германия, Швеция и др.).



Член-корреспондент РАН
С. Г. Раутиан



Академик РАН
А. М. Шалагин

Кадровый состав

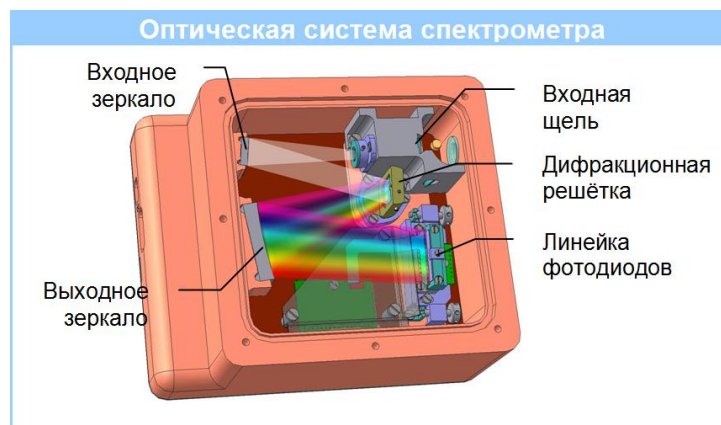
Шалагин Анатолий Михайлович, зав. кафедрой, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.
Ильичев Леонид Вениаминович, зам. зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, проф.
Бабин Сергей Алексеевич, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.
Бражников Денис Викторович, канд. физ.-мат. наук, доц.
Ватник Илья Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук, ассистент
Каблуков Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, ст. преп.
Смирнов Сергей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, доц.
Томилин Владимир Александрович, канд. физ.-мат. наук, ст. преп.

Трунов Владимир Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц.
Французов Павел Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, ст. преп.

Специализация

«Оптические измерения» – первый из спецкурсов, с которым знакомятся студенты третьего года обучения, поступившие на кафедру квантовой оптики. В рамках курса слушатели приобретают базовые знания о технике оптического эксперимента, методах, позволяющих исследовать и описывать свойства света. При этом акцент ставится на понимание физики, что позволит чувствовать себя уверенно в лаборатории любого уровня оснащённости.

Спецкурс разделен на несколько частей, посвященных измерениям каждого из параметров электромагнитной волны. В первую очередь рассматриваются измерения интенсивности излучения с помощью измерительных тепловых, болометрических, фотоакустических приемников и исследование ее динамики с помощью полупроводниковых или фотоэлектронных датчиков. Вторая часть посвящена измерениям пространственного распределения интенсивности: использованию полупроводниковых КМОП и ПЗС матриц и построению изображений на них. Рассматривается подход матричной оптики, и строится описание основных оптических приборов – микроскопов и телескопов. Отдельное внимание уделяется анализу искажений, вносимых при построении изображений. Третья часть посвящена анализу спектра излучения. Здесь рассматриваются как классические спектральные приборы, так и более молодые методы: сканирующие интерферометры, Фурье-спектрометрия, спектрометрия оптического смешения. В этой же части рассматриваются способы измерения пространственного и временного распределения фазы излучения. Отдельный раздел курса посвящен измерению поляризационных свойств электромагнитной волны. Наконец, рассматриваются и самые современные методы и приборы, появившиеся в последние десятилетия – оптические векторные анализаторы, автокорреляторы частотно-временного стробирования, оптические рефлектометры и т. д.



Спектрометр «Колибри-2», разработанный «ВМК-оптоэлектроника»
совместно с сотрудниками ИАиЭ СО РАН
Spectrometer 'Colibri-2' designed in 'VMK-optoelectronics'
in collaboration with IA&E SB RAS

Параллельно с изучением физических принципов измерений, студенты третьего года осваивают оптические экспериментальные методы в научных лабораториях Института автоматизации и электротехники СО РАН и других институтов.

Курс лекций «Физика лазеров» дает студентам знания об основных физических процессах, обеспечивающих лазерную генерацию: о вынужденном излучении, усилении и поглощении света, об обратной связи в лазерах и потерях в резонаторе, об условии получения генерации. Излагается история создания лазеров. Сообщаются параметры современных лазеров. Даются основы физики взаимодействия излучения с газом, физики гауссовых пучков, волноводов и резонаторов. Рассматриваются практически все существующие типы лазеров: гелий-неоновый лазер, газовые лазеры на атомных переходах с прямым электронным возбуждением, ионные лазеры, непрерывные лазеры на переходах атомов металлов, молекулярные лазеры, газодинамические и химические лазеры, импульсные лазеры на переходах атомов и молекул, лазеры на растворах органических красителей, твердотельные лазеры, полупроводниковые и оптоволоконные лазеры.

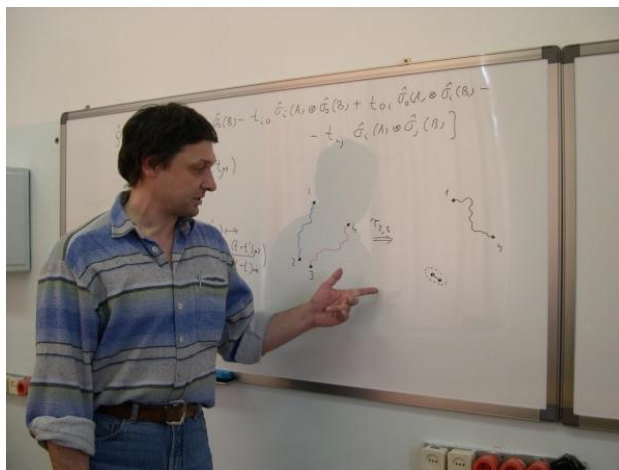
Курс лекций «Физическая оптика» посвящен основам физики распространения электромагнитных волн оптической области спектра в однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных средах. Прежде всего излагается физика плоских волн в однородной изотропной среде, отражение и преломление волн на плоской границе, распространение волн в неоднородных средах. Изучается явление дифракция. Значительное внимание уделено понятиям и явлениям кристаллооптики. Во второй части курса рассматриваются эффекты, связанные с молекулярным рассеянием света и уширением спектральных линий, коллапсом спектральных структур, а также элементы статистической оптики. Чтение лекций сопровождается семинарами, чрезвычайно способствующими активному усвоению материала.

В курсе «Спектроскопия» анализируется систематика спектров многоэлектронных атомов, периодической системы элементов, рассматриваются теория сверхтонкой структуры спектральных линий, соотношения интенсивностей спектральных линий и правила отбора для дипольного излучения. Изучаются влияние эффектов внешнего поля (эффект Штарка и эффект Зеемана). Даны общие свойства и систематика спектров двухатомных молекул. Рассмотрены электронные состояния двухатомных молекул, типы связи по Гунду, колебания и вращение двухатомных молекул, колебания многоатомных молекул, возмущения в колебательных спектрах многоатомных молекул и вращение многоатомных молекул.

Курс «Нелинейная спектроскопия» базируется на основах квантовой механики. Центральной задачей курса является задача о взаимодействии излучения с квантовой системой (в простейшем случае двухуровневой). Исходно это взаимодействие описывается уравнением Шрёдингера. Далее в материалах лекций использован аппарат, ставший традиционным в области нелинейной спектроскопии. Это аппарат, основанный на кинетических уравнениях для матрицы плотности. Из всего многообразия результатов нелинейной спектроскопии в материал лекций отобраны только те, которые прошли проверку временем и стали составлять ее фундамент. Кроме того, материал формировался с учетом максимальной доступности для усвоения студентами. Фактически для понимания материала лекций вполне достаточно знаний основ квантовой механики. Овладев теми методами и подходами, которые изложены здесь, студент вполне будет способен воспринять углубленные и расширенные знания о предмете, которые содержатся как в рекомендованной литературе, так и в свежих научных публикациях. Кроме студентов физических специальностей, представленный материал может быть полезным для аспирантов и молодых научных сотрудников, специализирующихся в области оптики, спектроскопии и лазерной физики.

