ISSN 0021-3411

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

# **MARKED FOR CONTRACTOR**

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ФИЗИКА ПЛАЗМЫ



ИЗДАНИЕ ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

# известия вузов ФИЗИКА

# IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Январь, 2024

№ 1 (794)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

> Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

(12+

Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов, включенных в список ВАК, для публикации основных результатов кандидатских и докторских диссертаций

### Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия Багров В.Г., проф. (зам. гл. редактора), Томск, Россия Козырев А.В., проф. (зам. гл. редактора), Томск, Россия Пермякова Л.В. (отв. секретарь), Томск, Россия Алексеенко С.В., акад. РАН, Новосибирск, Россия Асеев А.Л., акад. РАН, Новосибирск, Россия Борисов А.В., проф., Москва, Россия Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН, Москва, Россия Ворожцов А.Б., проф., Томск, Россия Войцеховский А.В., проф., Томск, Россия Гитман Д.М., проф., São Paulo, Бразилия Демин В.А., проф., Пермь, Россия Джафаров Р.Г., д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан Дитенберг И.А., д.ф.-м.н., Томск, Россия Ивонин И.В., д.ф.-м.н., Томск, Россия Казинский П.О., д.ф.-м.н., Томск, Россия Кистенев Ю.В., проф., Томск, Россия Ковалевская Т.А., проф., Томск, Россия Колобов Ю.Р., проф., Белгород, Россия Коротаев А.Д., проф., Томск, Россия Майер Г.В., проф., Томск, Россия Манка Оронцо, проф., Неаполь, Италия Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия Суржиков А.П., проф., Томск, Россия Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия Тао Вен-Куан, академик Китайской академии наук, Сиань, Китай Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

### **EDITORIAL BOARD**

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief). Professor. Tomsk. Russia Bagrov V.G. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia Varaksin A.Y., Corr. Member RAS, Moscow, Russia Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil Demin V.A., Professor, Perm, Russia Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia Kazinski P.O., Professor, Tomsk, Russia Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia Manca Oronzio, Professor, Naples, Italia Mesyats G.A., Academician RAS, Moscow, Russia Neklyudov I.M., Academician UAS, Kharkov, Ukraine Oztop Hakan, Professor, Elazığ, Turkey Ratakhin N.A., Academician RAS, Tomsk, Russia Saghir Ziad, Professor, Toronto, Canada Saranin A.A., Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia Surzhikov A.P., Professor, Tomsk, Russia Sukhanov D.Y., Professor, Tomsk, Russia Tao Wen-Quan, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China Uglov V.V., Professor, Minsk, Republic of Belarus Ushakov V.Ya., Professor, Tomsk, Russia Tchaikovskaya O.N., Professor, Tomsk, Russia Cherepanov V.N., Professor, Tomsk, Russia Chumlyakov Y.I., Professor, Tomsk, Russia Shapovalov A.V., Professor, Tomsk, Russia Shipilov S.E., Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: *https://elibrary.ru/contents.asp?titleid* = 7725. Публикация статей в журнале – бесплатная.

### КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36 Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02 Сайт: http://journals.tsu.ru/physics/ E-mail: physics@mail.tsu.ru Содержание

### СОДЕРЖАНИЕ

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Панченко Е.Ю., Тохметова А.Б., Курлевская И.Д., Суриков Н.Ю., Чумляков Ю.И. Влияние микролегиро- вания бором на мартенситные превращения и эластокалорический эффект в сплаве Ni <sub>54</sub> Fe <sub>19</sub> Ga <sub>27</sub>	5
<b>Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Соловьёва Ю.В., Старенченко В.А.</b> Особенности формирования ультрамелко- зернистой структуры в технически чистом никеле под влиянием равноканального углового прессования	15
Майер Г.В. Шаровая молния. Модель «мыльного пузыря»	25
Буслович Д.Г., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Хе Ч., Панин С.В. Влияние материала матрицы и схемы трибоконтакта на антифрикционность композитов ПИ и ПЭИ с политетрафторэтиленом	30
Смолин А.Ю., Еремина Г.М. Моделирование влияния шероховатости контактных поверхностей на риск асептического расшатывания при эндопротезировании	40
Чепак-Гизбрехт М.В., Князева А.Г. Оценка глубины окисления TiAl вследствие зернограничной диффузии кислорода	47
Кашкаров Е.Б., Мурашкина Т.Л., Кроткевич Д.Г., Копцев М., Лидер А.М. Микроструктура и фазовый состав многокомпонентных сплавов Nb–Ni–Ti–Zr–Co	55

### ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Кудинов В.А., Трубицын К.В., Гаврилова Т.Е., Колотилкина К.В., Котова Е.В., Ткачев В.К. Формирование	
нестационарного профиля скорости в плоском канале	63
Гладков С.О. К вопросу о силе сопротивления раскаленного шара	73

### ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Басырова Д.В	., Горбатов	С.А., Харл	амов В.А.	, Цыгвинцев	П.Н.,	Петрухина	Д.И.,	Меджидо	в И.М.,	
Глущенко 1	І.В., Тихоно	в В.Н., Ива	нов И.А.	Оценка окисл	ительно	го эффекта	нетерм	альной а	ргоновой	
плазмы на п	оверхность ф	ерросульфатн	ого дозиме	тра						82
Радченко В.И.	Методика опр	еделения рад	иационных	потерь в прозр	ачной п.	лазме с приз	вольной	і конфигу	рацией	89

### ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Бреев А.И., Васильев К.В., Шаповалов А.В. Расширение симметрий и обобщенные инвариантно-групповые	
решения уравнения теплопроводности и уравнения Бюргерса	99
кречет В.І., Ошурко В.Б., Киссер А.Э. О своиствах стационарных распределении самогравитирующего	
массивного и нелинейного спинорных полей	.109

### ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Егоров Е.В., Егоров В.К., Кореневский Е.Л. Недеструктивный количественный элементный анализ поверхности	
материалов	120
Корепанов В.И., Гэ Гуанхуэй. Кинетика люминесценции кислородных центров в LiF-TiO <sub>2</sub>	126

### **CONTENTS**

### CONDENSED-STATE PHYSICS

Panchenko E.Yu., Tokhmetova A.B., Kurlevskaya I.D., Surikov N.Yu., Chumlyakov Yu.I. Effect of boron microalloying on the martensitic transformations and elastocaloric effect in Ni <sub>54</sub> Fe <sub>19</sub> Ga <sub>27</sub> shape memory alloy	5
Popova N.A., Nikonenko E.L., Solov'eva Yu.V., Starenchenko V.A. Features of formation of ultrafine-grained structure in commercially pure nickel under the equal-channel angular pressing	.15
Mayer G.V. Ball lightning. «Soap bubble» model	. 25
Buslovich D.G., Alexenko V.O., Kornienko L.A., He Ch., Panin S.V. The effect of matrix material and tribological contact scheme on the antifriction ability of PI and PEI composites with polytetrafluoroethylene	. 30
Smolin A.Yu., Eremina G.M. Simulation of the effect of roughness of contact surfaces on the risk of aseptic loosening of the endoprosthesis	.40
Chepak-Gizbrekht M.V., Knyazeva A.G. Evaluation of TiAl oxidation depth due to the grain boundary diffusion of oxygen	.47
Kashkarov E.B., Murashkina T.L., Krotkevich D.G., Koptsev M., Lider A.M. Microstructure and phase composition of multicomponent Nb–Ni–Ti–Zr–Co alloys	. 55

### THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Kudinov V.A., Trubitsyn K.V., Gavrilova T.E., Kolotilkina K.V., Kotova E.V., Tkachev V.K. Formation of unsteady	
velocity profile in a flat channel	63
Gladkov S.O. On the question of the resistance force of the hot ball	73

### PLASMA PHYSICS

Basyrova	D.V.,	Gorbatov	S.A.,	Kharlamov	V.A.,	Tsygvintsev	P.N.,	Petrukhina	D.I.,	Medzhidov	I.M.,
Glusho	henko	N.V., Tikho	nov V.	N., Ivanov I.	A. Asse	ssment of the	oxidativ	e effect of no	n-thern	hal argon plas	sma on
the sur	face of a	a ferrosulfate	dosim	eter							
Radchenk	o V.I. N	lethod for de	termin	ing radiation l	osses in	the transparent	t plasma	a with an arbit	rary co	nfiguration	
		1		ENTADV DA	DTICI	F DUVSICS	ND FI	τι η τμερι	v		

### ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Breev A.I., Vasiliev K.V., Shapovalov A.V. Extension of symmetries and generalized group invariant solutions to the heat	
equation and the Burgers equation	99
Krechet V.G., Oshurko V.B., Kisser A.E. On the properties of stationary distributions of self-gravitating massive and	
nonlinear spinor fields	109

### OPTICS AND SPECTROSCOPY

Egorov E.V., Egorov V.K., Korenevski E.L. Non-destructive quantitative elemental analysis of the surface of materials	120
Korepanov V.I., Ge Guanghui. Luminescence kinetics of oxygen centers in LiF-TiO <sub>2</sub>	126

### ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 669.24'1'871'-539.371

DOI: 10.17223/00213411/67/1/1

### Влияние микролегирования бором на мартенситные превращения и эластокалорический эффект в сплаве Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>\*

Е.Ю. Панченко<sup>1</sup>, А.Б. Тохметова<sup>1</sup>, И.Д. Курлевская<sup>1</sup>, Н.Ю. Суриков<sup>1</sup>, Ю.И. Чумляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Микролегирование бором (0.3 ат.%) поликристаллов сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub> (ат.%) приводит к уменьшению среднего размера зерна в 2.5 раза, выделению дисперсных частиц и подавлению зернограничного растрескивания при развитии термоупругих мартенситных превращений под нагрузкой. В течение 100 циклов нагрузка/разгрузка сплав (Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>)<sub>99.7</sub>B<sub>0.3</sub> демонстрирует высокую циклическую стабильность эластокалорического эффекта с величиной до 5.1 К, в отличие от образцов сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>, которые растрескиваются по границам зерен после 12 циклов.

**Ключевые слова:** сплав NiFeGa с памятью формы, микролегирование, мартенситное превращение, сверхэластичность, эластокалорический эффект.

### Введение

В последние десятилетия особое внимание уделяется разработке многофункциональных материалов с памятью формы для использования в качестве датчиков, манипуляторов, сенсоров и твердотельных холодильников. Экологичные твердотельные охлаждающие системы, тепловые насосы различного масштаба имеют огромный потенциал для широкого практического применения в бытовых и промышленных холодильниках, в охлаждающих системах для транспортных средств, в кондиционерах для жилых и производственных помещений. Кроме того, современные технологии в области микроэлектроники выдвигают требования о минимизации охлаждающих элементов и обеспечении отвода больших потоков тепла для термостабилизации элементов микросхем, что не могут обеспечить классические методы охлаждения.

Принцип действия твердотельных охлаждающих устройств основан на калорических эффектах, связанных с обратимым изменением температуры твердого тела под действием внешних полей (электрического E, магнитного H, механических напряжений  $\sigma$  или гидростатического давления P) в адиабатических условиях. Основным элементом такого устройства является функциональный материал, способный к охлаждению/нагреву при внешнем воздействии. Поэтому для разработки твердотельных систем охлаждения во многом требуются материалы, которые обладали бы значительной охлаждающей способностью, высокой надежностью, стабильностью, долговечностью и в то же время удовлетворяли бы экономическим требованиям (доступность и низкая стоимость).

Большой потенциал для разработки эффективных твердотельных холодильников имеют сплавы с эластокалорическим эффектом (ЭКЭ), который заключается в снижении температуры материала при развитии обратного термоупругого мартенситного превращения (МП) в циклах нагрузка/разгрузка в адиабатических условиях в температурном интервале сверхэластичности (СЭ).

Например, монокристаллы сплавов NiFeGa(Co) с памятью формы демонстрируют циклически стабильный ЭКЭ в широком температурном интервале в однофазном и гетерофазном состояниях [1–4]. Показано, что вдоль [001]-направления состаренные при 773 К в течение 1 ч монокристаллы сплава Ni<sub>54</sub>Fe<sub>19</sub>Ga<sub>27</sub>, содержащие частицы  $\gamma$ -фазы размером 170–500 нм, проявляют стабильную величину адиабатического охлаждения  $\Delta T_{ad}$  до 10.0 К в рабочем температурном интервале 270 К (от 278 до 548 К) [4]. Однако важной проблемой практического использования сплавов является трудоемкое и затратное получение монокристаллических образцов. Поликристаллы испытывают зернограничное растрескивание при многократных рабочих циклах, что влияет на циклическую стабильность ЭКЭ и приводит к разрушению материала [5]. Известно несколько методов, способ-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00150, https://rscf.ru/project/23-19-00150/.

УДК 620.18:620.16

DOI: 10.17223/00213411/67/1/2

### Особенности формирования ультрамелкозернистой структуры в технически чистом никеле под влиянием равноканального углового прессования<sup>\*</sup>

Н.А. Попова<sup>1</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>1</sup>, Ю.В. Соловьёва<sup>1</sup>, В.А. Старенченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследованы особенности формирования ультрамелкозернистой структуры в технически чистом никеле после равноканального углового прессования. Установлено, что сформированная ультрамелкозернистая структура представлена преимущественно анизотропными зернами с ячеистой или фрагментарной субструктурой. Показано, что на границах зерен и стыках присутствуют частицы вторичных фаз: Ni<sub>4</sub>N, Ni<sub>3</sub>C, NiO и Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Установлены источники внутренних напряжений: 1) стыки зерен; 2) границы зерен; 3) частицы Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, расположенные в объеме зерен на дислокациях; 4) дислокационная структура в зернах или частях зерен, где частицы вторичных фаз отсутствуют. Было показано, что внутренние поля напряжений являются преимущественно упругими. Амплитуда кривизны-кручения упругого поля кристаллической решетки увеличивается по мере измельчения зерна.

Ключевые слова: никель, равноканальное угловое прессование, зерно, структура, поля внутренних напряжений.

### Введение

Как известно, интенсивная пластическая деформация (ИПД), формирующая в металлах и сплавах ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру, способствует значительному повышению в них прочностных характеристик [1–7]. Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из эффективных методов ИПД [1–3]. Такой метод позволяет получить образцы УМЗ-материалов таких размеров, по которым не только исследуют их свойства, но и изготавливают из них небольшие детали [2, 3].

Доказано, что в структуре УМЗ-материалов нередко обнаруживаются наноразмерные частицы вторых фаз, расположенные на границах и в стыках зерен [3, 7–12]. Формирование таких частиц в чистых УМЗ-металлах, как правило, наблюдается в ходе ИПД [8, 11, 12]. Объяснить это можно тем, что ИПД приводит к тому, что дислокации захватывают примеси внедрения и замещения и выносят их на границы зерен, где и образуют частицы вторичных фаз. Большое количество точечных дефектов, а также высокая плотность других дефектов (линейных, поверхностных, объемных) усиливают диффузионные процессы. Кроме того, сильно деформированный металл дополнительно может захватывать примеси из окружающей атмосферы. Все это приводит к тому, что в УМЗ-материалах в ходе ИПД формируются частицы вторичных фаз, причем как равновесные диаграммные, так и метастабильные. Образованные на границах и в стыках зерен частицы вторичных фаз препятствуют перемещению границ зерен и тем самым участвуют в формировании УМЗ-структуры [8, 10], а также повышают температурный порог ее рекристаллизации [13].

Однако УМЗ-материалы, полученные методом ИПД, обладают значительной внутренней энергией, локализованной в дефектной структуре многочисленных границ зерен, границ фрагментов внутри крупных зерен, в дислокационной структуре [4, 14]. Упругая энергия искажения кристаллической решетки [3, 6, 15], которая приводит к нестабильности структуры этих материалов, является большей частью избыточной энергией УМЗ-материала [3]. Природа внутренних упругих напряжений УМЗ-материалов является важным предметом исследований. Анализ и изучение внутренних упругих напряжений проводится различными методами [3, 6, 16]. Но использование большинства методов позволяет определить лишь интегральные характеристики, усредненные по всему объему образца. Поэтому в настоящее время знания как об амплитуде внутренних напряжений, так и об их источниках остаются незначительными. Такая задача полностью решается методом просвечивающей электронной микроскопии [3, 7, 17].