Курсы лекций «Основы квантовой оптики», «Современные проблемы квантовой оптики» и «Обратная связь в квантовой оптике». Квантовая оптика есть основа многих перспективных технологий завтрашнего и послезавтрашнего дня в сверхточных измерениях, коммуникации, в сфере защиты информации и новых способов ее обработки. Все эти направления используют необычные свойства квантового мира, зачастую не укладывающиеся в рамки традиционной интуиции и «здравого смысла» классической физики. В рамках квантовой оптики сформировалась так называемая инженерия квантовых состояний. Она нацелена на изучение и разработку методов приготовления состояний излучения, не имеющих классического

аналога, таких как «кошки Шрёдингера» или «сжатый» свет, для нужд прикладной и фундаментальной квантовой метрологии. В частности, такие состояния предполагается использовать в будущих этапах модернизации гравитационно-волновых детекторов LIGO, Virgo и KAGRA. В рамках квантовой инженерии появились также революционные методы оперирования с отдельными атомами и молекулами, отмеченные Нобелевской премией 2012 г.



Доктор физико-математических наук
Л. В. Ильичев

Современная подготовка физиков-оптиков на уровне магистратуры и аспирантуры невозможна без их основательного знакомства с новыми перспективными направлениями в квантовых технологиях. В свою очередь, создание полноценных учебных курсов такого рода требует активной профессиональной исследовательской работы преподавателей в данной области. Именно так поставлено преподавание на кафедре квантовой оптики, где ведется теоретический поиск новых подходов в квантовой метрологии и управлении квантовыми системами, читается ряд магистерских и аспирантских курсов («Основы квантовой оптики», «Современные проблемы квантовой оптики», «Дополнительные главы квантовой оптики», «Обратная связь в квантовой оптике»).

Одни из наиболее эффективных методов теории управления основаны на использовании обратной связи. Помимо самой управляемой системы, данные алгоритмы требуют наличия устройства, извлекающего информацию из системы путем измерения определенных ее параметров. Второй необходимой составляющей является контроллер, который на основании данных, полученных на шаге измерения, непосредственно осуществляет изменение параметров в соответствии с выбранной стратегией управления (например, для получения заранее заданного состояния системы).



Кандидат физико-математических наук
В. А. Томилин

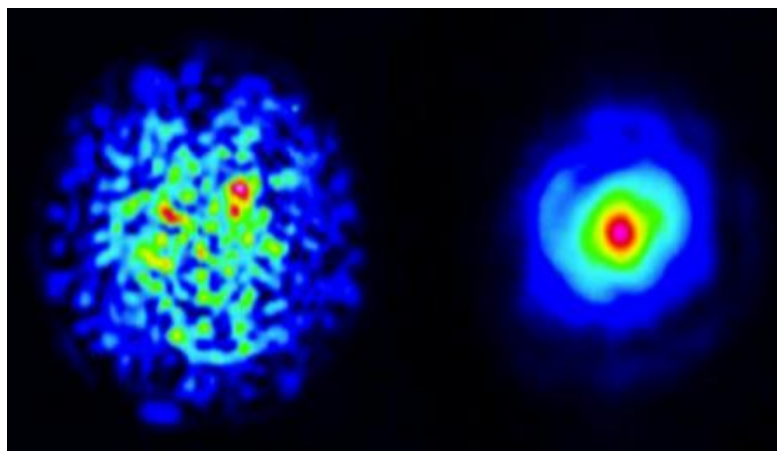
С развитием технологий возникла возможность проводить эксперименты с системами, имеющими существенно квантовые свойства. При этом приобрели актуальность задачи управления их эволюцией. В приложениях важную роль играют так называемые гибридные квантово-классические системы, состояние которых описывается, наряду с квантовыми степенями свободы, еще и некоторыми классическими параметрами, например фазами взаимодействующих с системой оптических полей или ориентациями поляризационных оптических элементов. В цикле работ, выполненных старшим преподавателем кафедры В. А. Томили-

ным под руководством профессора Л. В. Ильичёва, был сформулирован набор эффективных методов управления гибридными системами, основанных на скачкообразных переключениях классических параметров. Инициаторами таких переключений выступают генерируемые квантовой системой случайные события (например, регистрации испущенных спонтанных квантов) или так называемая когерентная обратная связь. В настоящее время работа в этом направлении продолжается; в частности, разрабатываются новые подходы, основанные на управляемой модификации самого процесса измерения, проводимого над системой («распутывании» операции измерения). Эти исследования в перспективе могут привести к созданию нового класса квантовых кибернетических устройств.

Курс лекций «Кинетические проблемы нелинейной спектроскопии» является продолжением и развитием курса «Нелинейная спектроскопия». В основном он посвящен физическим процессам, реализующимся в газовых средах и влияющим на взаимодействие лазерного излучения с газом. Эти процессы порождены столкновениями частиц газа друг с другом, а их влияние, как и должно быть, проявляется двояко. Во-первых, изменяются характеристики излучения (энергетические и спектральные), возможно возникновение генерации в новых спектральных областях. Во-вторых, излучение меняет движение частиц газа, а также под действием излучения меняется состояние самой газовой системы. Рассмотрение упомянутых физических процессов основано на решении квантовых кинетических уравнений для матрицы плотности с интегралом столкновений. Излучение в условиях большого доплеровского уширения непременно создает существенно неравновесные распределения по скоростям на «рабочих» уровнях частиц (атомов или молекул). Столкновения в той или иной степени модифицируют эти распределения, что ярко проявляется в спектрах (поглощения, усиления, спонтанного испускания) излучения. Этот же факт (формирование неравновесных распределений на уровнях) приводит, как оказывается, к неожиданным изменениям состояния самой газовой среды, к серии так называемых светоиндуцированных газокинетических явлений, открытых сотрудниками и выпускниками кафедры. В их основе лежит своеобразное несиловое воздействие лазерного излучения на смесь газов, приводящее к неравновесности макроскопических характеристик газовой системы (демон Максвелла). Самым ярким из них является светоиндуцированный дрейф (СИД). Он состоит в возникновении относительного движения (дрейфа) газового компонента, взаимодействующего с излучением, относительно буферного компонента. Скорость дрейфа в оптимальных условиях сопоставима со скоростью звука.

Курс «Волоконная оптика» состоит из двух частей, каждая из которых рассчитана на семестр. Волоконная оптика – современная быстроразвивающаяся область физики, которая становится неотъемлемой частью физического и инженерного образования в связи с ее широким применением как в научных исследованиях, так и в повседневной жизни: в оптической связи и системах широкополосного доступа, сенсорике и информационно-измерительных системах, лазерной технике и лазерных технологиях. В первой части курса лекций рассматриваются основы волоконной оптики: устройство и принцип действия волоконного световода, распространение света в рамках геометрической оптики, волновое уравнение и моды световода, качественные количественные характеристики (потери, дисперсия и нелинейность) и типы волоконных световодов, ввод и вывод излучения из световодов, теория связанных мод и волоконные ответвители, объединители и интерферометры, теория, методы изготовления и характеристики волоконных брэгговских решёток (ВБР) и других волоконно-оптических компонент, основы волоконных лазеров. Во второй части рассматриваются вопросы нелинейной волоконной оптики и волоконно-оптических систем, в частности нелинейное уравнение Шрёдингера и различные режимы распространения коротких импульсов в волоконных световодах в присутствии керровской нелинейности, волоконные лазеры с синхронизацией мод и распределенной обратной связью, нелинейные эффекты вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ), волоконные лазеры на основе ВКР и ВРМБ, генерация гармоник в волокне, волоконные сенсорные сис-

темы на основе ВБР, комбинационного, рэлеевского и бриллюэновского рассеяния, волоконно-оптические линии связи со спектральным уплотнением каналов, перспективные системы связи.



Нелинейное преобразование многомодового пучка со спекл-картиной интерференции мод в квазимоноמודовый пучок при распространении в многомодовом градиентном световоде

Non-linear transformation of a multimode beam with speckle interference structure into a quasi-single-mode beam in the course of its propagation in a multimode gradient wave-guide

Курс «Нелинейная фотоника» посвящен основам нелинейной оптики и фотоники, теории поляризации среды в сильных магнитных полях и фазового синхронизма. Включает в себя изложение тем о нелинейных аналогах полного внутреннего отражения и явления Брюстера, о явлении пространственной синфазности (синхронизма), о трехволновом стационарном взаимодействии в квадратичной нелинейной среде и параметрическом усилении в нелинейной среде, о явлениях оптического выпрямления, нелинейного просветления среды, вынужденного комбинационного рассеяния, распространения световых пучков и волновых пакетов в нелинейных диспергирующих средах, самофокусировки света, распространения света в оптических волноводах и оптических волокнах. Во второй части курса рассматриваются вопросы генерации методами нелинейной оптики лазерного излучения высокой мощности от фемтосекундной до аттосекундной длительности в различных спектральных диапазонах, включая терагерцовый, рентгеновский диапазоны и гамма-диапазон.

Заключение

Студенты первого и второго курсов НГУ при выборе дальнейшей образовательной траектории имеют возможность ознакомиться с информацией о кафедре квантовой оптики на ее сайте. Более детальное ознакомление с возможностями кафедры можно осуществить в день «открытых дверей», который проводится ежегодно в апреле-мае и представляет собой экскурсии в исследовательские лаборатории НГУ, ИАиЭ СО РАН и ИФП СО РАН, где ученые подробно рассказывают об актуальных научных исследованиях по лазерной тематике и демонстрируют действующее научное оборудование. Как правило, на этих экскурсиях студент принимает решение обучаться на данной кафедре и выбирает для себя ту научную группу, в которой он хотел бы проходить научную практику.

Информация об авторах

Анатолий Михайлович Шалагин, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН

Леонид Вениаминович Ильичев, доктор физико-математических наук, профессор

Information about the Authors

Anatoliy M. Shalagin, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Academician of RAS

Leonid V. Ilichev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

*Статья поступила в редакцию 25.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 25.05.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*

Учебно-методическая статья

УДК 621.396.9

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-150-154

**Кафедра физико-технической информатики
физического факультета
Новосибирского государственного университета**

Анастасия Андреевна Глушак

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

a.glushak@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0102-8921>

Аннотация

Кафедра физико-технической информатики физического факультета НГУ готовит специалистов в области программного и аппаратного обеспечения физических экспериментов, хранения и обработки информации. Программа курсов кафедры предполагает изучение методов программирования, информационных технологий и аппаратного обеспечения экспериментальных установок в дополнение к фундаментальному образованию в области физики и математики, которое получают все студенты ФФ НГУ. Выпускники кафедры – специалисты в области информационных технологий с универсальной общефизической подготовкой.

Ключевые слова

физический факультет, автоматизация эксперимента, информационные технологии

Для цитирования

Глушак А. А. Кафедра физико-технической информатики физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 150–154. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-150-154

**Chair of Physical and Technical Informatics
of the Physics Department at Novosibirsk State University**

Anastasiia A. Glushak

Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

a.glushak@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0102-8921>

Abstract

The Chair of Physics and Technology of the Physics Department trains specialists in the field of software and hardware for physical experiments, storage, and processing of information. The program of the courses involves the study of programming methods, information technologies and hardware for experimental installations in addition to fundamental education in physics and mathematics, which all students of the physics department of NSU receive. The graduates of the chair are specialists in the field of information technology with universal general physical training.

© Глушак А. А., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 1. С. 150–154
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 150–154

Keywords

the Physics Department, experiment automation, information technology

For citation

Glushak A. A. Chair of Physical and Technical Informatics of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 150–154. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-150-154

Краткая характеристика кафедры, ее история и сегодняшний день

Идея создания кафедры физико-технической информатики родилась в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН и была реализована в 1984 г. ИЯФ стал базовым институтом кафедры.

Большой вклад в осуществление идеи организации кафедры физико-технической информатики внесли заместитель директора ИЯФ СО РАН В. А. Сидоров, ставший первым заведующим кафедрой, и профессор В. И. Нифонтов, сначала бывший заместителем, а с 1992 по 2001 г. – заведующим.

На кафедре работают 35 сотрудников, из них 20 ассистентов, 9 старших преподавателей, 5 доцентов и 1 профессор. Ученую степень имеют 7 человек: 5 кандидатов наук, 2 доктора наук. Большая часть сотрудников кафедры – ее выпускники. Кроме этого, на кафедре преподают сотрудники факультета информационных технологий и других кафедр физического факультета.

Первыми студентами, специализирующимися на кафедре, стали 11 человек из числа ранее распределившихся на кафедру радиофизики. В настоящий момент количество студентов, обучающихся на кафедре, составляет около 100 человек.

Мотивация выбора данного направления

В состав любого крупного предприятия входят научно-конструкторские, производственные отделения. В частности, в стенах ИЯФа выполняются самые разные, сложные и продолжительные эксперименты по физике элементарных частиц, физике плазмы, изучению и использованию синхротронного излучения; создаются новые технологии для медицины и промышленности.

Для проведения таких экспериментов необходима разработка нового оборудования на базе последних достижений науки и техники и программного обеспечения корректной работы отдельных компонентов и всего комплекса. Занимающиеся этими задачами специалисты не только обладают знаниями в области информационных технологий, но и имеют фундаментальную общенаучную подготовку, для того чтобы грамотно осуществлять планирование, подготовку и управление научными экспериментами, осуществлять сбор и обработку информации, разрабатывать и совершенствовать аппаратное и программное обеспечение.

С самого начала организации кафедры подготовка студентов была ориентирована не на узкое специальное образование, а прежде всего на развитие широкого кругозора в области информатики. Это связано со спецификой исследовательской деятельности. Для успешной работы в этой области надо хорошо знать историю развития компьютеров и микропроцессоров, несколько языков программирования, специфику конкретных исследований.

Студенты и выпускники кафедры активно работают со своими коллегами с других кафедр (ФЭЧ, радиофизики, ускорителей, плазмы) и институтов. Наиболее активные студенты дополнительно изучают интересующие их курсы на других кафедрах и факультетах НГУ.

Специализация

С первого курса начинается чтение специальных курсов кафедры, и их количество к третьему курсу возрастает. Начиная с третьего курса, студенты распределяются для прохождения практики и выполнения квалификационной работы бакалавра в научные подразделения ИЯФа или другого института / предприятия. Часть предметов имеется на 4-м курсе, но

большое внимание уделяется выполнению студентами конкретных научных и/или технических задач по тематике места прохождения практики. Результаты работы студенты оформляют в квалификационные работы бакалавров.

После окончания бакалавриата студенты могут продолжить обучение в магистратуре. Они продолжают получать базовую подготовку по физике, математике и гуманитарным дисциплинам. Также есть некоторое количество спецкурсов, целью которых является углубление знаний, полученных в бакалавриате, и расширение кругозора в области информационных технологий. Но основной упор в магистратуре делается на специализацию – на протяжении 2-х лет студенты под руководством квалифицированных специалистов работают над своей магистерской диссертацией, решая сложные технические задачи по аппаратному и программному обеспечению физических экспериментов.

Обучаясь на кафедре, студенты изучают все аспекты информатики, связанные с физическим экспериментом, а именно:

- разработка электронных блоков для управления ускорителями или системами сбора данных;
- программирование микропроцессоров для этих блоков;
- системное администрирование компьютерных центров, предназначенных для сбора данных и обработки;
- разработка программ моделирования и статистической обработки экспериментальных данных;
- архитектура компьютеров;
- организация больших баз данных.

Учебный процесс

Обучение на кафедре ФТИ отделения физической информатики ФФ НГУ разделено на две ступени – бакалавриат (03.03.02 «Физическая информатика») и магистратуру (03.04.02 «Информационные процессы и системы»). На первой ступени студенты учатся 4 года. За это время они получают не только базовую подготовку по физике, математике, циклу гуманитарных наук, но и изучают специальные дисциплины кафедры. Занятия по спецкурсам проходят в ИЯФ, который имеет несколько прекрасно оборудованных конференц-залов.

В конце третьего курса происходит распределение студентов для прохождения научной практики и выполнения дипломной работы бакалавра. Студенты могут самостоятельно выбирать место для практики не только внутри ИЯФа, но и в других научных институтах и на предприятиях. По окончании четвертого курса и защиты диплома выпускник может продолжить обучение в магистратуре в течение следующих двух лет и защитить магистерскую диссертацию. В дальнейшем есть возможность поступления в аспирантуру Сибирского отделения или НГУ. На кафедре реализуется направление аспирантуры 03.06.01 «Приборы и методы экспериментальной физики».