В основу настоящей работы положено обобщение результатов, представленных авторами ранее в [18–20]. Работа посвящена детальному исследованию в технически чистом УМЗ-никеле, по-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

УДК 539.194:535.37

DOI: 10.17223/00213411/67/1/3

### Шаровая молния. Модель «мыльного пузыря»<sup>\*</sup>

### Г.В. Майер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Обсуждается целесообразность и необходимость применения принципа дополнительности Бора при исследовании феномена шаровой молнии. На основе личных наблюдений предлагается новая гипотеза о строении шаровой молнии. Обсуждаются некоторые особенности шаровой молнии, объясняемые в рамках предложенной модели.

Ключевые слова: шаровая молния, принцип дополнительности, плазма, электроны, катионы, вода.

### Введение

Шаровая молния (ШМ) до сих пор не получила должного научного объяснения, хотя уже на протяжении двух сотен лет накопилось огромное количество документированных наблюдений.

В принципе не завершена некая дискуссия: является ли ШМ физическим объектом или это проявление совокупности физических и химических процессов, протекающих в атмосфере.

Думается, что при исследовании столь сложного явления природы целесообразно следовать принципу дополнительности Бора [1], который постулировал, что для полного описания квантовомеханических явлений необходимо привлекать взаимоисключающие (дополнительные) классические понятия, и, в частности, предложил, что отношениями дополнительности связаны, например, биологические и физико-химические процессы в организме.

Вероятно, подобные соображения могут быть полезными и при исследовании феномена ШМ, во всяком случае, следование этому принципу означает целесообразность как продолжения создания феноменологических теорий ШМ (что в принципе является важным методическим подходом в теоретических исследованиях [2]), так и предложений различных моделей структуры и механизмов процессов в ШМ. Думается, что следование принципу дополнительности приводит к выводу об отсутствии единой, универсальной, конкретизированной в деталях модели ШМ, т.е. любая модель ШМ должна быть связана отношениями дополнительности с конкретными условиями ее возникновения и физико-химических проявлений.

В этом смысле любая конкретно наблюдаемая природная ШМ уникальна в силу невозможности повторения конкретных условий ее возникновения (атмосферных условий, значений напряженности электрического поля, состава, концентрации и влажности воздуха, длины каналов линейных молний и т.п.). Нельзя не согласиться с тем, что разные модели оказываются полезными для понимания отдельных аспектов природы ШМ, несмотря даже на их кажущуюся взаимную противоречивость [3]. С другой стороны, для ряда моделей, полученных разными авторами, исходящими из различных посылок, часто наблюдается косвенное согласие при описании свойств ШМ.

### Наблюдательная модель ШМ

Анализ огромного массива наблюдений [3–7] позволил установить типичные проявления и средние параметры и характеристики ШМ (некий обобщенный внешний «портрет» ШМ).

Как правило, существует корреляция появления ШМ с летней грозовой погодой (хотя в Японии ШМ появляются в ясную погоду, но есть особенность – в Японии в летние месяцы очень высокая влажность) и линейными молниями;  $\approx 50\%$  ШМ наблюдается в помещениях, из них 60% находились на расстоянии до 5 м от наблюдателя; 60% ШМ возникали на проводниках и приборах – появлялись из розеток, радиоприемников и т.п.; характер движения – плавный и горизонтальный ( $\approx 70\%$ ), со скоростью  $\approx 0.1-10$  м/с, иногда вверх-вниз или по сложной траектории; до 90% ШМ имели сферическую форму, с диаметром порядка 10–20 см, иногда меньше или больше; цветовая гамма – белый, красный, желтый, оранжевый ( $\approx 20\%$  наблюдений), синий, фиолетовый, голубой ( $\approx 10\%$  наблюдений), зеленый (менее 1% наблюдений); при этом ШМ можно отнести к источникам света средней интенсивности с яркостью, сравнимой с электролампочками мощностью 50–200 Вт; об ощущении тепла сообщает лишь несколько процентов наблюдателей, то же самое и по отношению к запаху; анализ наблюдений показывает, что ШМ несет небольшой электрический

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0033.

УДК 678.073:661.481

DOI: 10.17223/00213411/67/1/4

### Влияние материала матрицы и схемы трибоконтакта на антифрикционность композитов ПИ и ПЭИ с политетрафторэтиленом<sup>\*</sup>

Д.Г. Буслович<sup>1</sup>, В.О. Алексенко<sup>1</sup>, Л.А. Корниенко<sup>1</sup>, Ч. Хе<sup>2</sup>, С.В. Панин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия <sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Для установления влияния материала матрицы на сопротивление изнашиванию исследованы структура, механические и трибологические характеристики антифрикционных композитов на основе полиимида (ПИ) и полиэфиримида (ПЭИ) с фторопластом. При этом макромолекулярная цепь ПЭИ обладает большей гибкостью и наличием «активных» атомов кислорода. Трибоиспытания проведены в условиях точечного и линейного трибоконтактов с металлическим и керамическим контртелами. Показано, что при точечном трибоконтакте возможность экранирования сопряженных материалов пары трения политетрафторэтиленовой (ПТФЭ) пленкой обеспечивает интенсивность изнашивания и коэффициент трения на примерно одинаково низком уровне, независимо от материалов полимерной матрицы и контртела. При линейном трибоконтакте интенсивность изнашивания ПИ/ПТФЭ была в 2– 3 раза ниже (чем у ПЭИ/ПТФЭ), что обусловлено более равномерным распределением твердосмазочных частиц в объеме композита. Последнее при трении по керамическому контртелу подавляло формирование продуктов износа на стадии приработки, обеспечивая при низком коэффициенте трения ~ 0.1 минимальную интенсивность износа WR ~ 0.2·10<sup>-6</sup> мм<sup>3</sup>/(Н·м). Трибохимическое взаимодействие стального контртела с полимерной матрицей не позволяло добиться низкого коэффициента трения (CoF > 0.18 для ПИ/ПТФЭ), что вследствие невозможности закрепления трибопленки не обеспечивало возможности достичь WR < 2·10<sup>-6</sup> мм<sup>3</sup>/(Н·м). В случае ПИ/ПТФЭ интенсивность износа была не менее чем в 1.5 раза выше WR > 3·10<sup>-6</sup> мм<sup>3</sup>/(Н·м).

**Ключевые слова:** полиимид, полиэфиримид, структура, политетрафторэтилен, коэффициент трения, пленка переноса.

### Введение

Надежность работы изделий из полимерных материалов, а также длительность их эксплуатации при сохранении основных свойств в значительной мере зависят от термической стабильности, химической стойкости, а также износостойкости [1, 2]. Полиимиды (ПИ) относятся к классу высокоэффективных термопластов и применяются во многих высокотехнологичных отраслях, таких как аэрокосмическая и автомобильная, машиностроение и электроника [3–5]. Однако ненаполненный ПИ не является антифрикционным материалом, что ограничивает его широкое применение для создания узлов трения [6, 7]. Как правило, проблема придания высокопрочным полимерам антифрикционных свойств решается путем введения твердосмазочных наполнителей, прежде всего политетрафторэтилена (ПТФЭ), который, например, для ПИ способен снижать интенсивность износа до нескольких порядков [8]. Однако введение в ПИ частиц ПТФЭ сопровождается снижением деформационно-прочностных свойств [9]. Отсутствие межфазной адгезии, обусловленной неполярной природой ПТФЭ, прежде всего препятствует получению высокопрочных композитов.

Многочисленные исследования трибологических характеристик композитов на основе ПИ показали, что независимо от типов вводимых наполнителей неизменным условием повышения сопротивления изнашиванию является формирование пленки переноса и ее надежная фиксация на контртеле [10, 11]. Данный аспект является определяющим в проектировании эксплуатационных характеристик антифрикционных композитов.

Несмотря на большое количество публикаций, в настоящее время известно небольшое число работ, посвященных исследованиям зависимости структуры ПИ-композитов на триботехнические свойства. Практически отсутствуют обобщенные данные о закономерностях изнашивания ПИ и полиэфиримида (ПЭИ) и композитов при трении скольжения по различным по шероховатости и типу материала контртелам при разных схемах испытаний.

В настоящей работе поставлена задача исследовать взаимосвязь структуры и трибологических характеристик антифрикционных композитов на основе ПИ и ПЭИ от материала контртела, схемы трибоконтакта и нагрузки. Предполагается, что в зависимости от реализуемых закономерностей

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2022-0002. Структурные исследования проведены в раках проекта FWRW-2021-0010.

УДК 539.4.015: 62-405.8:004.94

DOI: 10.17223/00213411/67/1/5

# Моделирование влияния шероховатости контактных поверхностей на риск асептического расшатывания при эндопротезировании

А.Ю. Смолин<sup>1</sup>, Г.М. Еремина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Остеоартрит и остеонекроз головки бедренной кости являются тяжелыми заболеваниями и требуют оперативного лечения – эндопротезирования. Асептическое расшатывание бедренного компонента импланта является следствием микроразрушения костной ткани в контактной области. Механическое поведение в зоне контактирующих материалов при эндопротезировании определяется морфологией их поверхностей. Для исследования влияния шероховатости контактирующих элементов на риск асептического расшатывания применялось компьютерное моделирование методом подвижных клеточных автоматов. Рассматривался сегмент бедренной кости со штифтом от поверхностного эндопротеза. Механическое поведение модельных образцов исследовалось при нагружении, соответствующем физиологическому. Выявлены нелинейные особенности в механическом поведении модельных образцов при различной шероховатости поверхности. Было установлено, что наиболее оптимальной является шероховатость костной ткани около 0.2 мм.

Ключевые слова: эндопротезирование, металлический имплант, шероховатость, численное моделирование.

### Введение

Широкое распространение при лечении остеоартрита и остеонекроза головки бедренной кости получило использование поверхностного эндопротеза, при котором сохраняется шейка бедра [1]. Существуют два способа фиксации эндопротезов: цементный и безцементный [2]. Преимуществом безцементного способа фиксации считается сниженный уровень скачка напряжений в контактной области (stress shielding), за счет чего минимизируются риски резорбции костных тканей. Однако, как показали последние исследования, такой способ крепления зачастую приводит к асептическому расшатыванию штифта импланта [3]. Предполагается, что цементный способ способствует увеличению контактной площади фиксации бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава. Кроме того, такой способ фиксации позволяет заполнять дефекты костной ткани вблизи обработанной поверхности.

Уже более 50 лет костный цемент на основе полиметилметакрилата (ПММА) является наиболее предпочтительным материалом для фиксации протезов крупных суставов [4]. Для применения в эндопротезировании усталостные свойства ПММА и прочность его сцепления с костью (которая обеспечивает достаточное проникновение цемента в губчатую кость) имеют решающее значение [4–6]. Поскольку ПММА биоинертен [7], на границе кость – цемент формируется промежуточный слой, состоящий из фиброзной ткани. Одним из главных факторов, влияющих на прочность сцепления цемента с костной тканью, является шероховатость поверхности. Помимо разрушения на границах раздела кость – цемент или кость – имплант, существует проблема резорбции костной ткани в области конца ножки импланта, что, в свою очередь, способствует его асептической нестабильности. Считается, что на резорбцию губчатой ткани в данной области влияет избыточное давление флюида в области интерфейса кость – имплант [8].

В основном исследования биомеханического поведения материалов, используемых при эндопротезировании, проводятся экспериментально [9]. Однако данные эксперименты обладают таким принципиальным ограничением, как наблюдение эффектов только на поверхности образца и во многих случаях после тестирования. Теоретические исследования и компьютерное моделирование используются для понимания того, что происходит внутри материала. В частности, для более глубокого понимания механических процессов при протезировании такие исследования были проведены в работах [10–12].

В связи с вышесказанным цель данной работы – исследование влияния морфологии контакта биологических тканей и материалов, используемых при поверхностном эндопротезировании, на риск асептического расшатывания импланта на основе численного моделирования методом подвижных клеточных автоматов (ПКА). На основе данных по напряженно-деформируемому состоя-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0006.

УДК 538.97, 53.043, 53.044

DOI: 10.17223/00213411/67/1/6

### Оценка глубины окисления TiAl вследствие зернограничной диффузии кислорода<sup>\*</sup>

М.В. Чепак-Гизбрехт<sup>1</sup>, А.Г. Князева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Диффузия по границам зерен ускоряет высокотемпературное окисление интерметаллидов Ti–Al. В работе представлены результаты численного исследования зернограничной диффузии, сопровождающейся окислением, на основе двумерной модели с явным выделением зерен, границ и тройных стыков между ними. Диффузионные и кинетические свойства границ и зерен различны. Показано влияние размеров зерен, доли граничной фазы и коэффициентов диффузии на динамику насыщения кислородом. Продемонстрирована роль зернограничной диффузии в формировании сложной структуры поверхностного слоя.

Ключевые слова: зернограничная диффузия, окисление интерметаллида, моделирование.

### Введение

Упрочнение материалов за счет измельчения структуры при термомеханической обработке открывает новые возможности для управления механическими свойствами [1]. Упрочнение происходит при уменьшении зерен до субзерен и с увеличением числа дефектов, что способствует активации диффузии примеси и химических превращений [2]. Таким образом, помимо упрочнения, следует ожидать ускоренное окисление или деградацию поверхностного слоя за счет диффузии кислорода или других примесей [3, 4]. Для подавления окисления используют легирующие добавки [5]. Однако при высоких температурах они, напротив, могут ускорять образование хрупких фаз и оксидов [6, 7].

Исследование процессов окисления в основном проводят в рамках феноменологических моделей [8]. Они удобны для идентификации скорости роста окисленного слоя, когда зависимость толщины слоя оксида от времени можно аппроксимировать некоторой функцией. Она может быть линейной [3, 9] или степенной [3, 9]; может зависеть от температуры [9, 10], состава [10, 11], внешней нагрузки [12], внутренних напряжений в зоне окисления [13], диффузии [13–15] или от комплекса факторов, степень влияния которых трудно оценить [16]. В известных моделях материал полагается структурно-однородным и обладающим однородными свойствами, т.е. влияние границ зерен на процесс окисления явно не учитывается.

Для описания диффузии по границам зерен и оценки величины коэффициентов зернограничной диффузии чаще других используют модель изолированной границы Фишера [17] или ее модификации [18, 19]. Аналитическое решение для этой модели получено в предположении, что границы находятся между двумя полубесконечными кристаллами и расположены перпендикулярно свободной поверхности и параллельно друг другу; принимается, что диффузионные зоны между ними не пересекаются. Во время эксперимента диффузия в объеме и по границам происходит одновременно. Поэтому для определения коэффициента зернограничной диффузии с допустимой точностью необходимо выполнение специальных условий, обеспечивающих тот или иной режим. Эти типы кинетики диффузии в поликристаллах впервые были предложены Харрисоном и обозначены как режимы A, B и C [18]. Однако в настоящее время все чаще исследуют поликристаллы с размерами зерен, сопоставимыми с размерами границ между ними; методы их получения предполагают кратковременное воздействие высокой температуры при синтезе [20]. В этом случае модель Фишера для интерпретации данных использовать некорректно. В реальных условиях присутствуют все три типа режимов [21], пересекающиеся границы и тройные стыки между ними приводят к скачкообразному движению диффузанта [22, 23].