В распоряжении наших студентов имеется оборудованный на территории ИЯФ компьютерный класс на 12 рабочих мест, два сервера, выход в Интернет. При распределении на научную практику каждый студент обеспечивается рабочим местом и возможностью использования ресурсов лаборатории. На территории ИЯФ есть библиотека и читальный зал. У студентов кафедры есть возможность заниматься в спортивном и тренажерном залах ИЯФ. Кроме этого, у института есть футбольное поле и лыжная база.

Курсы кафедры

Программа подготовки студентов третьего курса бакалавриата включает в себя следующие дисциплины:

Компьютерные сети (5-й семестр). Основные понятия информационных сетей, семиуровневая модель OSI. стек протоколов NetBIOS, системные вызовы Linux для работы с со-

кетами. Протоколы семейства TCP/IP, система управления базами данных (СУБД) и ее типы. Реляционные, иерархические, сетевые СУБД;

Операционные системы (5-й семестр). Обзор истории развития и функций современных операционных систем. Загрузка программ. Управление памятью. Многозадачность. Синхронизация процессов. Работа с внешними устройствами. Файловые системы. Безопасность;

Использование Unix Shell (5-й семестр). Методы и средства системного программирования в среде Unix;

Электроника систем регистрации элементарных частиц (5-й семестр). Назначение и место аналоговой электроники в физическом эксперименте. Основные типы усилителей. Отрицательная обратная связь и ее влияние на основные характеристики усилителей. Интегрирующая ООС. Источники шумов в усилителях. Фильтрация шумов. Сравнение различных фильтров методом шумовых индексов. Оптимальная фильтрация;

ЭВМ в планировании и обработке физического эксперимента (6-й семестр). Программа курса включает основы моделирования и обработки экспериментов: стандартные методы генерации случайных величин с произвольным распределением вероятностей, оценка параметров модели и их статистических ошибок, критерии согласия экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями;

Цифровые интегральные схемы (6-й семестр). Базовые логические элементы ТТЛ и КМОП серий. Булевы функции. Совершенная конъюнктивная нормальная форма. Программируемая логическая матрица. Реализация комбинационных схем на базе ПЛИМ. Автомат Мили. Автомат Мура. Реализация автоматов на программируемой матрице. Статическое и динамическое ОЗУ. ПЗУ.

На четвертом курсе студенты получают знания в областях построения микропроцессорных систем и изучают средства и методы машинной графики:

Микропроцессоры и МП системы (7-й семестр). Микропроцессоры с разрядно-модульной организацией. RISC и CISC процессоры. Микроконтроллеры и программируемые контроллеры периферии. Средства разработки и отладки программного обеспечения МП. Стандартные средства построения МП систем. Сигнальные процессоры;

Машинная графика (7-й семестр). Графические устройства. Визуализация данных и обработка графической информации. Работа с графикой в современных редакторах и создание графических приложений в среде Visual C++.

Программа подготовки магистрантов направлена на углубление профессиональных знаний в информационных технологиях, областях аппаратного и программного обеспечения экспериментальных установок и включает в себя следующие дисциплины:

Новые информационные технологии (2-й семестр). Доклады студентов по новым информационным технологиям и коллективное их обсуждение;

Проблемы безопасности в информационных технологиях (2-й семестр). Слабые места в информационных системах. Виды атак в компьютерных сетях и защита от них;

Программируемые логические устройства (1-й семестр). Изучение САПР для программируемых логических матриц на примере пакета Altera MAX plus II;

Менеджмент программных продуктов (1-й семестр). Изучение основ технологии управления разработкой программных продуктов и проектов.

Достижения и перспективы

Кафедра готовит специалистов в области физики и информатики к работе на стыке различных научных направлений, умеющих работать с новейшим программным обеспечением, электронным оборудованием. Также наши студенты получают навыки публичного выступления и обучаются искусству написания научных трудов, активно участвуя в конференциях, конкурсах молодых ученых, написанию в качестве соавторов статей, докладов, препринтов.

Студенты участвуют в международных экспериментах, таких как Belle II (Япония) и эксперименты LHCb, CMS, ATLAS на Большом адронном коллайдере. Активная научная деятельность поощряется поездками на конференции и в международные школы, что позволяет выпускникам кафедры приобретать новые знания, уникальный опыт и расширять кругозор.

Студенты кафедры участвуют в проектировании электронного оборудования и создании программного обеспечения для проектируемых в России установок, таких как ускорительно-накопительный комплекс Супер чарм-тау фабрика, центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ), ускорительный комплекс NICA.

Знания и опыт, которые получают студенты, обучаясь на кафедре, позволяет им работать в любой сфере деятельности. Часть выпускников кафедры ФТИ продолжают обучение в аспирантуре, по окончании которой получают ученую степень. Некоторые выпускники уезжают на учебу или стажировку в другие российские и зарубежные университеты. Среди выпускников есть те, кто достигает профессионального успеха в компаниях, производящих программное обеспечение.

Информация об авторе

Анастасия Андреевна Глушак, ассистент

Information about the Author

Anastasiia A. Glushak, Assistant

*Статья поступила в редакцию 25.05.2021;
одобрена после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021
The article was submitted 25.05.2021;
approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021*

Учебно-методическая статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-155-160

Кафедра физики ускорителей физического факультета Новосибирского государственного университета

Валерий Иванович Тельнов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

telnov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8312-8119>

Аннотация

В статье рассказывается о кафедре физики ускорителей физического факультета Новосибирского государственного университета, базирующейся в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Ключевые слова

ускорители частиц

Для цитирования

Тельнов В. И. Кафедра физики ускорителей физического факультета Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 155–160. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-155-160

Accelerator Physics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University

Valery I. Telnov

Budker Institute of Nuclear Physics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

telnov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-8312-8119>

Abstract

The article tells about the Accelerator Physics Chair of the Physics Department of the Novosibirsk State University, based at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS.

Keywords

accelerator physics

For citation

Telnov V. I. Accelerator Physics Chair of the Physics Department at Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 155–160. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-155-160

© Тельнов В. И., 2022

1. История становления кафедры

История создания кафедры неразрывно связана с историей создания Института ядерной физики – базового Института кафедры. Основой Института стала лаборатория новых методов ускорения Института атомной энергии (ныне Российский научный центр, Курчатовский институт), возглавляемая Г. И. Будкером. В мае 1957 г. по инициативе академиков М. А. Лаврентьева, С. Л. Соболева и С. А. Христиановича Совет министров СССР принял Постановление о создании научного центра около Новосибирска. Эта идея получила широкий отклик научной общественности, многие известные ученые, желающие осуществить свои научные идеи, заявили о желании поехать работать в Сибирь. Так в 1958 г. был образован Институт ядерной физики под руководством Г. И. Будкера.

У Г. И. Будкера было много идей по физике ускорителей и физике плазмы, основной из которых являлась идея создания ускорителя со встречными пучками. Метод встречных пучков намного более эффективен для изучения строения материи, чем метод столкновения частиц с неподвижной мишенью. Предложение Будкера о создании такого коллайдера было признано рецензентами нереалистичным, но И. В. Курчатов оценил дерзновенность идеи и дал добро на разработку проекта. Развитие метода встречных пучков, а также разработка ускорителей для промышленных применений явились одними из главных направлений деятельности Института.

В 1964 г. состоялся запуск первой в мире установки со встречными электрон-электронными пучками ВЭП-1. В 1968 г. в ИЯФ заработала первая в мире установка со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2 с энергиями частиц по 700 МэВ в каждом из пучков. Столкновение частиц материи и антиматерии, их аннигиляция и рождение новых частиц материи стало событием мирового масштаба. Побывать в ИЯФ стремились не только ученые, но и президенты, космонавты и астронавты, артисты, писатели и поэты. Подобные коллайдеры стали создаваться во многих ведущих мировых лабораториях на все большую энергию, что позволило совершить колоссальный прорыв в изучении строения материи. В 1974 г. к ВЭПП-2 был добавлен накопитель ВЭПП-2М, что существенно повысило светимость установки. В 1972 г. заработал e^+e^- -коллайдер ВЭПП-3 на энергию $2E = 4$ ГэВ, а в 1980 г. начались эксперименты на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4 с энергией до $2E = 12$ ГэВ. На нем был проведен цикл экспериментов по изучению частиц, состоящих из «прелестных» b -кварков.