Экспериментальные исследования по окислению интерметаллидов Ti–Al показывают, что структура оксидов сложная и состоит из нескольких слоев разного состава и внутренних зон окисления [9, 11, 24, 25]. Поэтому для исследования диффузии окислителя в интерметаллидах необхо-

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

УДК 669.015.17

DOI: 10.17223/00213411/67/1/7

### Микроструктура и фазовый состав многокомпонентных сплавов Nb–Ni–Ti–Zr–Co\*

Е.Б. Кашкаров<sup>1</sup>, Т.Л. Мурашкина<sup>1</sup>, Д.Г. Кроткевич<sup>1</sup>, М. Копцев<sup>1</sup>, А.М. Лидер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Представлены микроструктура, фазовый состав и твердость эквимолярного высокоэнтропийного и многокомпонентных сплавов Nb–Ni–Ti–Zr–Co, синтезированных методом дуговой плавки. Микроструктуру и фазовый состав сплавов анализировали методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции соответственно. Было обнаружено, что в эквимолярном высокоэнтропийном сплаве Nb<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Zr<sub>20</sub>Co<sub>20</sub> образовывались ОЦК–(Nb, Ni, Ti, Zr, Co)- и обогащенные ниобием ОЦК–Nb(Ni, Ti, Zr, Co)-фазы, а в сплавах Nb<sub>45</sub>(NiTiZrCo)<sub>13</sub> и Nb<sub>75</sub>Ni<sub>6</sub>Ti<sub>9</sub>Zr<sub>5</sub>Co<sub>6</sub> помимо указанных ОЦК-фаз присутствуют B2–Ni(Ti, Zr)-, B2–CoZr- и ZrNi-фазы в различном соотношении. Эквимолярный высокоэнтропийный сплав Nb<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub>Ti<sub>20</sub>Zr<sub>20</sub>Co<sub>20</sub> характеризуется значением твердости (550±10) HV, а многокомпонентные сплавы Nb<sub>45</sub>(NiTiZrCo)<sub>13</sub> и Nb<sub>75</sub>Ni<sub>6</sub>Ti<sub>9</sub>Zr<sub>5</sub>Co<sub>6</sub> – значениями (450±40) HV и (390±20) HV соответственно.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, многокомпонентные сплавы, мембраны, микроструктура, твердость.

### Введение

Одним из наиболее эффективных способов разделения и очистки водорода является мембранная технология благодаря таким преимуществам, как низкие эксплуатационные расходы, высокая производительность и низкое энергопотребление [1]. Наибольшей селективной способностью обладают металлические мембраны, в частности, тонкие палладиевые (Pd) фольги имеют коэффициент разделения водорода > 1000 [1]. Мембраны на основе палладия с гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой решетки обладают способностью диссоциировать и растворять молекулярный водород и, таким образом, демонстрируют превосходные свойства проницаемости для водорода [2]. Однако высокая стоимость Pd заставляет исследователей постоянно искать композиционные мембраны или альтернативные эффективные мембранные материалы [3].

Металлы V группы (V, Nb, Ta и др.) с более открытой объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой более проницаемы для водорода и являются перспективными кандидатами в качестве материалов для водородопроницаемых мембран [4]. Однако в большинстве случаев одноэлементные мембраны из металлов V группы обладают такими недостатками, как водородное охрупчивание (ВО) и газовое отравление при высокой температуре, что не позволяет широко использовать их для разделения водорода в промышленности [5]. В связи с этим разрабатываются многокомпонентные сплавы на основе элементов V группы с ОЦК-структурой, более устойчивые к водородному охрупчиванию [6–9]. Хорошо известно, что состав сплавов существенно влияет на их водородопроницаемость и стойкость к ВО [10]. В частности, проницаемость зависит от многих факторов, но наиболее важными являются растворимость и диффузия внутри кристаллической решетки. Ниобий и его сплавы характеризуются высокой водородопроницаемостью вследствие высоких пределов растворимости и относительно высокой диффузионной подвижности водорода. Было показано, что легирование сплавов на основе Nb, Ti и Ni может привести к снижению водородной хрупкости и проницаемости [11]. Помимо образования ОЦК-фаз, междендритные соединения TiNi ингибируют образование гидридов. Ni стабилизирует сплав, уменьшая поглощение водорода [12, 13]. Присутствие Ті в сплавах на основе Nb повышает термическую стабильность и водородопоглощение [14]. Добавление Zr в сплав Ni–Nb–Zr–Co увеличивает сорбцию водорода и проницаемость, однако это снижает устойчивость к ВО.

Добавление Со эффективно подавляет водородное охрупчивание сплава Ni–Nb–Zr–Co [15]. Тан и др. исследовали многокомпонентный Nb<sub>40</sub>Ti<sub>18</sub>Zr<sub>12</sub>Ni<sub>25</sub>M<sub>5</sub> (M = Al, Co, Cu, Pd) и показали, что сплав Nb<sub>40</sub>Ti<sub>18</sub>Zr<sub>12</sub>Ni<sub>25</sub>Co<sub>5</sub> имеет наибольшую проницаемость  $3.8 \cdot 10^{-8}$  моль H<sub>2</sub>·м<sup>-1</sup>·c<sup>-1</sup>·Па<sup>-0.5</sup>, выше, чем сплав Pd<sub>0.23</sub>Ag<sub>0.77</sub> с проницаемостью  $1.6 \cdot 10^{-8}$  моль H<sub>2</sub>·м<sup>-1</sup>·c<sup>-1</sup>·Па<sup>-0.5</sup> при сохранении стабильных характеристик [16].

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2021-0017.

Теплофизика и гидродинамика

### ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.2 (075)

DOI: 10.17223/00213411/67/1/8

### Формирование нестационарного профиля скорости в плоском канале\*

В.А. Кудинов<sup>1</sup>, К.В. Трубицын<sup>1</sup>, Т.Е. Гаврилова<sup>1</sup>, К.В. Колотилкина<sup>1</sup>, Е.В. Котова<sup>1</sup>, В.К. Ткачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

На основе определения дополнительных граничных условий (ДГУ) и дополнительной искомой функции (ДИФ) получено аналитическое решение задачи формирования профиля скорости в плоском канале при ламинарном течении жидкости, в предельном случае (при  $n \to \infty$ ) совпадающее с точным решением. Физический смысл ДГУ состоит в том, что их выполнение искомым решением в граничных точках эквивалентно выполнению в этих точках исходного дифференциального уравнения. Показано, что выполнение уравнения на границах приводит к его выполнению и внутри рассматриваемой области без проведения процесса непосредственного интегрирования по пространственной переменной. ДИФ, описывающая изменение во времени скорости в центре канала, сводит решение уравнения в частных производных к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения. Ее использование позволяет находить точные значения собственных чисел, определяемых в классических методах из решения краевой задачи Штурма – Лиувилля, определенной в пространственной переменной. Следовательно, в данном случае рассматривается другое направление определения собственных чисел, а именно – через решение временного обыкновенного дифференциального уравнения с заданной точностью определяются из начального условия методом наименьших квадратов.

**Ключевые слова:** ламинарное течение жидкости, формирование профиля скорости, точное аналитическое решение, дополнительные граничные условия, дополнительная искомая функция, метод наименьших квадратов.

### Введение

Профили скорости ламинарного установившегося течения жидкости находятся путем интегрирования стационарных уравнений Навье – Стокса. Формулы их нахождения в каналах различной формы поперечного сечения приводятся во многих литературных источниках [1–3]. Однако практический интерес представляет также нахождение нестационарных профилей скорости, определяемых из решения нестационарных уравнений Навье – Стокса. Получение их точных аналитических решений усложняется наличием внутреннего источника, характеризующего перепад давлений на концах канала, а также трудностями решения краевых задач Штурма – Лиувилля при сложных, в том числе и несимметричных, граничных условиях [1–3]. В связи с этим разработка более простых методов получения точных аналитических решений таких задач является актуальной.

В аналитической теории краевых задач известны методы, основанные на определении интеграла взвешенной невязки исходного дифференциального уравнения (Л.В. Канторовича, Бубнова – Галеркина, интегральный метод теплового баланса и др.) [4–20]. Основным недостатком этих методов, относящихся к группе приближенных аналитических методов, является низкая точность получаемых решений. Причина в том, что нахождение интеграла взвешенной невязки приводит к осреднению уравнения в пределах области определения пространственной переменной. Выполнение искомым решением осредненного дифференциального уравнения, в свою очередь, приводит к низкой точности определения собственных чисел и собственных функций. Следовательно, повышение точности решений связано с повышением точности выполнения исходного дифференциального уравнения в пространственно-временной области его определения. Для решения этой проблемы в настоящей работе используются дополнительные граничные условия (ДГУ) и дополнительная искомая функция (ДИФ). Эти условия не входят в исходную математическую поста-

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Теплофизика и гидродинамика

УДК 532.5.013.12

DOI: 10.17223/00213411/67/1/9

### К вопросу о силе сопротивления раскаленного шара

### С.О. Гладков<sup>1</sup>

### <sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Приводится подробное решение задачи о вычислении силы сопротивления движущегося в вязком континууме раскаленного шара. Задача решается в стационарном случае на интервалах времен, когда теплообмен тела с окружающей средой не приводит к существенным изменениям его температуры. Рассмотрен предельный случай, когда число Нуссельта велико (коэффициент теплопроводности мал), а температура разогретого шара считается постоянной вместе с температурой окружающей среды.

Ключевые слова: сила сопротивления, число Нуссельта, число Прандтля, число Рейнольдса.

### Введение

Когда речь заходит о вычислении силы сопротивления, действующей на шар со стороны обтекающего его континуума, классическим примером (и в некотором смысле эталоном) может служить вывод формулы Стокса [1–3]. В этом направлении существует множество работ, посвященных вычислению силы сопротивления, и в которых довольно подробно приводятся решения похожих задач. Однако постановки задач в каждом отдельном случае абсолютно разнообразные. В частности, в работах [4–18] были решены задачи обтекания пористых шаров, шаров, окруженных пористой мембраной, вращающихся шаров, двухслойных шаров и просто полых шаров.

Настоящая работа не является исключением, и в ней мы остановимся на анализе похожей задачи, в которой проанализируем и приведем все подробности вычисления силы сопротивления в случае, когда поток жидкости обтекает раскаленный шар. В общем случае эта задача представляет собой нестационарную проблему, а ее решение при этом становится довольно сложным. Мы несколько упростим постановку задачи и в настоящей работе после соответствующего обоснования решим ее, как стационарную.

Чтобы свести задачу к стационарной, предположим, что интервалы времен  $\delta t$ , на которых мы

вычисляем силу сопротивления, сравнительно невелики, и выполняется условие  $\delta t \ll \frac{4R^2}{\chi}$ , где

R – радиус шара, а  $\chi$  – его коэффициент температуропроводности. Иными словами, тепловое равновесие между жидкостью и шаром за рассматриваемый промежуток времени движения не успеет установиться. В противном случае придется аналитически и численно искать решение совместной системы нестационарных уравнений Навье – Стокса, уравнения непрерывности и уравнения теплопроводности.

Эта задача в настоящей работе не рассматривается.

Предполагается, что вблизи раскаленной поверхности шара имеет место возникновение газового облака с взвешенными в нем капельками жидкости, что свойственно любому процессу испарения благодаря контакту раскаленного тела с обтекающим его внешним потоком. Эту область для краткости будем называть «туманом», и она будет обозначаться цифрой 1. Иными словами, в такой постановке задачи у нас имеется твердый шар, окруженный неоднородным паром, а вся эта структура обтекается вязкой жидкостью. При этом жидкие капли благодаря эффекту Лейденфроста будут просто «парить» вблизи раскаленной поверхности. О граничных условиях такой задачи мы поговорим чуть ниже. Что касается ее геометрической постановки, то она может быть проиллюстрирована с помощью рис. 1, на котором изображен стационарно натекающий со скоростью **u** вязкий поток, температура которого постоянна. Здесь же показан неподвижный шар радиуса R, а также область «тумана», правая граница которой определена радиусом  $R_1$ . При этом ширина области определяется как разность  $\delta = R_1 - R$ .

### Полная версия: https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725

Физика плазмы

### ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

DOI: 10.17223/00213411/67/1/10

## Оценка окислительного эффекта нетермальной аргоновой плазмы на поверхность ферросульфатного дозиметра\*

Д.В. Басырова<sup>1</sup>, С.А. Горбатов<sup>1</sup>, В.А. Харламов<sup>1</sup>, П.Н. Цыгвинцев<sup>1</sup>, Д.И. Петрухина<sup>1</sup>, И.М. Меджидов<sup>1</sup>, Н.В. Глущенко<sup>1</sup>, В.Н. Тихонов<sup>1</sup>, И.А. Иванов<sup>1</sup>

### <sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, г. Обнинск, Россия

В настоящее время нетермальную аргоновую плазму активно используют с целью дезинфекции в сельском хозяйстве и пищевой промышленности для обработки поверхности мяса, птицы, овощей, фруктов. В качестве газа носителя чаще всего выступает аргон, обладающий рядом преимуществ, главное из которых – дешевизна. Для измерения поглощенных доз используют химические дозиметры, среди которых ферросульфатный дозиметр Фрикке. Рассмотрены закономерности изменения окислительных свойств при плазменной обработке ферросульфатного раствора дозиметра Фрикке с различной толщиной слоя. В ходе воздействия нетермальной аргоновой плазмой на раствор дозиметра Фрикке установлено, что данный метод обработки может использоваться в борьбе с поверхностным загрязнением биообъектов за счет способности плазмы инактивировать микроорганизмы.

Ключевые слова: нетермальная плазма, аргон, дозиметр Фрикке, окислительные свойства, концентрация железа, объем раствора, время облучения.

### Введение

Физическая плазма различается на высокотемпературную  $(5 \cdot 10^4 - 10^6 \text{ K})$  и низкотемпературную ( $\leq 5 \cdot 10^4 \text{ K}$ ) [1]. Плазма – это газ, состоящий из равного числа положительно и отрицательно заряженных ионов. Как правило, ее получают из инертных газов, но следует отметить обязательное наличие электрического поля, образующегося при подводе энергии, которая необходима для поддержания плазмы в стабильном состоянии. В процессе передачи данной энергии часть поступает в пробу, тем самым вызывая ее атомизацию и возбуждение.

Чаще всего в качестве газа-носителя выступает аргон, поскольку он обладает рядом преимуществ, главное из которых – дешевизна. К другим преимуществам можно отнести простоту спектра, способность ионизировать большое количество элементов и не вступать с ними во взаимодействие за счет малой активности самого газа. Еще одним преимуществом использования аргона перед другими элементами является энергия ионизации 15.76 эВ, что выше, чем у водорода, но ниже, чем у гелия, неона или фтора [2].

В настоящее время в большинстве случаев использование нетермальной аргоновой плазмы стало междисциплинарной областью исследований. Нетермальная плазма содержит активные формы кислорода и азота, которые участвуют в реакциях при обработке биологических объектов [3]. Биоцидными агентами, производимыми нетермальной плазмой, являются тепло, электрические поля, ультрафиолетовое излучение, ударные волны и реактивные химические вещества. Кроме того, вторичные биологические эффекты могут быть вызваны реакциями химических веществ после разряда, производимыми плазмой в газах и жидкости [4].

Отличительной особенностью аргоновой плазмы перед рентгеновским облучением является наличие большого количества радикалов ·OH, обнаруженных методом электронного парамагнитного резонанса. Помимо гидроксильного радикала было обнаружено небольшое количество атомов водорода, но при этом стоит отметить отсутствие оксида азота. Несмотря на преимущества аргоновой плазмы по образованию гидроксильных радикалов, наиболее губительное действие на объект оказывало γ-облучение [5].

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания по Программе деятельности Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (проект 5ф6.2).

Физика плазмы

УДК 53.08

DOI: 10.17223/00213411/67/1/11

### Методика определения радиационных потерь в прозрачной плазме с призвольной конфигурацией

В.И. Радченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Приведен один из возможных вариантов решения томографической задачи о восстановлении пространственной зависимости радиационных потерь прозрачной плазмы с произвольной конфигурацией (без наложения каких-либо условий на пространственную симметрию функции радиационных потерь плазмы в занимаемом ею объеме) на основе результатов хордовых измерений поперечного электромагнитного излучения плазмы. Предложена методика нахождения величин, необходимых для практического решения указанной задачи.

**Ключевые слова:** радиационные потери плазмы, поперечное распределение излучения плазмы, восстановление пространственной зависимости радиационных потерь.

### Введение

Решение проблемы достижения температуры, плотности, времени удержания плазмы, необходимых для эффективной выработки энергии в установках управляемого термоядерного синтеза, может быть основано лишь на глубоком понимании процессов, протекающих в плазме. Экспериментальное изучение указанных процессов было бы в значительной мере более успешным, если бы существовала методика томографического измерения радиационных потерь в том или ином сечении плазменного объема с достаточно хорошим (малым) пространственным и временным разрешением. Усилия в этом направлении стали предприниматься вскоре после начала работ по созданию установок управляемого термоядерного синтеза, но на первых порах значимых результатов удалось добиться только для случая цилиндрически симметричной плазмы ([1, 2], см. также [3]). Исследования последних лет поднимают значимость определения радиационных потерь плазмы как функции пространственных координат и времени на качественно более высокий уровень (в том числе в задаче управления состоянием плазмы; см., напр., [4]).