Если размер коллайдера ВЭП-1 был всего около 2 м, то периметр ВЭПП-4 составлял уже около 400 м. Основной проблемой повышения энергии частиц в кольцевых коллайдерах является синхротронное излучение. Потеря энергии частиц на излучение за оборот пропорциональна E^4/R . Для продвижения в область энергий выше 100 ГэВ в 1980-х гг. в ИЯФ был разработан первый проект e^+e^- линейного коллайдера и это направление было активно поддержано в мире. Однопролетный линейный e^+e^- (e^-e^-) коллайдер можно превратить в фотон-фотонный коллайдер с примерно такими же энергией и светимостью путем рассеяния лазерных фотонов на высокоэнергичных электронах. Эта идея, предложенная в 1981 г. В. И. Тельновым, получила широкую поддержку в мире, и ее реализация предусмотрена в проектах линейных коллайдеров.

В то же время в ИЯФ разрабатывался предложенный Г. И. Будкером метод электронного охлаждения, нашедший всё возрастающее применение в современных ускорителях пучков многозарядных ионов.

«Вредное» (для физики частиц) синхротронное излучение (СИ) оказалось чрезвычайно полезным для многих других областей науки. Длина волны этого излучения в десятки тысяч раз меньше длины волны видимого света, так что с его помощью можно прекрасно изучать атомное строение вещества. На ВЭПП-3, ВЭПП-4 были сделаны специальные каналы для выпуска этого излучения, организованы станции СИ, на которых проводят исследования физики, химии, биологии из институтов СО РАН и других научных центров страны. На этих станциях были выполнены многие пионерские работы в этом направлении, например эле-

ментный анализ лунных грунтов, доставленных на Землю советскими беспилотными станциями и американскими астронавтами. В 1990-х гг. ИЯФ построил специализированные источники СИ в Курчатовском институте и синхротрон в Зеленограде для микроэлектронной промышленности. Сейчас в мире созданы десятки специализированных источников синхротронного излучения, где работают тысячи исследователей. В 2021 г. началось строительство центра синхротронного излучения СКИФ в наукограде Кольцово рядом с Академгородком, где сильно востребованы выпускники НГУ многих специальностей (особенно ускорительщики).

Еще одно важное направление, возникшее в 1970–1980-х гг. в ИЯФ, – это лазеры на свободных электронах, генерирующие мощное когерентное излучение. В ИЯФ построены установки, работающие в оптическом и инфракрасном диапазонах, а предложенную нашими физиками идею рентгеновского лазера удалось реализовать в США и Германии.

Создание коллайдеров со встречными пучками и проведение экспериментов, а также развитие смежных ускорительных направлений является основным направлением деятельности ИЯФ. Кафедра физики ускорителей как самостоятельная структура была образована в 1989 г. До этого подготовка специалистов данного профиля велась на кафедре ядерной физики, преобразованной в 1985 г. в кафедру физики элементарных частиц. Ее руководителями в разное время были акад. Г. И. Будкер (с 1967 по 1977 г.), акад. А. Н. Скринский (с 1977 по 1985 г.) и акад. Л. М. Барков (с 1985 по 1999 г.). Организатором и первым зав. кафедрой физики ускорителей был акад. Н. С. Диканский (1989–2001, 2007–2016 гг.), с 2001 по 2007 г. ее возглавлял д-р физ.-мат. наук, проф. И. А. Кооп. С 2016 г. по настоящее время зав. кафедрой является д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Тельнов.

2. Мотивировка важности выбранного направления (раздела) физики

Трудно указать такой раздел современной физики, где ускорители не играли бы прямо или косвенно важной роли. Круг их применений очень широк: физика твердого тела, биология, медицина, дефектоскопия материалов, производство радиоизотопов, радиационная обработка материалов, стерилизация пищевых продуктов, радиационная диагностика, раковая терапия, введение радиационных дефектов в кристаллы (в частности в полупроводники), имитация радиационных эффектов в космосе и многое, многое другое. В России и мире имеется очень большой спрос на специалистов этого профиля.

Несмотря на возрастающее применение ускорителей для прикладных задач, магистральная линия развития ускорителей связана с физикой элементарных частиц, где они являются главным инструментом по добыче знаний. Они продолжают давнюю тенденцию, пронизывающую всю историю физики и связанных с ней наук, – проникновение в глубь материи, ко всё меньшим пространственным масштабам, ко всё более ранним временам жизни Вселенной. Те, кто хочет быть на переднем крае в познании природы, – вам сюда.

На ускорителях открыты все элементарные частицы (кварки, лептоны, бозоны – переносчики взаимодействия), как предсказанные на основании ранее полученных знаний, так и обнаруженные «неожиданно» (например, открытие J/ψ -частицы, состоящей из ранее не известных «очарованных» c -кварков, или t -лептон, который похож на электрон и мюон, но имеет большую массу, и многое другое). При их изучении обнаруживаются фундаментальные свойства материи, о которых невозможно узнать никаким другим способом. Открываются новые, не известные ранее закономерности, причем подчас нарушающие старые, привычные истины. Это стремление, шаг за шагом, к раскрытию тайн мироздания, удовлетворение любопытства (за государственный счет) является главным стимулом сообщества людей, работающих в области физики высоких энергий.

К настоящему времени открыты 6 кварков, 6 лептонов, бозоны (глюоны, W , Z , фотоны – переносчики сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия). В 2012 г. найдена уникальная частица, Хиггсовский бозон – квант поля, придающий массы всем элементарным

частицам. Эти данные, полученные с помощью ускорителей, позволили построить теорию, Стандартную модель, которая отлично описывает все известные взаимодействия и позволяет рассчитать любой процесс.

У студента может возникнуть вопрос, стоит ли идти в эту область исследований, если всё уже известно? Скажу следующее. Когда я оканчивал университет 50 лет назад, уже использовалась энергия атомного ядра, но было совершенно смутное представление о том, что такое сильное взаимодействие, как протон взаимодействует с нейтроном, из чего они состоят? С тех пор на наших глазах и при активном участии произошла настоящая революция, пелена спала, открылся мир в новых красках и деталях, многое стало понятно, и всё это благодаря тому, что использовали микроскоп (ускоритель) с более высоким пространственным разрешением. Однако возникло много новых вопросов.

- У элементарных частиц (кварков, лептонов, бозонов) имеются массы, но мы не понимаем, почему они именно такие, не можем объяснить даже отношение их масс. Также не имеют объяснения величины констант взаимодействия. Получается, что в Стандартной модели (СМ) имеется более трех десятков параметров, которые берутся из эксперимента. Это слишком много, наверняка между ними есть какая-то связь. По сути, СМ – это еще не теория, а временная модель.

- В природе есть частицы и античастицы, когда возникла Вселенная, их, вероятно, было поровну. По мере остывания Вселенной они аннигилировали в фотоны и нейтрино, но почему-то не все, остался избыток материи, из которой состоим мы и все окружающие предметы. Некоторое различие в свойствах частиц и античастиц было обнаружено и изучено на ускорителях в распадах К- и В-мезонов, но этого недостаточно для объяснения асимметрии во Вселенной.

- Но самое интересное то, что недавно удалось измерить среднюю плотность Вселенной, и оказалось, что все стабильные формы материи, которые мы знаем (протоны, электроны, ядра, фотоны, нейтрино) составляют только 5 %, остальное – непонятно что, пока их называют темной энергией и темной материей. Темная материя – это какие-то нерелятивистские частицы, суммарная масса которых в галактиках в пять раз превосходит всю видимую массу звезд и межзвездного газа. Все попытки зарегистрировать их пока безуспешны. Лучший способ разобраться в природе темной материи – это научиться рождать такие частицы (всё их семейство) на ускорителях. На Большом адронном коллайдере их следов не видно. Какой для этого нужен ускоритель, мы пока не знаем. Нужна какая-нибудь астрофизическая подсказка о массах и свойствах частицах. Есть шанс, что коллайдеры помогут решить загадку темной материи, но гарантии нет (если, например, это мини-черные дыры).