Для бесконтактного определения пространственно-временной зависимости радиационных потерь в исследуемой области плазменного объема вокруг этой области устанавливается система болометрических детекторов [5], оси которых направлены по хордам, пересекающим наблюдаемый объем (так называемые хордовые измерения). Измеряемая мощность излучения W, падающего на детектор, в некоторых предположениях записывается в виде интеграла, одной из подынтегральных функций которого является искомая зависимость радиационных потерь от пространственных координат  $\varepsilon(x, y, z)$ . Указанное равенство представляет собой уравнение Фредгольма 1-го рода относительно функции  $\varepsilon(x, y, z)$ . Трудности решения уравнения Фредгольма 1-го рода связаны с неоднозначностью и неустойчивостью искомого решения [6].

В настоящей работе предложена методика восстановления пространственной зависимости радиационных потерь прозрачной плазмы по результатам хордовых измерений излучения, в которой уравнение Фредгольма не используется, а задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно дискретных значений радиационных потерь  $\varepsilon_i$ , аппроксимирующих зависимость  $\varepsilon(x, y, z)$ .

### Методика определения радиационных потерь

Пусть требуется определить радиационные потери плазмы  $\varepsilon(x, y, z)$  в плоскости (x, y) плазменного объема, не обладающего какой-либо симметрией. Плоскость (x, y) задается уравнением z = const, а регистрация излучения ведется из слоя  $[z, z + \Delta z]$ . Будем считать, что сечение плазменного объема плоскостью (x, y) целиком заключено в круге *C* диаметром *A*, вписанном в Физика элементарных частиц и теория поля

### ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.12

DOI: 10.17223/00213411/67/1/12

### Расширение симметрий и обобщенные инвариантно-групповые решения уравнения теплопроводности и уравнения Бюргерса<sup>\*</sup>

А.И. Бреев<sup>1</sup>, К.В. Васильев<sup>1</sup>, А.В. Шаповалов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия <sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

На примере линейного одномерного уравнения теплопроводности и связанного с ним уравнения Бюргерса рассмотрены симметрии в пространстве с дополнительной независимой переменной, не входящей в уравнение, названные (параметрически) расширенными. Такие симметрии строятся с помощью расширения некоммутативных подалгебр симметрии уравнения. Получено параметрическое семейство инвариантно-групповых решений, определяемых расширенными симметриями. Приведены иллюстративные примеры полученных решений.

**Ключевые слова:** уравнение теплопроводности, уравнение Бюргерса, групповой анализ, расширение симметрий, некоммутативное интегрирование, инвариантно-групповые решения.

### Введение

Групповой анализ дифференциальных уравнений [1–3], построенный на базовых концепциях симметрии и инвариантности уравнений, является естественной основой для поиска новых подходов к проблемам интегрирования уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений математической физики.

Группа инвариантности позволяет находить семейства решений исходного уравнения исследуемой модели посредством перехода к уравнению с меньшим числом независимых переменных, называемому подмоделью. Для данного уравнения подмодели непосредственно связаны с оптимальной системой подалгебр группы симметрии уравнения. Знание оптимальной системы подалгебр позволяет алгоритмически строить подмодели с различными свойствами симметрии, которые, в свою очередь, приводят к семействам частных решений, обладающих симметрией уравнения. Такие решения называют инвариантно-групповыми решениями или частично-инвариантными в зависимости от подалгебры группы симметрии уравнения [1–3]. Поэтому в задачи группового анализа входит исследование различных модификаций и обобщений классического группового анализа уравнений, которые позволяют расширить возможности построения новых решений и изучения их свойств.

Этим исследованиям посвящена обширная библиография последних десятилетий, определившая основной тренд развития современного группового анализа уравнений математической физики. В числе заметных результатов, полученных на этом пути, отметим концепцию условных симметрий (например, [4–7] и др.), неклассические симметрии [8, 9]. Идеи расширить симметрии исследуемого уравнения путем введения дополнительных независимых переменных использовались в [10–12] для построения базисов решений линейных уравнений, а в [13] – для обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. В работе [14] развит формализм продолжения векторных полей, связанный с симметрией уравнений.

В данной работе на примере одномерного уравнения теплопроводности и связанного с ним уравнения Бюргерса мы рассматриваем возможность построения продолжения групповых свойств уравнения посредством введения дополнительной переменной на основе идей метода некоммутативного интегрирования, развитого в [10–12]. Близкой к данной работе является работа [15], где исследуется подобная задача, но на основе другого подхода.

Получено параметрическое семейство инвариантно-групповых решений, определяемых продолженными симметриями. Приведены иллюстративные примеры полученных решений.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-12-00042, https://rscf.ru/project/19-12-00042/.

УДК 530.12

DOI: 10.17223/00213411/67/1/13

# О свойствах стационарных распределений самогравитирующего массивного и нелинейного спинорных полей<sup>\*</sup>

В.Г. Кречет<sup>1</sup>, В.Б. Ошурко<sup>1,2</sup>, А.Э. Киссер<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия <sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия <sup>3</sup> Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

Исследуются свойства равновесных конфигураций самогравитирующих дираковских спинорных полей как нелинейных, так и с массивной составляющей. С этой целью решаются совместные системы уравнений Эйнштейна и Дирака с нелинейными добавками различного типа. Показано, что некоторые типы нелинейности могут естественным образом индуцироваться в результате непосредственного взаимодействия спинорного поля Дирака с гравитационным полем и приводить к образованию «кротовых нор», среди которых могут быть и проходимые «кротовые норы».

Ключевые слова: спинорные поля, гравитация, нелинейность, уравнения Эйнштейна – Дирака, «кротовые норы».

### Введение

В работе рассматриваются свойства стационарных равновесных распределений самогравитирующего массивного и нелинейного спинорных полей и возможные астрофизические свойства у таких распределений.

Дираковское спинорное поле позволяет описать все известные элементарные частицы, относящиеся к фермионам. Кроме того, дираковское спинорное поле  $\psi(x, y, z, t)$  может описывать идеальную жидкость с распределенным собственным моментом импульса [1]. Свойства стационарных распределений самогравитирующего спинорного поля рассматривались ранее во многих работах [2–10]. В качестве примеров по спинорному полю можно привести еще работы Б. Саха [11–13]. В некоторых из перечисленных работ получены решения, описывающие геометрию пространства-времени «кротовых нор» [4–7, 9].

«Кротовые норы» – это своеобразные тоннели в пространстве-времени, соединяющие между собой отдаленные области нашей Вселенной или даже нашу Вселенную с параллельной Вселенной. Геометрия «кротовых нор» («wormholes») получается как решения уравнений Эйнштейна с тензором энергии-импульса материи с весьма экзотическими свойствами, например, с отрицательной плотностью энергии.

Первую подобную геометрическую конструкцию предложил еще Эйнштейн, в которой две «черные дыры» в нашей и параллельной Вселенных соединяются геометрической перемычкой (мостик Эйнштейна – Розена [14]), метрика «кротовой норы» как решения уравнений Эйнштейна впервые была предложена в работе Морриса и др. [15]. Работы по тематике физики «кротовых нор» опубликованы также К.А. Бронниковым [16–18], он одним из первых получил метрику проходимой «кротовой норы» Эллиса [16, 19].

### Постановка задачи

Нелинейность у спинорного поля может быть как исходной, так и индуцированной при взаимодействии спинорного поля с другими физическими полями. Так, например, если рассматривать спинорное поле с нелинейностью типа  $(\overline{\psi}\psi)^n$ , то ее можно представить в виде  $(\overline{\psi}\psi)^{n-1}(\overline{\psi}\psi)$ . Тогда лагранжиан спинорного поля с такой нелинейностью и при наличии у него массы можно записать в виде

$$L(\Psi) = \frac{\hbar c}{2} \left[ \nabla_k \overline{\Psi} \gamma^k \Psi - \overline{\Psi} \gamma^k \nabla_k \Psi - 2\mu \left( \overline{\Psi} \Psi \right) + k \left( \overline{\Psi} \Psi \right)^{n-1} \left( \overline{\Psi} \Psi \right) \right].$$
(1)

<sup>\*</sup> Работа поддержана Министерством высшего образования и науки РФ.