Как мы видим, успехи в познании тайн Вселенной в последние полвека связаны с достижениями в области создания коллайдеров, физики-ускорительщики идут в авангарде, всё зависит от их умения и изобретательности. Есть два основных пути развития физики высоких энергий: всё более высокие энергии и всё более высокие светимости. Все большие (и средние) проекты являются международными. ИЯФ принимает самое активное участие почти во всех основных ускорительных проектах в мире, разрабатывает, строит и затем участвует в экспериментах. Это p - p collider LHC (ЦЕРН), e^+e^- -фабрика Super-KEKB (Япония), ионный коллайдер NICA (Россия), ионный и антипротонный коллайдер FAIR (Германия), международный линейный e^+e^- -коллайдер ILC (Япония), линейный e^+e^- -коллайдер CLIC (ЦЕРН), кольцевой 100 км (e^+e^- , pp)-коллайдер FCC (ЦЕРН) и др. В ИЯФ сейчас идут эксперименты на коллайдерах ВЭПП-2000 и ВЭПП-4, планируется строительство новых коллайдеров на территории ИЯФ и в создаваемом центре физики под г. Саров.

Выше были перечислены только ускорители для физики частиц. Но потребности в ускорителях различных типов сейчас много шире, их нужно в десятки, сотни раз больше, чем для физики высоких энергий. ИЯФ ведет строительство синхротронного центра СКИФ, делает ускорители для просвечивания толстых объектов гамма-квантами и различными ионами

(проверка надежности электроники), выпускает и совершенствует ускорители электронов для промышленных целей, ведутся работы по лазерам на свободных электронах.

Как мы видим, физика ускорителей – это очень широкое поле деятельности. Нужны и теоретики, и экспериментаторы, и программисты, и организаторы. Здесь каждый может найти работу, соответствующую складу характера.

3. Специализация

Программа спецкурсов включает:

- Теория циклических ускорителей; лекции: доц. Е. А. Переведенцев, семинары: канд. физ.-мат. наук, ст. преп. Д. Б. Шварц;
- Магнитные системы ускорителей; д-р физ.-мат. наук, проф. И. А. Кооп;
- Электронная оптика и физика пучков; лекции и семинары: д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, проф. Н. А. Винокуров;
- Электрофизическая прочность электрофизических установок; канд. техн. наук, ст. преп. А. В. Акимов;
- Вакуумные системы ускорителей; канд. физ.-мат. наук, ст. преп. А. А. Краснов;
- Диагностика пучков и обратные связи; канд. физ.-мат. наук, ст. преп. А. А. Старостенко;
- Холодные пучки частиц; акад. РАН, проф. В. В. Пархомчук, канд. физ.-мат. наук, ст. преп. В. Б. Рева;
- Источники пучков заряженных частиц; ст. преп. Т. А. Девятайкина;
- Линейные ускорители, ст. преп. А. В. Андрианов;
- Физика атомного ядра и элементарных частиц; лекции: д-р физ.-мат. наук, проф. Б. А. Шварц; семинары: канд. физ.-мат. наук, ст. преп. А. Н. Винокурова;
- Нелинейная динамика пучков; ст. преп. В. А. Востриков;
- Поляризованные пучки; д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, проф. Ю. М. Шатунов;
- Синхротронное излучение; канд. физ.-мат. наук, доц. К. В. Золотарев;
- Лазеры на свободных электронах; д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, проф. Н. А. Винокуров;
- Основы ускорительной техники (для всех кафедр); канд. физ.-мат. наук, доцент А. Е. Левичев;
- Теория линейных электронных цепей; ст. преп. Д. П. Суханов;
- Электродинамика СВЧ, лекции: ст. преп. В. В. Тарнецкий, практикум: И. А. Запрягаев, К. Н. Чернов.

Секретари кафедры: ст. преп. Татьяна Александровна Девятайкина и аспирант Владислав Михайлович Борин.

На кафедре работают 6 профессоров, 3 доцента и 11 старших преподавателей и ассистентов. Однако реально подготовкой и научным руководством работами студентов, магистрантов и аспирантов занимаются все члены ускорительного сообщества Института, среди которых около 25 докторов наук, из них 5 академиков и 2 члена-корреспондента РАН.

За время существования кафедры на ней защитили дипломные работы более 200 студентов, из них около 60 защитили кандидатские, 15 – докторские диссертации по физике. Многие выпускники работают в зарубежных лабораториях и занимают там ведущие позиции.

В зарубежных странах (США, Европа) будущие ученые-ускорительщики заканчивают престижный вуз, как правило, по специальности *her* (high energy physics), а затем несколько лет посещают множество платных курсов, организуемых ускорительными сообществами России, Европы, Америки, Японии. В НГУ же преподавание ускорительных дисциплин и посещение ИЯФ начинается с третьего курса. В конце первого семестра 3 курса студенты выбирают научные лаборатории, где проходят учебную практику. К концу четвертого курса студенты уже знакомы с основами ускорительной физики и способны самостоятельно (под

руководством опытных научных сотрудников) выполнить квалификационную работу на степень бакалавра. Более углубленное специальное образование наши студенты получают в магистратуре, заканчивая обучение написанием магистерской диссертации. Далее желающие поступают в аспирантуру при ИЯФ или НГУ.

Наши выпускники работают на уникальных установках Европы, Америки и Японии; городов Новосибирска, Дубны, Серпухова, подтверждая высокий уровень подготовки на кафедре. Следует сказать, что в связи с возрастающим использованием ускорительных технологий имеется очень большая нехватка кадров в мире, в России и здесь, в Новосибирске. Институт ядерной физики является одним из признанных лидеров данного направления, подарил миру много идей, ускорительных технологий, внес большой вклад в сооружение ускорителей за рубежом и в России. Дальнейшее развитие этого направления, осуществление планов и идей, зависит от вас, молодого талантливого пополнения, мы ждем вас на кафедре физики ускорителей НГУ на базе ИЯФ.



Информация об авторе

Валерий Иванович Тельнов, доктор физико-математических наук, профессор

Information about the Author

Valery I. Telnov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

Статья поступила в редакцию 25.05.2021;

одобрана после рецензирования 01.09.2021; принята к публикации 01.09.2021

The article was submitted 25.05.2021;

approved after reviewing 01.09.2021; accepted for publication 01.09.2021

Краткое сообщение

УДК 539.12.01

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

О четырехкварковой природе легких скалярных мезонов

Николай Николаевич Ачасов *

Институт математики им. С. Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

achasov@math.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9115-5080>

Аннотация

Рассказывается о вкладе новосибирских физиков в открытие четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $f_0(980)$ и $a_0(980)$.

Ключевые слова

четырёхкварковые состояния, лёгкие скалярные мезоны, результаты экспериментов

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ СО РАН, проект № 0314-2019-0021.

Автор благодарен А. В. Киселёву и Г. Н. Шестакову за помощь в оформлении статьи

Для цитирования

Ачасов Н. Н. О четырехкварковой природе легких скалярных мезонов // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 161–165. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

Four-Quark Nature of Light Scalar Mesons

Nikolay N. Achasov

Sobolev Institute of Mathematics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

achasov@math.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9115-5080>

Abstract

The contribution of Novosibirsk physicists to the discovery of the four-quark nature of light scalar mesons $f_0(980)$ and $a_0(980)$ is described.

Keywords

four-quark states, light scalar mesons, experimental results

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project no. 0314-2019-0021.

The author is grateful to A. V. Kiselev and G. N. Shestakov for help in preparing the article

For citation

Achasov N. N. Four-Quark Nature of Light Scalar Mesons. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 161–165. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

В конце 1950-х – 1970-х гг. в физике сложилось понимание того, что мезоны, которые участвуют в сильных взаимодействиях, представляют собой кварк-антикварковые пары. Физические измерения требовали кроме того, чтобы у кварков были дополнительные степени свободы, которые получили название «цвет». Вместе с тем физические измерения требовали

* achasov@math.nsc.ru

также, чтобы эти степени свободы не наблюдались. Так возникла гипотеза удержания цвета – конфайнмента (confinement) и появилась модель MIT-мешка [1]. В ней возникли четырехкварковые легкие скалярные мезоны с массой около 1 ГэВ и четырехкварковые тензорные мезоны с изотопическим спином 2 (тензорные-изотензорные мезоны) с массой около 1,5 ГэВ. Первые физические эффекты для четырехкварковых мезонов были получены в работах [2–5].