Оптика и спектроскопия

### ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 543.42.062; 538.975

DOI: 10.17223/00213411/67/1/14

# Недеструктивный количественный элементный анализ поверхности материалов<sup>\*</sup>

Е.В. Егоров<sup>1,2</sup>, В.К. Егоров<sup>1</sup>, Е.Л. Кореневский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка, Россия <sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

Представлены возможности методов резерфордовского обратного рассеяния и метода протон-индуцированной рентгеновской эмиссии, а также особенности их применения для недеструктивной элементной диагностики поверхности материалов. Показано, что совместное использование этих методов позволяет количественно характеризовать химический состав поверхностного слоя различных объектов и определять элементный концентрационный профиль по толщине этого слоя с наноразмерным разрешением. Использование методов продемонстрировано на примерах тонкопленочных покрытий, образцов нефти и текстильной промышленности.

Ключевые слова: количественный анализ, элементный состав, резерфордовское обратное рассеяние, PIXE, диагностика, тонкие пленки.

Диагностика поверхности материальных объектов предполагает получение данных о химическом составе приповерхностного слоя, его макро- и микроструктуре, фазовых соотношениях, а также сведений о степени его текстурированности и ориентационной связи с объемом. Поскольку структурные, фазовые и физико-химические свойства этого слоя определяются его элементным составом, то анализ содержания элементов представляется важнейшим диагностическим фактором. Для этих целей используется целый ряд методов электронной, ионной и масс-спектрометрии, а также рентгеновской диагностики. Каждый экспериментальный диагностический метод характеризуется своими особенностями, требованиями к проведению измерений и подготовке тестируемых проб. Но при этом практически все элемент-аналитические методы для реализации количественности получаемых данных нуждаются в использовании эталонов и стандартов. В то же время в арсенале аналитиков имеется элемент-диагностический метод, не требующий дополнительных измерений с применением эталонов и весьма эффективный при элементной диагностике поверхности. Это метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов на изучаемой поверхности [1, 2]. Отсутствие необходимости в эталонировании РОР-измерений связано с тем, что получаемые в измерениях экспериментальные спектры ионного рассеяния нормируются на полное число ионов, рассеянных мишенью в течение сеанса измерений, которое регистрируется интегратором тока. Держатель изучаемой мишени изолирован от металлических частей экспериментальной вакуумной камеры для РОР-измерений, показанной на рис. 1, что позволяет регистрировать величину полного заряда, принесенного ионным пучком на мишень за измерительный сеанс. Для регистрации рассеянных ионов в камере устанавливаются детекторы заряженных частиц. В схеме камеры, показанной на рис. 1, установлено два таких детектора, расположенных под разными углами относительно направления распространения ионного пучка, параллельное использование которых упрощает аппроксимацию регистрируемых спектров. Для компенсации недостаточной чувствительности РОР-измерений в камере предусмотрена установка рентгеновского детектора, позволяющего в параллельном режиме регистрировать выход рентгеновской ионофлуоресценции. Измерения выполняются в условиях вакуума (1-3) 10<sup>-4</sup> Па с использованием коллимированных ионных пучков He<sup>+</sup> и H<sup>+</sup>. Диаметр ионного зонда обычно составляет 1 мм. Измерительные дозы обычно не превышают значения 1·10<sup>15</sup> ион/см<sup>2</sup>, что обеспечивает недеструктивность ионнопучковой диагностики материалов.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-01304-23-00.

Оптика и спектроскопия

УДК 535.376;535.373.3

DOI: 10.17223/00213411/67/1/15

### Кинетика люминесценции кислородных центров в LiF-TiO<sub>2</sub>\*

В.И. Корепанов<sup>1</sup>, Гуанхуэй Гэ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Методами спектроскопии с временным разрешением изучены процессы, вызывающие люминесценцию двух типов кислородных центров в кристаллах фторида лития с примесью титана. Измерены кинетики импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) в температурном диапазоне 200–300 К при мониторинге в области излучения полос люминесценции, принадлежащих разным типам центров люминесценции. Вся кинетика ИКЛ содержит три компонента (два затухания и один разгорания), соотношение интенсивностей которых зависит от температуры. Показано, что в LiF–TiO<sub>2</sub> существует два вида процессов передачи энергии электронных возбуждений от основы кристалла примесному центру – быстрый и медленный. Обсуждаются возможные механизмы этих процессов.

Ключевые слова: фторид лития, примесь титана, импульсная катодолюминесценция, кинетика.

### Введение

Кристаллы фторида лития, допированные металлами (W, Ti), являются неплохими сцинтилляторами. Однако в этих материалах до сих пор не установлена окончательно структура центров свечения и механизмы возбуждения люминесценции при воздействии ионизирующими излучениями. Известно, что основными центрами люминесценции в этих материалах являются кислородные центры, которые образуются благодаря вхождению в кристалл при выращивании примесей кислорода в качестве компенсаторов избыточного заряда, вносимого многовалентной примесью [1–5].

Из исследований фотолюминесценции (ФЛ) и импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) с наносекундным временным разрешением LiF–WO<sub>3</sub>, LiF–TiO<sub>2</sub>, LiF–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [1, 6] нами установлено, что во всех этих кристаллах люминесценция состоит из двух полос с близкими параметрами. Например, максимумы полос излучения в изученных системах находятся в области 3.1 и 2.6 эВ, что свидетельствует об одинаковой конфигурации центов люминесценции в кристаллах фторида лития, допированных разными многовалентными металлами. Полоса 3.1 эВ принадлежит достаточно изученному центру типа  $O^{2-}-V_a$ , [3, 4], но возмущенному примесью металла, так как ее полуширина меньше чем в кристаллах фторида лития, содержащих в качестве примеси только ионы кислорода. Полоса 2.6 эВ принадлежит центру типа  $O^{2-}-Me$ , так как она проявляется только в кристаллах с примесями металла [6].

В настоящей работе мы приводим результаты исследования кинетики импульсной катодолюминесценции кристаллов LiF–TiO<sub>2</sub> в диапазоне температур 200–300 К с временным разрешением 7 нс после возбуждения импульсами ускоренных электронов со средней энергией 200–250 кэВ, длительностью импульса 5–10 нс и плотностью тока пучка электронов в пределах 100–500 A/см<sup>2</sup>.

### Экспериментальные результаты

Измерены кинетики ИКЛ в температурном диапазоне 200–300 К при мониторинге в области излучения двух полос люминесценции, принадлежащих разным центрам (400 нм (3.1 эВ) и 500 нм (2.48 эВ)). В этом температурном диапазоне удобно изучать стадию разгорания люминесценции, так как в других диапазонах она слабо проявляется в кинетике. Типичный вид кинетики ИКЛ при 300 К показан на рис. 1. Как видно, характерной особенностью ИКЛ кристаллов LiF, допированных примесями многовалентных металлов, является наличие медленных стадий разгорания и затухания.

Из зависимостей, представленных на рис. 1-3, видно, что кинетика люминесценции содержит медленную стадию разгорания в микросекундном временном диапазоне. При этом она начинается не с нулевого значения интенсивности. Это однозначно говорит о существовании еще одного механизма разгорания, более быстрого, чем видного в микросекундном временном диапазо-

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках Программы развития ТПУ.

Ежемесячный научный журнал

### **ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА** IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. T. 67. № 1

Адрес редакции и издателя: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36, Томский государственный университет, редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова* Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова* Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова* Оригинал-макет *Д.В. Фортеса* 

Подписано к печати 22.01.2024. Выпуск в свет 24.01.2024. Заказ № 5745. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая. Усл. п. л. 15.35. Уч.-изд. л. 17.19. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании Издательства Томского государственного университета, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849. http://publish.tsu.ru; e-mail: rio.tsu@mail.ru