В работах [4; 5] были получены яркие предсказания:

1) подавленность ширины распадов $\Gamma(f_0(980) \rightarrow \gamma\gamma) \approx \Gamma(a_0(980) \rightarrow \gamma\gamma) \approx 0,27$ кэВ.

2) яркое проявление широкого резонанса при 1,5 ГэВ в реакции $\gamma\gamma \rightarrow \rho^0 \rho^0$ и отсутствие его в реакции $\gamma\gamma \rightarrow \rho^+ \rho^-$.

Эксперимент подтвердил эти предсказания. Детальное обсуждение этих предсказаний можно найти в обзоре Н. Н. Ачасова и Г. Н. Шестакова [6].

Остановимся теперь на результатах сугубо новосибирских. В Институте математики им. С. Л. Соболева СО РАН были разработаны теоретические основы изучения природы легких скалярных мезонов в радиационных распадах ϕ -мезона [7]. Эксперименты, проведенные в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, а затем на ϕ -фабрике во Фраскати (Италия), привели к открытию этих распадов, подтверждению предсказанного для них механизма и получению веских доводов в пользу четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $f_0(980)$ и $a_0(980)$ [8–14].

В работе [7] была предложена модель каонной петли для распадов

$$\begin{aligned} \phi(1020) \rightarrow K^+ K^- \rightarrow \gamma a_0^0(980) \rightarrow \gamma \eta \pi^0 \\ \text{и} \\ \phi(1020) \rightarrow K^+ K^- \rightarrow \gamma f_0(980) \rightarrow \gamma \pi \pi. \end{aligned} \quad (1)$$

В работе [15] было показано, что эта модель описывает четырехкварковые переходы и накладывает сильные ограничения на разложение амплитуд распадов (1) по большому числу цветов N_C [16]. Анализ этих ограничений дал новые свидетельства в пользу четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $a_0(980)$ и $f_0(980)$.

В работах [17–19] было показано, что описание распадов (1) требует виртуальные импульсы $K^+(K^-)$ больше, чем 2 ГэВ. В случае рыхлых $K\bar{K}$ -молекул с энергией связи около 20 МэВ виртуальные импульсы $K^+(K^-)$ были бы около 100 МэВ. Кроме того, следует отметить, что рождение легких скалярных мезонов в пион-нуклонном рассеянии при больших переданных импульсах тоже указывает на их компактность [20].

На рис. 1 и 2 показано сравнение данных KLOE (Фраскати) с расчетами Н. Н. Ачасова и А. В. Киселева [21; 22].

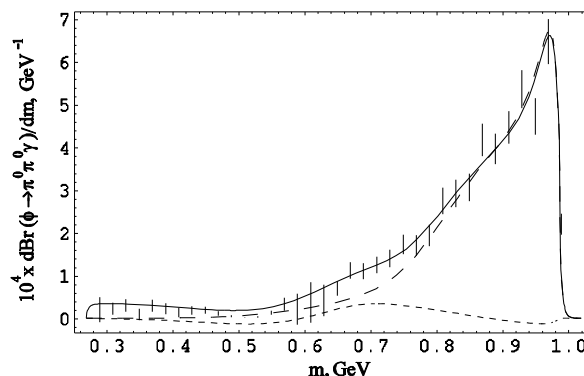


Рис. 1. Данные KLOE [13]. Наша подгонка [21]

Fig. 1. The KLOE data [13]. Our fit [21]

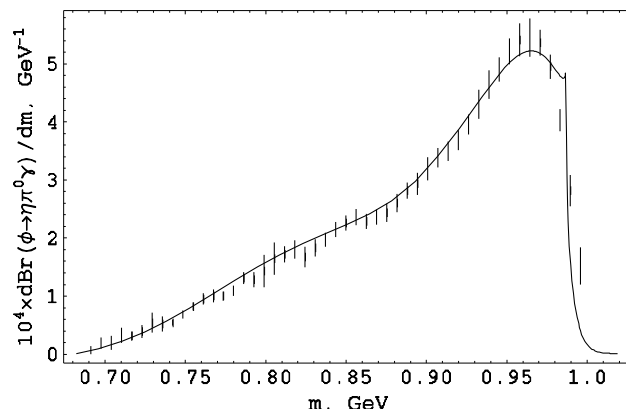


Рис. 2. Данные KLOE [14]. Наша подгонка [22]

Fig. 2. The KLOE data [14]. Our fit [22]

Исследование экзотических (многокварковых) сильно взаимодействующих состояний (адронов) – это изучение путей реализации квантовой хромодинамики на малых и промежуточных расстояниях, т. е. удержания цвета – конфайнмента. Именно поэтому изучение экзотических адронов стало в настоящее время главным направлением в физике элементарных частиц и квантовой теории поля.

Много полезных подробностей можно найти в наших обзорах [6; 23–26].

Список литературы

1. **Jaffe R. L.** Multiquark hadrons. I. Phenomenology of Q^2Q^{-2} mesons. *Phys. Rev. D*, 1977, no. 15, p. 267. DOI 10.1103/PhysRevD.15.267
2. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** $S^* - \delta^0$ mixing as a threshold phenomenon. *Phys. Lett.*, 1979, vol. 88B, pp. 367–371.
3. **Ачасов Н. Н., Девянин С. А., Шестаков Г. Н.** Природа скалярных резонансов // ЯФ 1980. Т. 32. С. 1098–1110.
4. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Phys. Lett.*, 1982, vol. 108B, pp. 134–139.
5. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Z. Phys. C*, 1982, vol. 16, pp. 55–64.
6. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Итоги поисков четырехкварковых состояний в $\gamma\gamma$ -столкновениях // УФН. 1991. № 161 (6). С. 53–108.
7. **Achasov N. N., Ivanchenko V. N.** On a search for four-quark states in radiative decays of ϕ mesons. *Nucl. Phys.*, 1989, vol. B315, pp. 465–476.
8. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) Evidence of the $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 438, pp. 441–445.
9. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) First observation of $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 440, pp. 442–448.
10. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 479, pp. 53–58.
11. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 485, pp. 349–356.
12. **Akhmetshin R. R. et al.** (CMD-2 Collab.) Study of the ϕ decays into $\pi^0\pi^0\gamma$ and $\eta\pi^0\gamma$ final states. *Phys. Lett. B*, 1999, vol. 462, pp. 380–388.
13. **Aloisio A. et al.** (KLOE Collab.) Study of the decay $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2002, vol. 537, pp. 21–27.

14. **Ambrosino F. et al.** (KLOE Collab.) Study of the $a_0(980)$ meson via the radiative decay $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2009, vol. 681, pp. 5–13.
15. **Achasov N. N.** Radiative decays of ϕ -meson about nature of light scalar resonances. *Nucl. Phys. A*, 2003, vol. 728, pp. 425–438.
16. **'t Hooft G.** A planar diagram theory for strong interactions. *Nucl. Phys.* 1974, vol. B72, pp. 461–473.
17. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Once more about the $K\bar{K}$ molecule approach to the light scalars. *Phys. Rev. D*, 2007, vol. 76, p. 077501.
18. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Reply to “Comment on ‘Once more about the molecule approach to the light scalars’”. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, p. 058502.
19. **Achasov N. N., Gubin V. V., Shevchenko V. I.** Production of $K\bar{K}$ scalar molecules in ϕ radiative decays. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 56, pp. 203–211.
20. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** New explanation of the GAMS results on the $f_0(980)$ production in the reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$. *Phys. Rev. D*, 1998, vol. 58, p. 054011.
21. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Analytical $\pi\pi$ scattering amplitude and the light scalars-II. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, p. 094016.
22. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** $a_0(980)$ physics in semileptonic D^0 and D^+ decays. *Phys. Rev. D*, 2018, vol. 98, p. 096009.
23. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Сильное нарушение изотопической симметрии при рождении лёгких скалярных мезонов // УФН. 2019. № 189. С. 3–32.
24. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Лёгкие скалярные мезоны в фотон-фотонных столкновениях // УФН. 2011. № 181. С. 827–857.
25. **Ачасов Н. Н.** О природе скалярных $a_0(980)$ - и $f_0(980)$ -мезонов // УФН. 1998. № 168. С. 1257–1261.
26. **Ачасов Н. Н., Девянин С. А., Шестаков Г. Н.** Проблема скалярных мезонов // УФН. 1984. № 142. С. 361–393.

References

1. **Jaffe R. L.** Multiquark hadrons. I. Phenomenology of Q^2Q^{-2} mesons. *Phys. Rev. D*, 1977, no. 15, p. 267. DOI 10.1103/PhysRevD.15.267
2. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** $S^* - \delta^0$ mixing as a threshold phenomenon. *Phys. Lett.*, 1979, vol. 88B, pp. 367–371.
3. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** Nature of scalar resonances. *Sov. J. Nucl. Phys.*, 1980, vol. 32, pp. 566–573.
4. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Phys. Lett.*, 1982, vol. 108B, pp. 134–139.
5. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Z. Phys. C*, 1982, vol. 16, pp. 55–64.
6. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Summary of the search for four-quark states in $\gamma\gamma$ collisions. *Sov. Phys. Usp.*, 1991, vol. 34 (6), pp. 471–496.
7. **Achasov N. N., Ivanchenko V. N.** On a search for four-quark states in radiative decays of ϕ mesons. *Nucl. Phys.*, 1989, vol. B315, pp. 465–476.
8. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) Evidence of the $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 438, pp. 441–445.
9. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) First observation of $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 440, pp. 442–448.
10. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 479, pp. 53–58.
11. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 485, pp. 349–356.
12. **Akhmetshin R. R. et al.** (CMD-2 Collab.) Study of the ϕ decays into $\pi^0\pi^0\gamma$ and $\eta\pi^0\gamma$ final states. *Phys. Lett. B*, 1999, vol. 462, pp. 380–388.

13. **Aloisio A. et al.** (KLOE Collab.) Study of the decay $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2002, vol. 537, pp. 21–27.
14. **Ambrosino F. et al.** (KLOE Collab.) Study of the $a_0(980)$ meson via the radiative decay $\phi \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2009, vol. 681, pp. 5–13.
15. **Achasov N. N.** Radiative decays of ϕ -meson about nature of light scalar resonances. *Nucl. Phys. A*, 2003, vol. 728, pp. 425–438.
16. **'t Hooft G.** A planar diagram theory for strong interactions. *Nucl. Phys.* 1974, vol. B72, pp. 461–473.
17. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Once more about the $K\bar{K}$ molecule approach to the light scalars. *Phys. Rev. D*, 2007, vol. 76, p. 077501.
18. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Reply to “Comment on ‘Once more about the molecule approach to the light scalars’”. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, p. 058502.
19. **Achasov N. N., Gubin V. V., Shevchenko V. I.** Production of $K\bar{K}$ scalar molecules in ϕ radiative decays. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 56, pp. 203–211.
20. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** New explanation of the GAMS results on the $f_0(980)$ production in the reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$. *Phys. Rev. D*, 1998, vol. 58, p. 054011.
21. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Analytical $\pi\pi$ scattering amplitude and the light scalars-II. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, p. 094016.
22. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** $a_0(980)$ physics in semileptonic D^0 and D^+ decays. *Phys. Rev. D*, 2018, vol. 98, p. 096009.
23. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Strong isospin symmetry breaking in light scalar meson production. *Phys. Usp.*, 2019, vol. 62, pp. 3–31.
24. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Light scalar mesons in photon-photon collisions. *Phys. Usp.*, 2011, vol. 54, pp. 799–828.
25. **Achasov N. N.** On the nature of the $a_0(980)$ and $f_0(980)$ scalar mesons. *Phys. Usp.*, 1998, vol. 41, pp. 1149–1153.
26. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** The problem of scalar mesons. *Sov. Phys. Usp.*, 1984, vol. 27, pp. 161–180.

Информация об авторе

Николай Николаевич Ачасов, доктор физико-математических наук, профессор
WoS Researcher ID AAG-5621-2019
Scopus Author ID 7006572313

Information about the Author

Nikolay N. Achasov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor
WoS Researcher ID AAG-5621-2019
Scopus Author ID 7006572313

Статья поступила в редакцию 20.01.2022;
одобрена после рецензирования 01.03.2022; принята к публикации 01.03.2022
The article was submitted 20.01.2022;
approved after reviewing 01.03.2022; accepted for publication 01.03.2022

Исправление к статье

Кожевников А. А. Электронный спектр графена //
Вестник НГУ. Серия: Физика. 2011. Т. 6, № 3, с. 71

Сделанное в тексте статьи утверждение о вдвое меньшей кратности вырождения уровня Ландау с равной нулю энергией и основанное на этом обсуждение аномального квантового эффекта Холла ошибочны. Этот уровень имеет такую же кратность вырождения, как и уровни с $E \neq 0$. Связанное с этим обстоятельством корректное объяснение аномального квантового целочисленного эффекта Холла в графене приведено в ссылке [2] указанной публикации.

Информация для авторов

«Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – *.doc, или *.docx, или *.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);
- в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);

- в состав электронной версии рукописи должны входить:
 - ✓ файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;
 - ✓ отдельные файлы с рисунками высокого качества;
 - ✓ файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);
 - ✓ файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, ФИО авторов (полностью), название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08

Оценка конвективного массопереноса

Иван Иванович Иванов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия
ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация

Ключевые слова

Благодарности

Evaluation of Convective Mass Transfer

Ivan I. Ivanov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation
ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract

Keywords

Acknowledgements

Основной текст статьи

Список литературы / References (в порядке цитирования)

Сведения об авторе / Information about the Author

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор

Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor

WoS Researcher ID

Scopus Author ID

SPIN

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (см): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Сут), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;
- распределять текст по двум или более столбцам;
- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

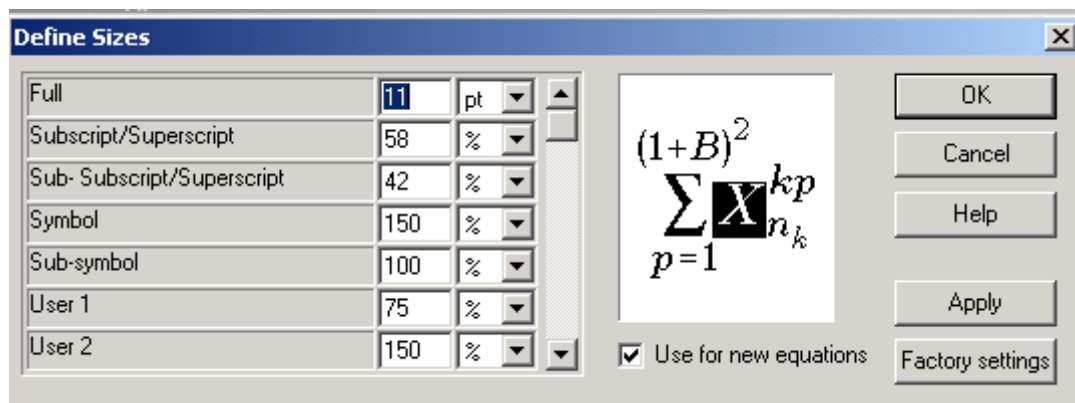
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

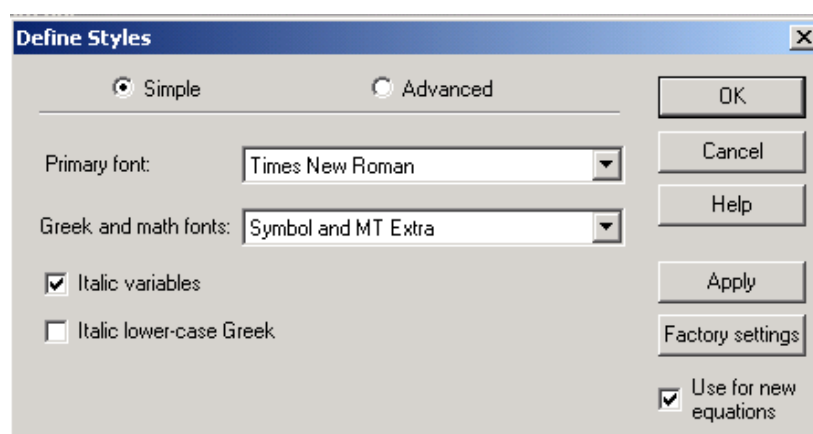
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегль 11 пт.**

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



а



б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением

всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается.

15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат А4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25
physics@vestnik.nsu.ru